

**ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ ВА САМАРҚАНД ДАВЛАТ  
УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ФАН ДОКТОРИ ИЛМИЙ  
ДАРАЖАСИНИ БЕРУВЧИ 16.07.2013.ФМ/Т.12.01 РАҚАМЛИ  
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ**

**НАСРИДДИНОВ САЙФИЛЛО САИДОВИЧ**

**КРЕМНИЙ АСОСИДА НИКЕЛ АТОМИ  
НАНОКЛАСТЕРИЛИ ТЕРМОДАТЧИКНИ ИШЛАБ ЧИҚИШ  
ВА УНИ ТАЙЁРЛАШ ТЕХНОЛОГИЯСИ**

**01.04.10 – Ярим ўтказгичлар физикаси (техника фанлари)**

**ДОКТОРЛИК ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

**Тошкент – 2016 йил**

**Докторлик диссертацияси автореферати мундарижаси**  
**Оглавление автореферата докторской диссертации**  
**Content of the abstract of doctoral dissertation**

Насриддинов Сайфилло Саидович Кремний асосида никел атоми нанокластерили термодатчикни ишлаб чиқиш ва уни тайёрлаш технологияси.....	3
Насриддинов Сайфилло Саидович Разработка термодатчика на основе кремния с нанокластерами атомов никеля и его технология изготовления.....	27
Nasriddinov Sayfillo Saidovich Development of temperature sensor based on silicon with nanoclusters of nickel atoms and its manufacturing technology.....	52
Эълон қилинган ишлар рўйхати Список опубликованных работ List of published works.....	75

**ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ ВА САМАРҚАНД ДАВЛАТ  
УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ФАН ДОКТОРИ ИЛМИЙ  
ДАРАЖАСИНИ БЕРУВЧИ 16.07.2013.ФМ/Т.12.01 РАҚАМЛИ  
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ**

**НАСРИДДИНОВ САЙФИЛЛО САИДОВИЧ**

**КРЕМНИЙ АСОСИДА НИКЕЛ АТОМИ  
НАНОКЛАСТЕРИЛИ ТЕРМОДАТЧИКНИ ИШЛАБ ЧИҚИШ  
ВА УНИ ТАЙЁРЛАШ ТЕХНОЛОГИЯСИ**

**01.04.10 – Ярим ўтказгичлар физикаси (техника фанлари)**

**ДОКТОРЛИК ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

**Тошкент – 2016 йил**

Докторлик диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий Аттестация комиссиясида 28.04.2016/ В.2016.2Т.323 рақам билан рўйхатга олинган.

Докторлик диссертацияси Тошкент давлат техника университетида бажарилган.  
Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз) Илмий кенгашнинг веб-саҳифага (fti-kengash.uz) ва “ZiyoNet” Ахборот-таълим порталига (www.ziyounet.uz) жойлаштирилган.

**Илмий маслаҳатчи:** **Эгамбердиев Баҳром Эгамбердиевич**  
физика-математика фанлари доктори, профессор

**Расмий оппонентлар:** **Муминов Рамизулла Абдуллаевич**  
физика-математика фанлари доктори, Ўз.Р ФА академиги

**Абдукадыров Мухитдин Абдурашидович**  
техника фанлари доктори, профессор

**Алиев Райимжон**  
техника фанлари доктори, профессор

**Етакчи ташкилот:** **Фарғона политехника институти**

Диссертация ҳимояси Физика-техника институти ва Самарқанд давлат университети ҳузуридаги 16.07.2013.ФМ/Т.12.01 рақамли Илмий кенгаш асосида 01.04.10 ихтисослиги бўйича (техника фанлари) тузилган бир марталик илмий кенгашнинг «\_\_\_»\_\_\_\_\_2016 й. соат \_\_\_\_\_даги мажлисида бўлиб ўтади (Манзил: 100084, Тошкент, Бодомзор йўли кўчаси, 26-уй. Тел./факс: (99871) 235-42-91, e-mail: [lutp@uzsci.net](mailto:lutp@uzsci.net)).

Докторлик диссертацияси Физика-техника институти Ахборот-ресурс марказида № 04 рақами билан рўйхатга олинган, диссертация билан АРМ да танишиш мумкин (Манзил: 100084, Тошкент, Бодомзор йўли кўчаси, 26-уй. Тел./факс: (99871) 235-30-41).

Диссертация автореферати 2016 йил «\_\_\_»\_\_\_\_\_ да тарқатилди.

(2016 йил \_\_\_\_\_ даги \_\_\_\_\_ рақамли реестр баённомаси).

**С.Л. Лутпуллаев**  
Фан доктори илмий даражасини берувчи  
илмий кенгаш раиси ф.-м.ф.д., профессор

**А.В. Каримов**  
Фан доктори илмий даражасини берувчи  
бир марталик илмий кенгаш илмий котиби  
ф.-м.ф.д., профессор

**И.Г. Атабаев**  
Фан доктори илмий даражасини берувчи  
илмий кенгаш ҳузуридаги илмий семинар раиси  
ф.-м.ф.д., профессор

## Кириш (докторлик диссертацияси аннотацияси)

**Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати.** Ҳозирги кунда жаҳонда динамикали ривожланаётган электрон ҳисоблаш техникаси йўналишида муҳим физик-технологик муаммолардан бири саноатда, илмий текширишда ҳамда хўжаликда ҳар хил жараёнларни кенг кўламда автоматлаштиришда, биринчи галда ҳароратни ва бошқа параметрларни диагностикалашда қўлланиладиган функционал характеристикалари яхшилانган нанокластерли яримўтказгичли материаллар асосида ҳарорат датчикларини ишлаб чиқариш ҳисобланади.

Турли атомлар нанокластери ҳосил қилинган кремний асосли термо резисторлар актив соҳасининг электрофизик параметрлари билан уларнинг эксплуатацион параметрлари орасидаги ўзаро боғлиқлигини тадқиқ қилиш, термо датчикларнинг олдин маълум бўлмаган имкониятларини очиқ берувчи янги техник ечимлар топиш имконини беради. Термодатчикнинг актив соҳасини мукамаллаштириш, сезгирлигини сақлаш, параметрлари фаркланишини камайтириш муаммоларини ечиш, ҳамда нанокластерли материаллардан фойдаланиб ҳар хил шароитларда ҳароратни ўлчайдиган яримўтказгичли янги авлод асбобларини тайёрлаш технологиясига мослаштириш муҳим аҳамият касб этди.

Нанокластерли материаллар асосида олинган яримўтказгичли асбоблар жумласига кирувчи терморезисторларни саноат объекти параметрларини назорат қилиш системаларида ва қурилмаларида татбиқ қилиш уларнинг сезгирлигини ошириш ва уланиш схемаларини тадқиқ қилишни талаб қилади. Шунинг учун терморезисторларнинг конструктив параметрларини оптималлаштириш мақсадида нанокластерли материаллар параметрларини терморезисторнинг хусусиятига таъсири ҳамда турли нано қиришмаларнинг диффузион жараёнларини ўрганиш жуда муҳим ҳисобланади.

Ушбу тадқиқот нанокластерларни паст температурали диффузия усулини яратишга ҳамда база материалини танлашга ва адгезияли контакт олиш йўллариини ишлаб чиқишга, шунингдек, нанокластерли материаллар асосида термодатчиклар тайёрлашга йўналтирилган. Бундай термодатчикларнинг функционал характеристикаларини яхшилаш, уларни тайёрлашнинг арзон технологиясини таклиф қилиш ва бу технологиянинг техник маршрутини яратиш муҳим илмий-амалий аҳамият касб этади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2010 йил 15 декабрдаги ПҚ-1442 – сон «2011–2015 йилларда Ўзбекистон Республикаси саноатини ривожлантиришнинг устувор йўналишлари тўғрисида»ги Қарори ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

**Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари равожланишининг асосий устувор йўналишларига боғлиқлиги.** Диссертация тадқиқоти республика фан ва технологияларни ривожлантиришнинг амалий тадқиқот дастури III «Энергетика, энергоресурстежамкорлиги, транспорт, машина ва

асбобсозлик, замонавий электроника, микроэлектроника, фотоника ва электрон асбобсозлиги ривожланиши»нинг устувор йўналишларига мувофиқ ба- жарилган.

**Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий-тадқиқотлар шарҳи**<sup>1</sup>. Термодатчиклар бўйича илмий ва амалий тадқиқотлар етакчи илмий марказлар ва университетлар томонидан, жумладан, америкалик олимлар Ф. Мейзда, ва А.А. Volinsky ҳамда хитой тадқиқотчилари М. Shao ва N. Zhano, томонидан олиб борилмоқда. Ҳарорат ўлчаш қурилмаларида микро- процессорларни қўллаш бўйича олимлар В.В. Сахин, А.А. Шехурдин томонидан олиб борилаётган изланишлар диққатга сазовор, ҳарорат датчиклари ишлабчиқиш устида изланишлар Hewlett-Packard (Англия), Analog Devices (АҚШ) ва Oméga (Германия) каби таниқли фирмаларда ҳамда дунёнинг бошқа мам-лакатларида олиб борилмоқда.

Жаҳон миқёсида янги яримўтказгичли материаллар асосида сезгирлиги юқори бўлган ҳароратни ўлчовчи асбоблар олиш соҳасида қатор, жумладан, қуйидаги илмий ва амалий натижалар олинган: қаршилиқ ҳарорат коэффи- циенти мусбат бўлган кремний асосидаги сезгир элементлар Volvo, Siemens (Германия), Philips (Нидерландия), ITT Components Group (Буюкбритания) фирмаларида ишлаб чиқилган; турли мақсадларга мўлжалланган датчиклар ишлаб чиқиш технологиялари ривожлантирилган (Rodan Industries Inc, Texas Instruments, АҚШ).

Бугунги кунда сезгирлиги талаб даражасида бўлган, нисбатан олиш технологияси арзон, интеграл датчиклар ўрнини босувчи, оммабоп техноло- гик жараёнларни бошқаришга мўлжалланган ва параметрлари оптималлаш- тирилган кремний асосидаги ҳароратни ўлчовчи ўзгартгичлар ишлаб чиқиш ҳамда уларнинг функционал хусусиятларини кенгайтириш масалалари бўйи- ча назарий ва амалий натижалар олинган.

**Муаммонинг ўрганилганлик даражаси.** Бугунги кунга қадар ҳаро- ратга сезгир элементлар назарияси ривожланишига ва амалиётига қатор олимлар, жумладан: В.С. Громов, Н.П. Удалов, А.И. Кривоносов, Ю.В. Зай- цев, И.Л. Ротберт, И.Т. Шефтель ва Г. Виглеблар сезиларли хисса қўшдилар. Улар датчиклар бозорини ҳар хил ҳарорат ўлчагичлари, турли диапазонли ўлчовчи-ўзгартгичлар билан бойитишди. Аммо яримўтказгичли ҳарорат дат- чикларига тор температура диапазони хос бўлиб экстремал ҳолатда ишлаш имконияти чекланган. Шу туфайли янги авлод ҳарорат датчикларини ва бирламчи ўзгартгичларни ишлаб чиқиш зарурати ҳароратни кенг ораликда

---

<sup>1</sup> Диссертациянинг мавзуси бўйича халқаро илмий-тадқиқотлар шарҳи Мейзда Ф. / Электронные измерительные приборы и методы измерений: Пер. с англ. - М.: Мир, 1990. – С.250-335. Alex A. Volinsky and Lev Ginzbursky. // Irradiated cubic single crystal SiC as a high temperature sensor. 2003 Materials Research Society Fall Meeting. С. 273-278. Zhano N, Fu HW, Shao M, Li HD, Liu YG, Qiao XG. Research on high sensitivity temperature sensor based on Mach-Zehnder interferometer with waist-enlarged fiber bitapers. // Guang Pu Xue Yu Guang Pu Fen Xi, 2014 Jun;34(6):1722-6. Сахин В.В., Шалимов В.П. Теплопередача // БГТУ, СПб. 2003. С. 120-135. Шехурдин А.А. Использование оптоэлектронных систем с кварцевыми монолитными световодами в АСУ ТП промышленных печей // Автоматизация в промышленности. 2007. №4. С.23-24 ва бошқа манбалар асосида бажарилган.

регистрация қилувчи автоматлаштирилган ўлчов асбоблари ва уларга қўйилган талабларни аниқлайди.

Ҳозирги пайтда сонли чиқишли датчиклар талаб қилувчи электрон коммуникациялар жиҳозлари ва сонли техника ривожланишига катта эътибор ажратилмоқда. Таниқли олимлар Э.И. Цветков ва А.М. Мелик-Шахназаровлар ҳарорат ўлчаш қурилмаларида микропроцессорларни қўллаш масалаларини илгари суришди. Маълум бўлган аналогларга нисбатан ўта сезгир пассив ҳарорат датчикларида ишлатилувчи сиртки акустик тўлқинлар асосида датчиклар яратишнинг янги принциплари Ю.В. Гуляев томонидан таклиф қилинган.

Бу борада шуни таъкидлаш керакки, ҳарорат датчиклари параметрларини оптималлаштириш улар тайёрланадиган материалга ва ишлов бериладиган технологияга боғлиқ. Кремний асосидаги датчиклар олишда ишлатилиб келинаётган оммабоп диффузия методлари имкониятлари ўз ниҳоясига етказилган бўлиб, ярим ўтказгичли матрицада нанокластерлар шакллантиришнинг янги технологиясини яратиш истиқболлидир. Бу йўналишда Ўзбекистон олимлари, жумладан, М.К. Бахадирханов мактаби кремнийга ўтиш металлларини диффузия қилишнинг янги усулини яратиб, нанокластерли материалларни ҳосил қилиш технологиясини мукамаллаштиришга ўз ҳиссасини қўшди, қайсики сезгирлиги ва ишлаш температурси (120 °С дан) юқори бўлган ҳароратли датчиклар олиш технологиясини яратиш учун асос бўла олади. М.С. Юнусов мактабида эса бир қатор олимлар кремнийни терморрадиацион лигерлаш технологиясини яратиб, яримўтказгичлар радиацион физикаси йўналишини очишга асос солишди, Б.Э. Эгамбердиев группаси томонидан ҳарорат датчиклари асосида кўп каналли ўлчовчи ўзгартгичлар барпо қилишнинг принциплари ривожлантирилган.

Юқорида келтирилганлардан келиб чиқадики, кремний асосида нанокластерли структуралар олишнинг физик-технологик аспектларини ишлаб чиқиш, кремний матрицасига киришмалар киритишни таъминловчи диффузион жараёнларни бошқарилишини мукамаллаштириш ва ҳарорат датчиклари конструкциясини интеграл танлашга қаратилган ҳамда улар параметрларини технологик жараёнлар билан биргаликда оптималлаштириш, шу билан бирга улар параметрининг стабиллигини таъминлаш йўналишида тадқиқотларни амалга ошириш долзарб, илмий-амалий аҳамиятга эга ҳисобланади.

**Диссертация мавзусининг диссертация бажарилаётган олий таълим муассасасининг илмий тадқиқот ишлари билан боғлиқлиги.** Диссертация тадқиқоти Тошкент давлат техника университетининг илмий-тадқиқот ишлари режасининг П-10.19 «Принципиал янги синф физик катталиклар (ҳарорат, магнит майдони, босим, ИҚ нурланиш, намлик, радиация) датчикларини яратиш ва ишлаб чиқиш» (2002 – 2012), ИД6-022 «Қишлоқ хўжалиги маҳсулотларининг ҳароратини дистанцион назорат қилиш учун кўп каналли асбоб ишлаб чиқиш» (2008-2010йй.) мавзусидаги лойиҳалар доирасида бажарилган.

**Тадқиқотнинг мақсади** никел нанокластерили юқори сезгир ҳарорат датчиклари олишнинг диффузион технологиясини мукаммаллаштириш ва улар асосида объектлардаги ҳарорат билан боғлиқ жараёнларни бошқарувчи асбоблар комплекси ва параметрлари стабил ҳамда ҳар хил ташқи таъсирларга чидамли системаларни ишлаб чиқишдан иборат.

**Тадқиқот вазифалари:**

кремнийда никел атоми нанокластерларининг тартибли жойлашувини таъминлайдиган диффузион технологияни ишлаб чиқиш;

кремнийли структураларга омик контактлар учун ўта лигерланган соҳалар олиш технологиясини жорий қилиш;

нанокластерли компенсирланган кремний асосида термодатчиклар тайёрлаш технологик маршрутини ишлаб чиқиш;

никел билан лигерланган кремний асосли термодатчиклар ишчи характеристикаларига гамма радиациясининг таъсирини ўрганиш;

ўлчовчи ўзгартгичларнинг рақобатбардош қурилмасини термодатчик геометрияси хусусияти ва уланиш схемасини ҳисобга олган ҳолда танлаш;

ҳарорат ўлчагич қурилмасининг хатолигини баҳолаш ва уни компенсация қилиш.

**Тадқиқотнинг объекти** диффузион технология асосида тайёрланган нанокластерли илк бор олинган кремнийли  $n^+ - n - n^+$ -структуралар ва улар асосидаги ўлчовчи ўзгартгичлардан иборат.

**Тадқиқотнинг предмети** кремнийни никел билан диффузион лигерлаш технологик жараёнлари, ҳарорат датчиги асосида ўлчагич ўзгартгичи системасининг эксплуатацион параметрларини идентификациялаш модели, яримўтказгич юзасига адгезияси яхшиланган омик контакт олиш технологиясидан иборат.

**Тадқиқотнинг усуллари.** Тадқиқот жараёнида экспериментал физиканинг комплексли информатив усуллари: вольтампер, тўрт зондли усул ва Холл эффекти, растрли электрон микроскопия, электрон микрозондли микроанализ усули, суст ва тез электронларнинг дифракция методи, ўлчагич ўзгартгичлар хатолар назарияси усуллари қўлланилган.

**Тадқиқотнинг илмий янгилиги** қуйидагилардан иборат:

кремний ҳажмида никел атомлари нанокластерларини ҳосил бўлишини таъминловчи уч босқичли, яъни ҳар бир босқичда ҳарорат (300÷600; 600÷900; 900÷1250 °С) маълум тезликда (5 град/мин) оширилиб, маълум дақиқада (10 минут) ўзгармас ҳолда сақланиб, кейин 100 град/сек тезликда пасайтирилишидан иборат никелни кремнийга диффузия қилиш усули ишлаб чиқилган;

никел билан легирланган кремнийли структураларга омик контактлар олиш учун никел метали кимёвий усулда ҳажмига никел диффузия қилинган кремний юзасига ўтказилиб 10 минут давомида 650 градусда термик ишлов беришдан иборат юқори легирланган қатлам олиш технологияси яратилган;

илк бор никел нанокластерлари киритилган кремний асосида сезгирлиги юқори (7800 К) бўлган ва чиқиш характеристикалари стабиллашган ҳарорат датчиги тайёрланган ҳамда уни тайёрлаш технологиясининг маршрути

амалга оширилган;

операцион кучайтиргич ёрдамида корректорловчи тескари боғланиш киритиш эвазига термодатчикнинг ўтиш жараёнларини бир даражага камайтириш мумкинлиги тажрибада кўрсатилган;

никел билан лигерланган кремнийли ҳарорат датчикларининг ток ташувчилар концентрацияси  $10^{16}$  см<sup>-3</sup> дан юқори бўлганда  $10^6$  рентген дозали гамма радиацияси таъсирида уларнинг солиштирма қаршилиги сезилмас даражада ўзгариши, яъни радиацияга чидамлилиги, ток ташувчилар концентрацияси  $10^{14}$  см<sup>-3</sup> дан кичик бўлганда эса  $(5\div 10)\cdot 10^6$  рентген доза таъсирида ўтказувчанлик типининг ўзгариши. ( $n\rightarrow p$ ) тажрибада аниқланган;

талаб қилинаётган параметрларга қараб (сезгирлиги, нархи, аниқлиги ва ҳ.к.) компьютер йўли билан моделлаштириш асосида датчикнинг шаклини, контакт чиқишларини, ҳимоялаш қатламини ва ўлчовчи схема параметрларини танлаш имконини берувчи ҳарорат датчиги асосида ўлчагич ўзгартгични оптимал структуравий параметрик лойиҳалаш усули таклиф қилинган;

ҳарорат датчикларининг статистик характеристикаларининг ночизиқлиги ва иссиқлик инерционлиги билан характерланувчи хатоликларни, керакли чегаравий ҳарорат интервалини танлаш йўли билан камайтириш мумкинлиги аниқланган.

**Тадқиқотнинг амалий натижаси** қуйидагилардан иборат:

кремний ҳажмида турғун нанокластерлар ҳосил бўлишини таъминловчи ҳарорат ўсиб бориш режимида никелни этапли диффузия қилиш усули ишлаб чиқилган, улар асосида минус 100 дан 180 градус Цельсийгача интервалда ҳароратни ўлчаш учун термосезгир элементлар тайёрлаш технологияси ишлаб чиқилган;

ҳар хил объектларнинг ҳароратини узоқдан ўлчашни таъминловчи микропроцессорли ўлчагич схемалар тайёрлашнинг техник ечимлари таклиф қилинган.

**Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги** физик жараёнларни тадқиқ қилишда умумқабул қилинган илмий ва технологик услублар, яримўтказгичли асбобларнинг характеристикаларини ва параметрларини текширишда стандарт ва кенг қўлланиладиган тадқиқот усулларида фойдаланилганлиги билан тасдиқланган. Натижа ва хулосалар замонавий назарий ва экспериментал маълумотларга, яримўтказгичлар ва улар асосидаги материалларнинг физикавий тасавурларга асосланган экспериментал маълумотларнинг ишончлилиги синондан ўтган комплекс ўлчаш услубларидан ва маълумотларга назарий ишлов беришда фойдаланилганлик билан таъминланган.

**Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.**

Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти шундаки, диффузион лигерлаш йўли билан кремнийда никел атоми нанокластерларини ҳосил қилиш ва уларни кремнийнинг электрофизик хусусиятларига таъсирини ҳар томонлама ўрганиш компенсирланган материалларнинг хоссаси ва структураси тўғрисидаги тушунчани кенгайтиришга имкон беради.

Тадқиқотнинг амалий аҳамияти шундан иборатки, мукамаллашти-

рилган диффузия технологияси яримўтказгичли материалларнинг мақсадли модификация қилишга ва улар асосида ҳар хил объектлар параметрларини назорат қилиш системаларида ва асбобларида қўллашга мўлжалланган термосезгир датчиклар олиш имконини беради.

#### **Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши.**

Кенг ишчи диапазонига эга бўлган ( $-40\div 180$  °C) термосезгир датчик учун «Термодатчик» Ўзбекистон Республикаси Мулк агентлигининг ихтирога патенти олинган (UZ IAP 04778 29.11.2013й.). Ишлаб чиқилган термодатчик саноат асбоблари, илмий объектлар ва турли хўжалик қурилмалари ҳамда субъектларнинг ҳароратини назорат қилиш имкониятини яратади;

параметрлари стабил ҳамда ҳар хил ташқи таъсирларга чидамли термосезгир датчиклар партияси «FOTON» Очиқ акциядорлик жамиятида ишлаб чиқилган ва улар асосида яратилган ҳароратни ўлчовчи қурилмалар Қашқадарё вилоятининг пахта тозалаш пунктларида пахта чигитининг униб чиқиш қобилятини талаб даражасида сақлаб қолиш учун ишлатилган («FOTON» акциядорлик жамиятининг 2016 йил 30 июндаги маълумотномаси). Ишланмани жорий қилиш термодатчикларнинг параметрлари ва барқарорлигини ташқи таъсирларга чидамлилигини таъминлаган;

ҳароратни ўлчовчи беш каналли микропроцессорли термосезгир қурилмалар дон сақловчи иншоотларда (элеватор) буғдой маҳсулотлари ҳароратини кузатиш учун ишлатилган («Галла-Алтек» очиқ акциядорлик жамиятининг 2016 йил 04 июлдаги маълумотномаси). Ишланмани жорий қилиш дон маҳсулотлари сақлашнинг стабил шароитларини таъминлаш эвазига уларнинг сифатини сақлаб қолиш ва исроф бўлишининг олди олинган.

**Тадқиқот натижаларининг апробацияси.** Илмий натижалар республика ва халқаро конференцияларда маъруза ва муҳокама қилинган: жумладан «8-th international Conference Solid state physics» (Almaty, 2004); «Геотехнология: инновационные методы недропользования в XXI веке» (Москва-Навои, 2007); «Рост, свойства и применение кристаллов» (Андижан, 2008); «Интеграция образования, науки и производства» (Москва, 2008); «Казахстан в новом мире и проблемы Национального образования» (Чимкент, 2008); «Наука и производство» (Жетысай, 2009); «Кремний-2010» (Нижний Новгород, 2010); «Фундаментальные и прикладные вопросы физики» (Ташкент, 2010); «Ўзбекистоннинг инновацион тараққиёти-ёшлар нигоҳида» (Ташкент, 2010); «Фотоэлектрические и теплофизические основы преобразования солнечной энергии» (Фергана, 2011); «Оптическая и фотоэлектрическая явления в полупроводниковых микро и наноструктурах» (Фергана, 2011); «Нанотехнология ва қайта тикланадиган энергия манбалари: муаммолар ва ечимлар» (Қарши, 2012).

Диссертация ишининг асосий натижалари Тошкент давлат техника университетининг яримўтказгичлар йўналиши бўйича умумий илмий семинарда (28 май 2016) ҳамда Физика-техника институти ва Самарқанд давлат

университети ҳузуридаги 16.07.2013.ФМ/Т.12.01 рақамли Илмий кенгаш асосида 01.04.10 ихтисослиги бўйича (техника фанлари) тузилган бир марталик илмий кенгаш қошидаги илмий семинарда ( 10 июн 2016й) муҳокама қилинган.

**Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши.** Диссертация мавзуси бўйича жами 28 та илмий иш чоп этилган, жумладан, 1 та китоб, 14 та илмий мақола, шундан 4 та нуфузли халқаро журналларда ҳамда 12 та тезис халқаро ва республика конференциялар тўпламларида нашр этилган, ихтиро учун 1 та патент олинган.

**Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши.** Диссертация кириш, бешта боб, хулоса, ва 112 номдаги фойдаланилган адабиётлар рўйхати, 2 та илова, 200 саҳифа матн, 76 та расм ва 26 та жадвалдан иборат.

## ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

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

Диссертациянинг биринчи боби **«Муаммонинг ҳолати ва яримўтказгичли нанокиришмали структуралар ишлаб чиқиш технологиясини яхшилаш тенденциялари»**га бағишланган бўлиб, муаммонинг ҳолати ва термосезгир датчикларни тадқиқ қилиш ва уларнинг функционал характеристикаларини яхшилаш тенденциялари бўйича адабиётлар маълумотининг шарҳи келтирилган ҳамда термосезгир датчикларнинг база материални ва киришмани танлаш, нанокластерли материалларнинг физик-химик хусусиятлари кўриб чиқилган. Мавжуд маълумотларнинг назарий ва экспериментал таҳлили натижасида вазифаларнинг қўйилиши шакллантирилган.

Диссертациянинг иккинчи боби **«Никел атомлари билан легирлаш усулини ишлаб чиқиш»** деб номланиб, никел термодиффузияси усули билан легирланган кремнийни олишнинг технологик этаплари, кремний ҳажмида нанокластерлар тартиблашиши жараёнлари келтирилган.

Маълумки<sup>1</sup> диффузия жараёнини тез совутиш билан мувофиқлаштириб кремнийда никель нанокластерлари олиш мумкин. Бунда диффузия температурасини 750 дан 1050 градус Цельсийгача ўзгартириб ҳамда совутиш тезлигини тенлаб нанокластерлар ўлчамини 10 дан 900 нанометргача бошқариш мумкин. Шунга асосон бизлар кремнийда нанокластерларнинг шаклланишига ҳарорат диапазони ва совутиш тезлигини таъсирини ўргандик.

Кремнийга ўтиш группаси металлларини диффузия қилиш жараёнларини ўрганиш натижасида ҳар ҳил  $10 \div 10^4$  град/сек тезликда совутишда элек-трик актив атомлар концентрацияси амалда совутиш тезлигига боғлиқ эмаслиги аниқланган.

Кремний ҳажмида унинг термик сезгирлигини оширувчи нанокластерлар олиш учун никелни кремнийга диффузия қилиш жараёнини диффузия печида ҳарорат  $5 \div 7$  °C/мин тезик билан ошиқ бориши режимида  $700 \div 1250$  °C ҳарорат интервалида амалга оширилди. Кремнийни қиздиришни бошлангич температурадан амалга ошириш барқарор бўлмаган марказларни термик товланиши учун шароит ҳосил қилади. Диффузия ҳарорати ампула ёнида жойлаштирилган платина-платинародийли термопара орқали назорат қилинди. Кўтарилиб борувчи қиздириш 110 минут давомида олиб борилди, кейин эса

---

<sup>1</sup> F. Riedel, W. Schöter. Electrical and structural properties of nanoscale NiSi<sub>2</sub> precipitates in silicon // Phys. Rev. B., 2000. – Vol. 62. – № 11– pp. 7150-7156.

максимал ҳароратга етишгандан сўнг 10 минут ушлаб турилди, сўнгра намуна жойлашган ампула совутиш мақсадида кескин равишда сувга ташланди, бу эса юқори тезликда  $V=100 \div 300$  °C/сек совутишни ва нанокластерларнинг кремний ҳажмида бир текисда жойлашишини таъминлашга омил бўлди.

Ҳажмига никел диффузия қилинган кремний юзасига, яхшиланган адгезияли омик контакт олиш учун, химик усул билан никел металининг юпқа қатлами (3 мкм) ўтказилди ва 650 градус Цельсийда 10 минут давомида термик тобланди.

Ишлаб чиқилган ҳарорат датчиклари параметрларини маълум бўлган аналоглари билан солиштириш шуни кўрсатдики, улар қаршилигининг ҳароратга боғлиқлиги мусбат ва манфий ҳароратларда аналогларга нисбатан бир қонуниятга бўйсинади, ҳарорат коэффиценти эса юқори қийматларга эга (1 жадвал).

### 1 жадвал

Никел нанокластерлари кремний асосидаги ҳарорат датчикларининг ( $1 \times 1 \times 0,5$  мм<sup>3</sup>) параметрлари

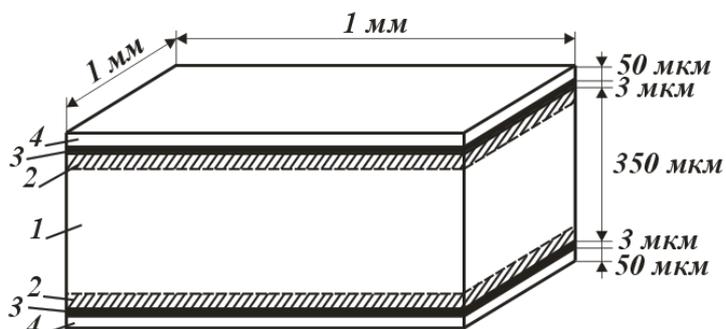
№	$\rho$ , Ом·см	V, К	T, °C
1	$3 \cdot 10^2$	4600	-60÷120
2	$3 \cdot 10^3$	6250	-60÷130
3	$2 \cdot 10^4$	7000	-70÷140
4	$10^5$	7200	-80÷150
5	$6 \cdot 10^5$	7300	-100÷160
КМТ-1	$22 \cdot 10^3 \div 1 \cdot 10^6$	3600÷7200	-60÷180
ММТ-1	$1 \cdot 10^3 \div 220 \cdot 10^3$	2030÷4300	-60÷125
ММТ-6	$10 \cdot 10^3 \div 100 \cdot 10^3$	2060÷4300	-60÷125

Илк бор  $n^+ - n - n^+$ -структурали кремний асосидаги ҳарорат датчигини ишлаб чиқиш технологияси ўз ичига ҳарорат ўсиб бориши режимида солиштирма қаршили 40÷60 Ом·см бўлган  $n$ -типли кремний кристаллига никелни диффузия қилиш жараёнини, кимъевий йўл билан никел ўтказилган юзадан диффузия усули билан юқори лигерланган ўтказувчанлиги  $n^+$ -типли соҳани шакллантириш ва 50 микронли қалай қатламини ўтказиш, ҳамда кремний кристалларини 1 мм<sup>2</sup> дискрет элементларга кесиш ва ток ташувчи симли чиқишларни ковшарлашларни олади.

Аналогдан фарқли равишда вакуумда термик тоблаш билан кремний юзасига омик контактнинг адгезиясини яхшилаш, ҳарорат датчигининг иккала йўналишда параметрлари фарқланишини олдини олиб, ток характеристикаларининг чизиклилигини таъминлайди.

Диссертациянинг «**Никел билан легирланган кремний асосида ҳарорат датчигини ишлаб чиқиш**» деб номланган учинчи бобида  $n^+ - i - n^+$ -структурали ҳарорат датчикларининг база параметрларини танлаш асосланган, уларга омик контактлар олиш жараёнлари, герметизациялаш, тайёрлаш технологик маршрути, статистик ва динамик характеристикалари, ҳамда барқарорлиги келтирилган.

Ҳарорат датчиги, монокристал кремний асосида ҳароратга сезгир  $i$ -соҳа ва электрик контактлар билан таъминланган бўлиб,  $i$ -соҳа иккита юқори лигерланган  $n^+$ -соҳалар орасида жойлашган, бунда  $n^+$ -соҳанинг ташқи қисми никелланган ва омик контакт ҳосил қилади, никелланган ва электр чиқиш симлари орасига қалай қатлами ўтказилган.



1 –  $i$ -Si; 2 –  $n^+$ -Si; 3 – Ni; 4 – Sn

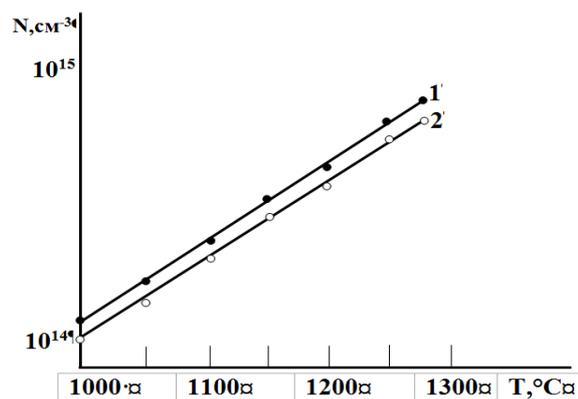
**Расм. 1. Таклиф қилинган ҳарорат датчигининг структураси**

Таклиф қилинаётган ҳарорат датчигининг структураси 1-расмда келтирилган, унинг база соҳаси юқориомлик 350 микронли кремнийдан иборат. Унинг иккала юзасига қалинлиги 2 микрон бўлган юқори лигерланган  $n^+$ -типли соҳалар шакллантирилган. Уларнинг устидан эса кимёвий усул билан 3 мик-

ронли никел ўтказилган. Чиқиш симларини улаш осон бўлиши учун никел қатламининг устидан 50 микронли қалай ўтказилган.

Ҳарорат датчигининг база соҳаси материали сифатида солиштирма қаршилиги  $\rho=10\div 100$  Ом·см бўлган  $n$ -тип ўтказувчанлик монокристал кремнийни танланганлиги унга киритилаётган никелнинг электроактив атомлари концентрациясини ва ҳарорат ишчи диапазонини бошқариш имкониятидан келиб чиқади (расм 2). Никелни кремнийга диффузия қилиш жараёни ҳарорат ошиб бориши режимида амалга оширилиб, ҳароратнинг охириги қиймати оддий технологиянинг диффузия ҳароратига мос келади.

Яъни оддий технологияда ампулага жойлаштирилган контрол намуна диффузия жараёни ҳароратига мўлжалланган қийматига чиққанда печга киритилади, диффузия вақти эса 2 соат давом эттирилади. Уларда никелнинг электроактив концентрацияси ҳарорат ошиши режимидагига намунага (2 - чизик) нисбатан тахминан 7÷10 % кам (1 - чизик) чиқади. Никелни ҳарорат ошиб борувчи режимда диффузия қилишнинг афзаллиги шундаки ток ташувчиларнинг керакли концентрациясини олиш учун икки баробар кам вақт сарфланади.



1- диффузиянинг ўсиб борувчи режими  
2- берилган ҳароратда диффузия

**Расм. 2. Электроактивной концентрациянинг термик ишлов бериш ҳароратига боғлиқлиги**

Ҳисоблар бўйича диффузия коэффиценти  $D_{Ni}=2,3 \cdot 10^{-3} \exp(-0,47/kT)$  см<sup>2</sup>/сга тенг бўлганда ва ҳарорат  $T=(600\div 900)$  °С атрофида бўлса, никел кон-

центрацияси  $N_{Ni}=1,4 \cdot 10^{25} \exp(-2,3/kT)$  см<sup>-3</sup>га тенг, яъни никелнинг эрувчанлиги  $N_{Ni} \sim 10^{14}$  см<sup>-3</sup>га, диффузия коэффициенти  $D=(10^{-4} \div 10^{-7})$  см<sup>2</sup>/с га тенг бўлиши керак. У ҳолатда қалинлиги 1 мм бўлган намунани бир текисда лигерлаш учун  $t=l^2/D=(0/1)^2/10^{-7}=1000$  сек ( $t=7$  соат) вақт керак бўлар эди, бизнинг ҳолатда эса диффузиянинг ҳамма технологик жараёни 3 соатни ташкил этади. Бунда никел атомларининг ҳажмдаги концентрацияси  $N_{Ni} \sim 10^{14}$  см<sup>-3</sup>га тенг бўлади, яъни кутилганидан кўп.

Хулоса қилинганки, ҳарорат ошиши режимидаги диффузияда никелнинг диффузияси узеллараро содир бўлади, киришма атомлари эса узеллараро жойлашади, чунки вакансиялар концентрацияси  $10^7$  см<sup>-3</sup>га тенг бўлиб, узеллараро жойлашган никел атомларининг концентрациясидан  $10^7 \div 10^8$  даражага кам.

Ҳарорат датчигининг ўлчаш параметларига ёруғликнинг, намлик ва ҳаво оқимининг оний сакрашлари каби ташқи факторлар таъсирини бартараф қилиш учун ҳарорат датчикларига герметик сифатида қуйилувчи компаундлар ишлатилди. Ҳарорат датчиги билан компаунднинг чизиқли кенгайиш коэффициенти фарқи таъсирини йўқотиш учун компаундга тўйинтиргич сифатида сурик-қўрғошинлик бўёқ киритилган. Тўйинтиргич компаунди асоси қилиб малеинли ангидрид смоласи ЭД-20 ва қотиргич сифатида триэтанолламин олинган. Малеинли ангидрид ва триэтанолламиннинг танланиши шу билан асосланганки, малеинли ангидрид узоқ ишлатилувчи ва бошлангич ёпишқоқлиги кам компаунд олишга имкон беради.

Триэтанолламин технологик сифати унча яхши бўлмаса ҳам захарилиги кам бўлгани учун танланган. Эпоксидли қуйилувчи Д-2 компаундининг рецепти 2 жадвалда келтирилган. Катта механик кучланишларнинг олдини олиш нуктаи назаридан полимеризациялаш жараёнида компаунднинг ўтириши катта аҳамиятга эга.

## 2-жадвал

Д-2 эпоксидли қуйилувчи компаундининг рецепти

Компаунд	Шартли бнлгилар	таркиб, оғирлик қисмларда					
		Смола		Қотирувчи		Тўйинтаргич	
		НОМИ	СОНИ	НОМИ	СОНИ	НОМИ	СОНИ
Қуйилувчи	Д-2	ЭД-20	100	ма	2,28К	СС	1,5÷1,8г

Шунинг учун полимеризация жараёнида  $T=80^\circ\text{C}$  ҳароратда 4 соат давомида,  $T=120^\circ\text{C}$  да 12 соат давомида,  $T=140^\circ\text{C}$  да 24 соат давомида ҳар хил ҳароратда экзотермик қиздириш амалга оширилган. Натижада танланган эпоксид смоланинг қотиш жараёнида механик кучлинишлар содир бўлишини минималлаштиришга муваффақ бўлинди.

Керакли участкаларнинг номлари ва технологик жараёнлар кетма-кетлигининг структурали таърифи ҳамда ҳарорат датчикларининг ишлаб чиқиш жиҳозлари компенсирланган кремний асосида ҳарорат датчиги тайёрлаш технологик маршрути сифатида расмийлаштирилган. Корректирловчи параллель ва кетма-кет уланган резисторлар ёрдамида ўлчагич параметрларини оптимизациялаш имкониятлари тажрибада олинган ва шу параметрлар билан оптималлаштирилган схемадаги сезгирликнинг боғлиқлиги ўрнатилган, қайсики хатоларни камайтириб ва ўлчаш аниқлигини оширишга имкон беради.

$$K_{ga} = \frac{(R_1 - R_2)r_1^2}{(T_2 - T_1)(R_1 + r_1)(R_2 + r_1)}, \quad (1)$$

Бунда ўлчанилаётган ҳарорат назорат қилинаётган муҳитнинг шароити (газ, суюқлик ва бошқа) билан аниқланилади ва сезиларсиз оғишларга эга бўлиб (3 жадвал), стационар ҳолатда эса ҳақиқий ҳароратни беради.

### 3-жадвал

Ҳарорат датчиги параметрларининг ва характеристикаларининг номиналь қийматлардан оғиши

Факторлар	$\Delta U_{II}/U_{II}$	$\Delta K/K$	$\Delta R/R$	$\Delta \beta/\beta$
Ташқи муҳит ҳарорати	0,06	0,05	0,01	0,001
Материалнинг чарчаши	0	0	0,1	0,01
Келтирилган хатолик	0,05	0,05	0,01	0,01

Ҳарорат датчигининг барқарорлиги доимий радликларга нисбатан дестабилизациялаштирувчи факторларни ҳисобга олган ҳолда 1% дан кам хатоликда 0.966 ни ташкил қилади

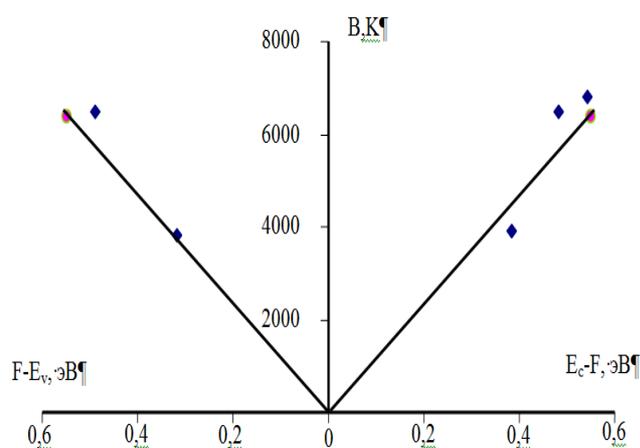
$$\Delta S_{\max} / S_{\max} = 0,45 \quad (2)$$

$$P = \Phi\left(\frac{\Delta S_{\max}}{\sigma_s}\right) - \Phi\left(-\frac{\Delta S_{\max}}{\sigma_s}\right) = \Phi\left(\frac{1}{0,45}\right) - \Phi\left(-\frac{1}{0,45}\right) = 0,966 \quad (3)$$

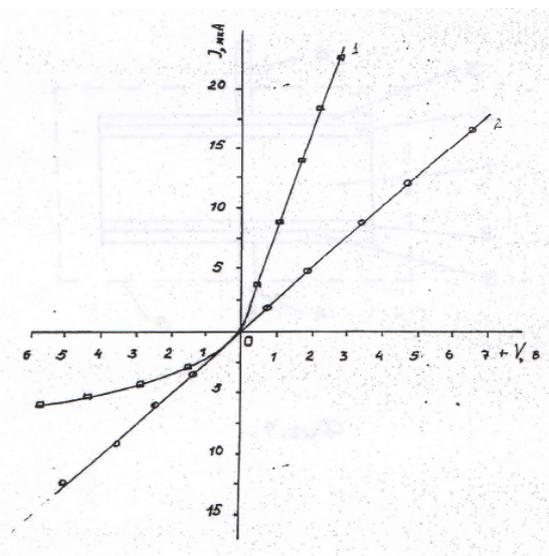
Диссертациянинг тўртинчи боби «**Ҳарорат датчикларининг характеристик параметрларини ўрганиш**» деб номланиб, ишлаб чиқилган ҳарорат датчикларининг характеристикаларини ва параметрларини тадқиқот қилиш усуллари, электрик ва асосий характеристик параметрларини ҳамда уларнинг ишчи характеристикаларига вибрация ва  $\gamma$  –нурланишининг таъсирини ўрганишга бағишланган.

Ҳарорат датчикларининг асосий характеристикалари – ҳарорат сезгирлиги коэффициенти ва қаршилиқнинг ҳарорат коэффициенти, ҳарорат ўлчаш диапазони, тезкорлиги стандарт экспериментал қурилмада ўлчанган. Ўлчашлар ишчи камерада ҳароратни сувнинг термостатдан кириш қадамини  $2 \div 3^\circ\text{C}$  минутага ошириш йўли билан ва минус ҳароратлар эса суюқ азот ёрдамида ҳосил қилиб олиб борилган. Ўлчанган ва ҳисоблаб чиқилган натижалар асосида ҳарорат датчигининг солиштирма қаршилиги орқали 10% аниқликда берилувчи Ферми сатҳи жойлашиш чуқурлигининг ҳарорат сезгирлиги коэф-

фициенти билан боғлиқлиги ўрнатилган. Яъни қанчалик Ферми сатҳи тақиқланган зонанинг ўртасига яқин бўлса ҳарорат сезгирлик коэффициенти шунчалик юқори бўлади, 3 расм.



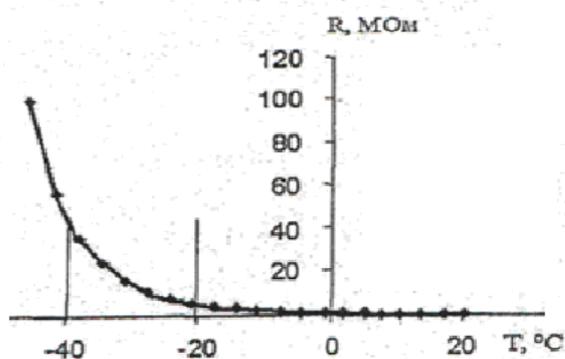
**3 - расм. Компенсирланган  $p$ - ва  $n$ -тип ўтказувчанликли кремнийда ҳарорат сезгирлиги коэффицентининг Ферми сатҳи жойлашиши чуқурлигига боғлиқлиги**



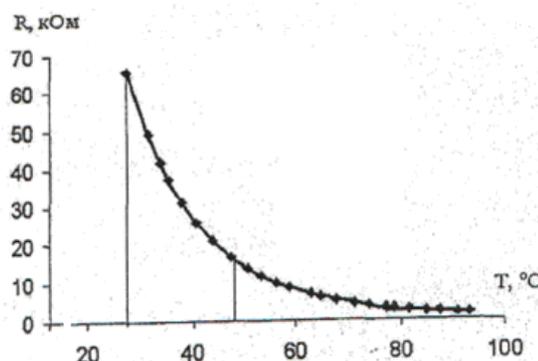
1- аниқ; 2- таклиф қилинаётган

**4 - расм. Ҳарорат датчигининг вольтампер характеристикаси**

Тажрибада кўрсатилганки, таклиф қилинган ҳарорат датчиклари аналогларга нисбатан иккала йўналишда тўғри чизикли вольтампер характеристикага эга (4 - расм), қайсики ҳароратнинг ҳамма қийматларида бир хил ҳарорат сезгирлигига эга (5 - расм).



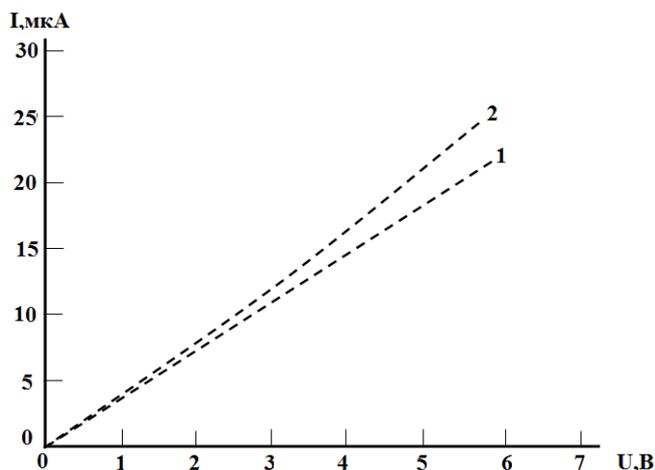
а) манфий ҳароратларда



б) мусбат ҳароратларда

**5 - расм. Никел билан легирланган ҳарорат датчиги қаршилигининг ҳарорат билан боғлиқлиги**

Ҳарорат датчикларини герметизация қилиш уларнинг вольтампер характеристикасига ёруғлик нурунинг ва атмосфера оқимининг импульсли тебранишлари таъсирини бартараф қилиб, кам кучланишларда чиқиш характеристикаларини стабиллаштиради (6-расм), база соҳаси солиштирма қаршилигининг юқори қийматлиги ўлчаш хатолигини камайтириб уловчи кабел қаршилиги таъсирини бартараф қилишга олиб келади.



**6 - расм.**  
**Солиштира қаршилиги**  
 $\rho = 10^5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  бўлган **n-Si<S>**  
**асосидаги ҳарорат**  
**датчигининг вольтампре**  
**характеристикаси (T=300 К)**

1 - герметизациясиз;  
 2 – герметизация билан

Ишлаб чиқилган ҳарорат датчикларининг ( $1 \times 1 \times 0,5 \text{ мм}^3$ ) бошқа устунлиги шундаки, уларнинг база соҳаси солиштира қаршилигининг ошиб бориши билан ҳарорат сезгирлиги ва ишчи диапазони кенгайиб боради, 4 жадвал.

**4- жадвал**

**Никел нанокластерили ҳарорат датчикларининг параметрлари**

$\rho$ , Ом·см	$3 \cdot 10^2$	$3 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^4$	$10^5$	$6 \cdot 10^5$
B, К	4600	6250	7000	7200	7300
T, °C	-60÷120	-60÷130	-70÷140	-80÷150	-100÷160

Ишлаб чиқилган яримўтказгичли ҳарорат датчикларининг асосий характеристикаларини бор аналогларникига (КМТ-1, ММТ-1, ММТ-6, СТ6) (5 - жадвал) солиштирув анализи натижаси шуни кўрсатдики, солиштира қаршилиги, ҳарорат диапазони, ҳарорат сезгирлиги ва вақт диомийлиги кўрсаткичлари бўйича ишлаб чиқилган ҳарорат датчиклари яхши кўрсаткичларга эга.

**5 - жадвал**

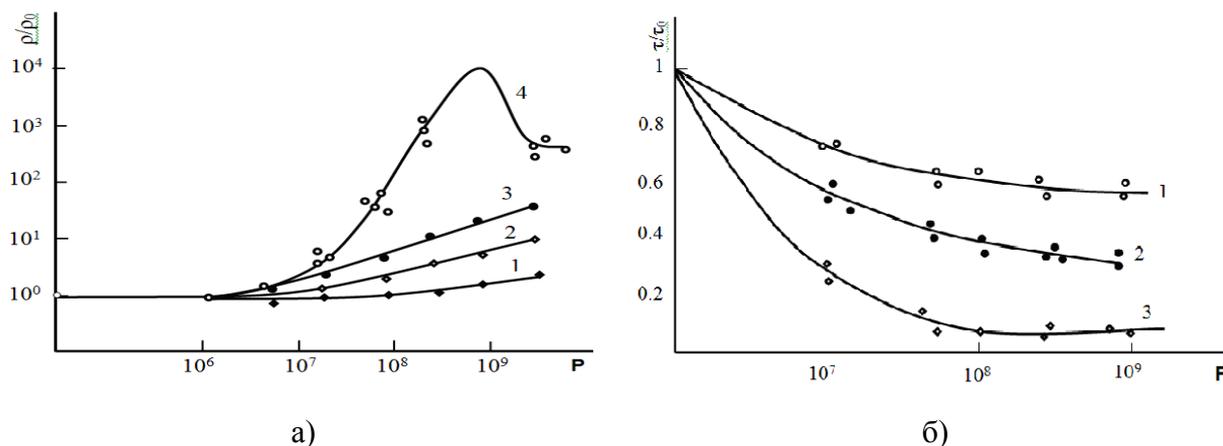
**Ишлаб чиқилган ҳарорат датчикларининг\* солиштирув ишчи характеристикалари**

Ҳарорат датчиги типи	Солиштира қаршилиги, Ом	Ўлчаш ҳарорати диапазони, °C	Ҳарорат сезгирлиги, В	Вақт доимийлиги, лиги, сек
Si<P,Ni>	$3 \cdot 10^2 \div 1 \cdot 10^6$	-80÷150	4600÷7200	5
КМТ-1	$22 \cdot 10^3 \div 1 \cdot 10^6$	-60÷180	3600÷7200	85
ММТ-1	$1 \cdot 10^3 \div 220 \cdot 10^3$	-60÷125	2030÷4300	85
ММТ-6	$10 \cdot 10^3 \div 100 \cdot 10^3$	-60÷125	2060÷4300	35
СТ3-6	$6,8 \cdot 10^3 \div 8,2 \cdot 10^3$	-90÷125	1200÷2400	35
p-i-n диод	$1,2 \cdot 10^3 \div 6 \cdot 10^3$	-60÷150	$2.3 \text{ мВ} \cdot \text{К}^{-1}$	12

\*Агар ишлаб чиқилган ҳарорат датчиги иссиқлик ўтказувчан шароитда ишласа, масалан, суюқликда, унда вақт доимийлиги камаяди

Кремний асосидаги контрол намунадан фарқли ишлаб чиқилган ҳарорат датчикларининг солиштира қаршилиги радиация таъсири дозаси  $10^9 \text{ Р}$  гача кенг диапазондаги ташувчилар концентрациясида ( $10^{16} \div 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ) ёки со-

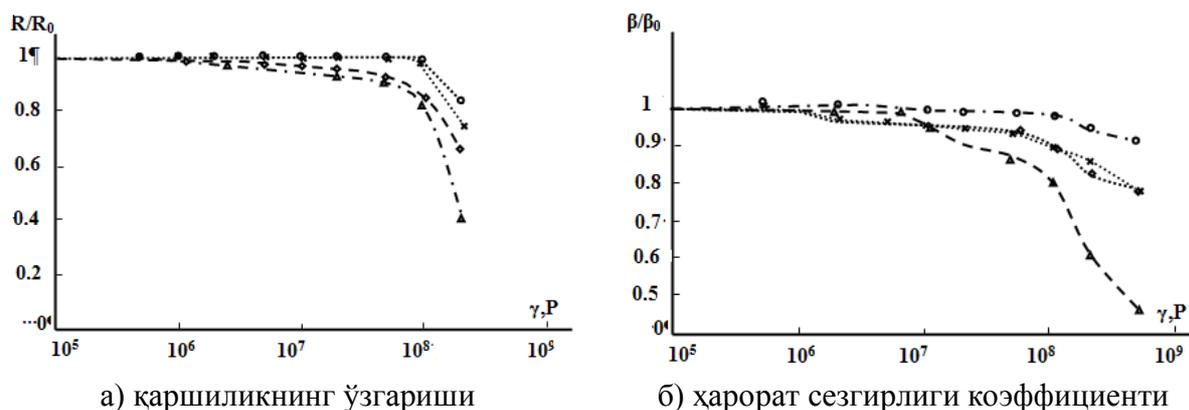
лиштирма қаршилиги  $0.1 \div 1.0$  Ом·см атрофида бўлганда озгина ўзгариб, яшаш вақти камаяди ва тезкорлиги ( $5 \div 7$  сек.) ошишига олиб келади, расм 7.



1- $N=5 \cdot 10^{17} \text{ см}^3$ ; 2- $N=10^7 \text{ см}^3$ ; 3- $N=6 \cdot 10^{16} \text{ см}^3$  никел концентрацияси  
 хар хил намуналар  $\text{Si} < \text{Ni} >$ ; 4-тажрибавий намуна

**7 - расм.  $\gamma$ -нурланиши таъсирида солиштирма қаршиликнинг (а) ва ток ташувчилар яшаш вақтининг (б) нисбатан ўзгариши**

Омик қаршилиги анча юқори ( $1 \div 5$ ) $10^5$  Ом ёки солиштирма қаршилиги  $\rho \sim 10$  Ом·смли ҳарорат датчиклари учун нурланиш дозаси  $\Phi = 10^8 P$  гача ҳарорат сезгирлиги коэффиценти ( $B$ ) ва тезкорлиги нисбатан ўзгармай, кейинчалик доза ошиши билан бу параметрларнинг ёмонлишиши кузатилаяпти. Катта дозаларда  $\Phi > 10^8 P$  ҳарорат датчикларининг параметлари ва герметизация ҳолати аста-секин ёмонлашади, ҳамда нурланиш дозаси  $\Phi \sim 10^9 P$  дан ошгандан сўнг ҳамма параметрлари  $25 \div 30\%$  га ёмонлашади (8- расм).



а) қаршиликнинг ўзгариши  
 б) ҳарорат сезгирлиги коэффиценти  
**8 – расм. Ҳарорат датчикларининг параметрларига гамма нурларининг таъсири**

Атом киришмалари концентрацияси қанчалик кам бўлса, у ҳарорат датчигининг қаршилиги шунчалик катта бўлади ва радиацияга чидамлилиги ортади. Бунда ушбу дозалар интервалида датчикларнинг барқарорлиги ва электрик контактларининг омиклиги амалда ўзгармайди. Ишлаб чиқилган ҳарорат датчикларининг асосий параметрларига ва герметизация ҳолатига радиация дозасининг таъсири 6- жадвалда келтирилган.

Никел атомлари нанокластерили кремний асосидаги ишлаб чиқилган

Si<P,Ni> асосидаги ҳарорат датчикларининг эксплуатацион параметрларига ва герметизация ҳолатига γ радиациясининг (Co<sup>60</sup>) таъсири

Нурланиш дозаси, Р												
Сезирлиги ва тикланиш вақти	10 <sup>5</sup>		10 <sup>6</sup>		10 <sup>7</sup>		5·10 <sup>7</sup>		10 <sup>8</sup>		5·10 <sup>8</sup>	
	В, К	τ, сек	В, К	τ, сек	В, К	τ, сек	В, К	τ, сек	В, К	τ, сек	В, К	τ, сек
	6800	5÷7	6800	5÷7	6750	5÷7	6700	5÷7	6650	5÷7	6600	5÷7
	7000	5÷7	7000	5÷7	6950	5÷7	6900	5÷7	6850	5÷7	6800	5÷7
	7200	5÷7	7200	5÷7	7150	5÷7	7100	5÷7	7050	5÷7	7000	5÷7
Ҳолати	ўзгариш йўқ		ўзгариш йўқ		ўзгариш йўқ		ўзгариш йўқ		бузилиш		батамом бузилиш	

ҳарорат датчиклари на фақат юқори сезгирлик ва тезкорликка эга, аммо лекин етарли радиацияга бардошлилик ва юқори радиация таъсирида ҳам ишлатилиши мумкин. Бир пайтда катта радиацион дозаларда ҳарорат сезгирлигининг ошиши оддий ва радиацион таъсирдаги ҳар хил объектларнинг ҳароратини дистанцион назорат қилишга мўлжалланган ҳарорат датчикларини яратиш имкониятини очиб беради.

Диссертациянинг бешинчи боби «**Ҳарорат датчиги асосида ҳароратни ўлчагич ўзгартгичларни ишлаб чиқиш**»га бағишланиб, ўлчагич ўзгартгичларнинг асосий параметрларини тадқиқот қилиш, уларнинг сезгирлиги критерийсини, статистик характеристикаларининг чизиқлилиги ва аниқлигини ҳисобга олган ҳолда структуравий ва параметрик лойихалаш ҳамда ўлчагич ўзгартгич асосида беш каналлик асбобни ишлаб чиқиш, ўлчагич ўзгартгичнинг хатолари манбаларини тадқиқот қилиш ва уларни компенсациялаш услубини ишлаб чиқаришга бағишланган.

Ҳарорат датчигининг қаршилиги ва сезгирлигига қараб, улар бўлувчи резисторлар билан, мост ёки икки ҳарорат датчиклари схемаси билан уланади. Бўлувчи ўлчагич схема учун чиқиш кучланиши ( $U_{чик}$ ) қуйилаги формула билан аниқланади:

$$U_{чик} = U_n \frac{R_{T1}}{R_{T1} + R_2} \quad (4)$$

Ҳарорат ўзгарганда ўлчагич ўзгартгичнинг қаршилиги ( $R_{T1}$ )  $R_{T1}\varepsilon_1$  қийматига ўзгаради ва қуйидагига тенг бўлади

$$R_{T1}(1+\varepsilon_1),$$

бу ерда  $\varepsilon = \Delta R_g / R_g$

чиқиш кучланиши эса

$$U_{вых} = U_n \frac{K}{(K+1)} - U_n \frac{\varepsilon_1}{(K+1+K\varepsilon_1)} \quad (5)$$

ифода билан аниқланади.

Бу ерда  $K=R_{T1}/R_2$  схеманинг симетриклик коэффициенти ёки соддалаштирилганда

$$U_{\text{вых}} = U_n \frac{K\varepsilon_1}{(K+1)^2} \quad (6)$$

формула ўринли.

Мост ўлчагич схемаси учун  $K=R_{T1}/R_2=R_3/R_4$  ларни ҳисобга олиб

$$U_{\text{вых}} = U_n \frac{K\varepsilon_1}{(K+1)(K+1+K\varepsilon_1)} \quad (7)$$

га эришамиз ёки мостли ўлчагич схеманинг қарама-қарши елкаларига иккита ҳарорат датчигини улаганда унинг сезгирлиги анча ошади ва чиқиш кучланиши ушбу формула орқали ҳисобланади:

$$U_{\text{вых}} = U_n \frac{K}{(K+1)^2} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \quad (8)$$

Ишлаб чиқилган яримўтказгичли ҳарорат датчиги учун юкори температуранинг чегараси, чиқиш симларини пайка қилувчи, ковшарлагичнинг (ПОС 61) эриш температураси (180°C) билан аниқланади. Ишлаб чиқилган ҳарорат датчикларининг сезгирлиги ҳамма ишчи ҳарорат диапазонида вольтампер характеристикасининг симметрик бўлганлиги учун ўзгармас ҳолда сақланади. Уларни қўллаш сезгирлигига, аниқлигига ва тезкорлигига қўйилган талаблар билан аниқланади. Бунинг учун ҳарорат датчигининг маълум шаклини, чиқиш симларининг типини, қоплагич материални ва улаш схемасини танлаш керак, бизнинг ҳолатда ҳар бири бешта позициядан иборат. Таклиф қилинаётган компоновканинг мисоли тарихида датчик кўринишининг танланиши 7-жадвалда келтирилган.

Бу элементларни маълум компоновка қилиш натижасида ўлчагич ўзгартгичнинг янги структуравий композицияси олинади. Ўлчагич ўзгартгичнинг ҳамма келтирилган вариантлари сифат критерийси бўйича: сезгирлиги, нархи, барқарорлиги, аниқлиги, чизиқлилиги, ҳарорат ўлчаш диапазони, қувват исрофи, тезкорлиги, тежамкорлиги ва оғирлиги нуқтаи назаридан мувофиқлаштирилган. Сезгирлик бўйича ўлчагич ўзгартгичнинг конструкция компоновкасининг мисоли 9а расмда келтирилган, қайсики компоновкаловчи 7 - жадвалнинг қуйидаги элементларидан иборат: 1.3– 2.1 – 3.4 – 4.1. Ўлчагич ўзгартгичнинг энг барқарор конструкцияси схемаси 9б расмда келтирилган, 1.3 – 2.1 – 3.4 – 4.5 композиция тўғри келади.

Ўлчагич ўзгартгични параметрик лойихалаш йўли билан коррективловчи қаршиликларнинг ишчи кучланишининг оптимал параметрлари интерваллари топилган:

$$a_1=U_n=1\div 10В, a_2=K=R_1/R_2=0.1\div 2, a_3=R=10\div 160\text{Ком}, a_4=\beta=0.2\div 6\%,$$

$$a=\{a_1, a_2, a_3, a_4\}, \quad (9)$$

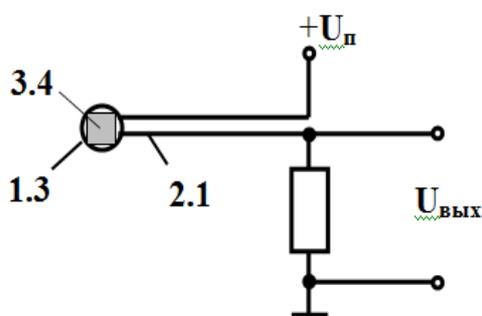
## Ўлчагич ўзгартгичнинг компоновкаш таркиби

1. Датчикнинг кўриниши									
1.1. Цилиндрик			1.2. Шар шаклли			1.3. Кубик			
	3	1		2	1		1	1	
	4	2		2	2		2	2	
	3	3		1	3		1	3	
	3	4		1	4		1	4	
	3	5		5	5		1	5	
	3	6		1	6		1	6	
	3	7		5	7		2	7	
	4	8		1	8		1	8	
	1	9		1	9		1	9	
	4	10		2	10		1	10	
1.4. Стерженли			1.5. Юпқа пленка			Сифат кўрсагичи			
	2	1		4	1	Сезгирлиги	1		
	3	2		1	2	Нархи	2		
	2	3		5	3	Барқарорлиги	3		
	2	4		5	4	Аниқлиги	4		
	2	5		1	5	Чизиқлилиги	5		
	2	6		5	6	Диапазони	6		
	4	7		1	7	Қувват исрофи Вт	7		
	3	8		2	8	Тезкорлиги	8		
	1	9		1	9	Экологиклиги	9		
	3	10		1	10	Оғирлиги	10		

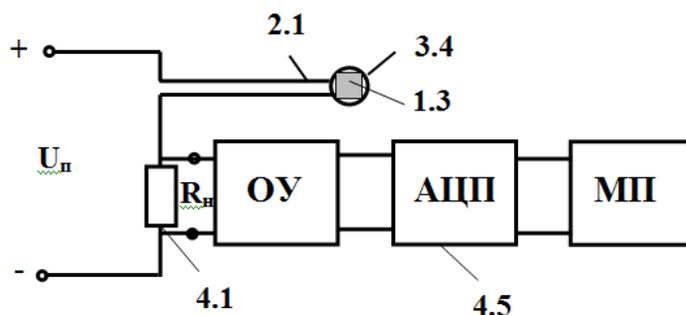
бу ерда  $a_1 = U_n$ ;  $a_2 = K$ ;  $a_3 = R$ ;  $a_4 = \beta$ ,

танланган структура учун статистик характеристикасининг чизиқлилиги ва сезгирлиги критерие бўйича ўлчагич ўзгартгични лойихалаш билан, яъни ўлчагич ўзгартгичнинг статистик характеристикасини ушбу кўринишда қабул қилиб

$$U_{\text{вых}} = U_n \frac{K \cdot \varepsilon}{(K + 1)^2} \quad (10)$$



а) бўлувчи харорат резисторига



б) микропроцессорли қурилмага

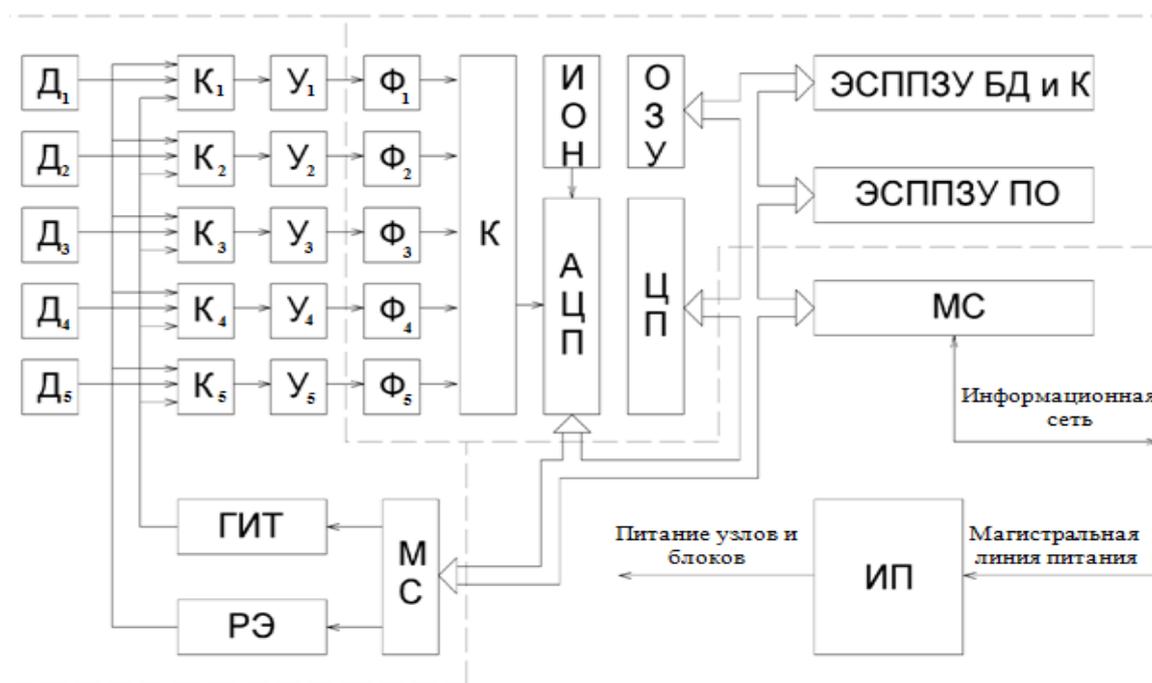
## 9 - расм. Ўлчагич ўзгартгични схемага уланиши

Гаусс-Зайдел методи орқали оптималлаштириш ҳисобига ўлчагич ўзгартгичнинг қуйидаги оптимал параметрлари топилган:

$$a_1=U_{\text{п}}=6\text{В}, a_2=K=1.4, a_3=R_g=110\text{Ком}, a_4=\beta=5.8\%.$$

Талаб қилинаётган сезгирлик, статистик характеристикаларнинг чизиқлилиги, аниқлиги ва тезкорлиги соҳаси аниқланиб, ҳароратни ўлчаш учун янги авлод микропроцессорли асбобнинг мукамаллаштирилган варианты ишлаб чиқилган (10 – расм), у ўз ичига кириш кучайтиргичининг блок схемасини, ток генератори узелини, манба узелини ва микроконтроллер билан сонли қисмини, қайсики юза ҳарорати тўғрисида, ўлчаш муҳити, объектнинг ўзидаги ҳарорат тўғрисида ҳамда уни ўлчашнинг динамикаси тўғрисида аниқ оператив берилганларни олишга имкон берган.

Асбобнинг структурасига асбобни бошқариш программасининг келтирилган бўлакли программа коди, қайсики функционаллик томондан анча муҳим ролга эга ва схемани осон қабул қилиш учун асбобнинг структуравий схемасида айрим блоklar сифатида келтиришни шартловчи элементлар ҳам киритилган.



Д-ҳарорат датчиги ўлчовчи схема билан;  $K_i$ -контроллерлар ( $i=1\div 5$ );  $Y$ - кучайтиргач;  $\Phi$ -фильтрлар;  $K$ -контроллер; ИОН-таянч кучланиш манбаи; ОЗУ-оператив хотира қурилмаси; АЦП-сонли-аналогли ўзгартгич; ЦП-сонли ўзгартгич; ИП-таминловчи манба; МС-магистрал система; ГИТ-ўлчагич токи генератори; РЭ-ишчи эталонлар; ЭСПЗУ ПО- программани таъминловчи электрик ўчирилувчи программа-лаштирилувчи доимий хотираловчи қурилма; ЭСПЗУ БД ва К-электрик ўчирилувчи программалаштирилувчи доимий хотираловчи қурилманинг конфигурациялари ва берилган буферлари

### 10 - расм. Ўлчагич асбобнинг структуравий схемаси

Микропроцессорли ҳароратни ўлчагичнинг техник характеристикалари 8 – жадвалда келтирилган.

Ишлаб чиқилган ўлчагич асбобнинг стабил ва узлуксиз ишлашини

Янги авлод микропроцессорли асбобнинг  
техник характеристикаси

Ўлчов каналлари сони	5
Ҳарорат ўлчаш диапазони, °С	-50, +200
Датчиклар типи	Ҳарорат датчиги Si<P,Ni >
Аниқлик чегараси, °С	0,2; 1;2
Ўртача ишдан чиқиш вақти, соат	3000 дан кам эмас
Ишчи режимига чиқиш вақти, сек	3 дан кўп эмас
Корпусининг габарит ўлчамлари, мм	96 x 50 x 110
Массаси, кг	0,4 дан кўп эмас
Ўртача ишлаш даври, йил	10
Курсатгачлар индикацияси	ёғду диодли дисплейда, ШК
Хамма каналларни мулоқот қилиш даври, с	8
Таъминланган программаси	Windows
Эксплуатация қилиш максимал ҳарорати, °С	-10+50
Атмосфера босими, кПа	80-107
35 °Сдаги нисбий намлиги	80 %
Ҳатоси	$\pm(0,4\% T_{\text{ўлч.}} + 1 \text{ К})^1$
Қайтарувчанлиги	$\pm(0,4\% T_{\text{ўлч.}} + 1 \text{ К})^1$
Аниқлиги	1°С
0 °С дан 100 °С оралигидаги ҳароратни ўлчашдаги асосий хатоси, °С	$\pm 0,05$
Пределы допускаемой погрешности в диапазонах температур от -50 °С дан 0 °С ва 100 °С дан 200 °С гача МТҚда ҳарорат датчиги ишлатилгандаги ўлчаш хатоси, °С	$\pm 0,1$
Атрофдаги ҳарорат $(20 \pm 5) \text{ °С}$ дан ўзгарганда температурани МТҚ ишлатилгандаги 0 °С дан 100 °С ўлчагандаги қўшимча мумкин бўлган хатоси, °С	$\pm 0,05$

аниқлаш учун унинг хатосини баҳолаш ва камайтириш йўллари кўриб чиқилган. Хусусан, статистик характеристикаларнинг нозиклигидан ҳосил бўладиган хатоликни камайтириш учун ҳарорат диапазонини торайтириш, диапазон бошланишини силжитиш ва микропроцессорлар ёрдамида нозикликни корректорлаш кўзда тутилган. Бунда хатоликнинг максимал қиймати миқдоран қуйилаги формула орқали аниқланувчи нозикликнинг даражасига тенг:

$$\gamma_{\text{нл}} = 0.5 \frac{U_{\text{выхнл}} - U_{\text{вхнл}}}{U_{\text{выхмах}} - U_{\text{вхмин}}} 100\% \quad (11)$$

бу ерда  $U_{\text{выхнл}}$ ,  $U_{\text{вхнл}}$  - ўлчлагич ўзгартгич чиқиш сигналининг нозиклиқ ва чиқили қийматлари, ўлчлагич ўзгартгичнинг динамик хатолари билан боғлиқ хатолар эса абсолют кўриришда

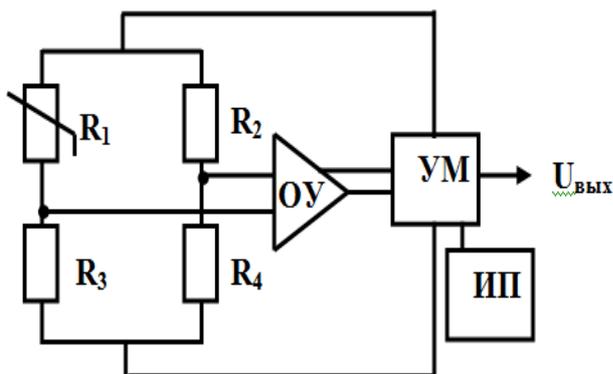
$$\Delta_A U_{\text{вых}}(\tau) = U_{\text{вых}}(\tau) - U_{\text{вых}}(\tau \rightarrow \infty) \quad (12)$$

ёки солиштирма динамик хатосини

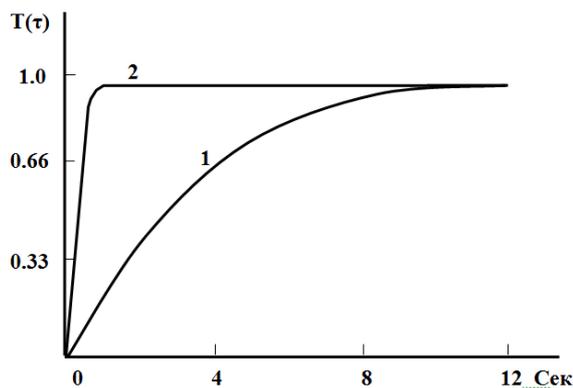
$$\Delta_{\text{отн}} U_{\text{вых}}(\tau) = \frac{U_{\text{вых}}(\tau) - U_{\text{вых}}(\tau \rightarrow \infty)}{U_{\text{вых}}(\tau \rightarrow \infty)} 100\% \quad (13)$$

иссиқлик инерциясини камайтирувчи конструкцияни танлаш ҳисобига ҳамда қурилмага электрик коррективка киритиш йўли билан камайтириш таклиф қилинади.

Операцион кучайтиргич ёрдамида корректирловчи тескари боғлиқликни схемага киритиш ўтиш вақти жараёнини бир даражага камайтиришга олиб келиши тажрибада кўрсатилган, 12, 13 – расм. Биз ишлаб чиққан технология ёрдамида аниқлиги  $\pm 0,2$  °C ёки  $\pm 0,1$  °C бўлган  $0 \div 100$  °C ораликда ва  $-60$  °C и  $+150$  °C соҳасида аниқлиги камроқ стандартизациялашган ҳарорат датчиклари тайёрлаш мумкин. Ишлаб чиқилган технология асосида тайёрланган ҳарорат датчикларининг номиналлари:  $100 \div 500$  Ом;  $1 \div 300$  килоом и 1 мегаомни ташкил қилади Улар орасида катта номиналли ҳарорат датчиклари ўзаро алмашинувчан ишлаб чиқувчининг ҳар хил талабларни қондирувчи ва қаршиликларининг фарқи  $\pm 5\%$  дан кўп эмас.



**11 - расм. Тескари боғланишли ўлчагич ўзгартгичнинг динамик хатосини коррекциялаш схемаси**



1-коррекциясиз; 2- тескари боғланишли

**Рис. 12 -расм. Ўлчагич ўзгартгичли ҳарорат датчигида ўтиш жараёнлари**

Яримўтказгичли ҳарорат датчиклари партиyasi тайёрланганда 1000 тасининг орасида номинал қаршилиқлар фарқи  $\pm 5\%$  дан ошмади.

**Иловада** ўлчаш методикаси, статистик ишланма ва ўлчагич асбобнинг бошқариш алгоритмини таъминлов программаси келтирилган ҳамда программа асосий файлининг листинги тайёрланган.

## ХУЛОСА

«Кремний асосида никел атоми нанокластерили термодатчикни ишлаб чиқиш ва уни тайёрлаш технологияси» мавзусидаги докторлик диссертацияси бўйича олиб борилган тадқиқотлар натижасида қуйидаги хулосалар тақдим этилди:

1. Кремнийга никел диффузияси жараёнининг янги усули таклиф қилинган, унга кўра кремний хажмида никел атомлари нанокластерларини хосил бўлишини таъминловчи диффузия жараёни температура  $600 \div 1250$  °С оралигида  $5 \div 10$  градус/минут тезликда ошириб борилганда ўтказилиши кераклиги таклиф қилинган.

2. Ҳажмига никел диффузия қилинган кремний юзасига адгезияси яхшиланган омик контакт олиш учун никел металининг юпка (3 мкм) қатламини кимёвий усул билан ўтказиб ҳамда 650 градус Цельсийда 10 минут давомида тоблаш жараёни амалга оширилган.

3. Илк бор никел нанокластерили кремний асосида сезгирлиги юқори (7800 К) ва чиқиш характеристикалари стабиллашган ҳарорат датчиги тайёрлаш принциплари асосида уни ишлаб чиқиш технологиясининг маршрути таклиф қилинган.

4. Никел билан легирланган кремнийли ҳарорат датчикларнинг солиштирма қаршилиги  $10^6$  рентген дозали гамма радиацияси таъсирида ўзгармаслиги, радиация дозасини эса  $10^8$  рентгангача оширилиши билан ҳарорат сезгирлиги коэффициенти 10% га ошиб бориши кўрсатилган.

5. Талаб қилинаётган факторга қараб (сезгирлиги, нархи, аниқлиги ва ҳ.к.) компьютер йўли билан моделлаштириш асосида датчикнинг шаклини, контакт чиқишларини, ҳимоялаш қатламини ва ўлчовчи схемасини танлаш имконини берувчи ўлчагич ўзгартгични структурали параметрик лойиҳалаш усули таклиф қилинган.

6. Электрон схемада датчикнинг максимал сезгирлиги соҳасини аниқлаш имконини берувчи, ҳарорат датчиги сезгирлиги ва ўлчовчи параметрларини мувофиқлаштирувчи қаршиликлар орасидаги ўзаро боғлиқлик ўрнатилган.

7. Ҳарорат датчикларининг статистик характеристикалари ночизиқлиги ва иссиқлик инерционлиги билан характерланувчи хатоликларни 10% дан 2% гача камайтириш корректирловчи қаршиликларни ва керакли чегаравий ҳарорат интервалини танлаш йўли билан амалга оширилиши мумкинлиги аниқланган.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
ДОКТОРА НАУК 16.07.2013.ФМ/Т.12.01 ПРИ ФИЗИКО-  
ТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ И САМАРКАНДСКОМ  
ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

---

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**НАСРИДДИНОВ САЙФИЛЛО САИДОВИЧ**

**РАЗРАБОТКА ТЕРМОДАТЧИКА НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ  
С НАНОКЛАСТЕРАМИ АТОМОВ НИКЕЛЯ  
И ТЕХНОЛОГИИ ЕГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ**

**01.04.10 – Физика полупроводников (технические науки)**

**АВТОРЕФЕРАТ ДОКТОРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ**

**Ташкент – 2016 год**

**Тема докторской диссертации зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан, за 28.04.2016/ В.2016.2Т.323**

Докторская диссертация выполнена в Ташкентском государственном техническом университете.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский) размещен на веб-странице Научного совета по адресу [fti-kengash.uz](http://fti-kengash.uz) и Информационно-образовательном портале “ZiyoNet” по адресу [www.ziyo.net](http://www.ziyo.net)

**Научный консультант:** **Эгамбердиев Бахром Эгамбердиевич**  
доктор физико-математических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** **Муминов Рамизулла Абдуллаевич**  
доктор физико-математических наук, академик АН РУз

**Абдукадиров Мухитдин Абдурашитович**  
доктор технических наук, профессор

**Алиев Райимжон**  
доктор технических наук, профессор

**Ведущая организация:** **Ферганский политехнический институт**

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г. в \_\_\_ часов на заседании научного совета 16.07.2013.FM/Т.12.01 при Физико-техническом институте и Самаркандском государственном университете по адресу: 100084, г.Ташкент, ул. Бодомзор йули - 2б. Тел./Факс: (+99871) 235-42-91, e-mail: [lutp@uzsci.net](mailto:lutp@uzsci.net).

Докторская диссертация зарегистрирована в Информационно-ресурсном центре Физико-технического института, за № 04, с которой можно ознакомиться в ИРЦ по адресу: 100084, г.Ташкент, ул. Бодомзор йули - 2б. Тел./Факс: (+99871) 235-30-41.

Автореферат диссертации разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 года  
(протокол рассылки \_\_\_ от \_\_\_\_\_ 2016 г.).

**С.Л. Лутпуллаев**  
Председатель научного совета по присуждению  
учёной степени доктора наук, д.ф.-м.н., профессор

**А.В.Каримов**  
Учёный секретарь одноразового научного совета  
по присуждению учёной степени доктора наук, д.т.н.

**И.Г. Атабаев**  
Председатель одноразового научного семинара при Научном совете  
по присуждению учёной степени доктора наук, д.ф.-м.н., профессор

## **Введение (аннотация докторской диссертации)**

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** В настоящее время одним из важных физико-технологических проблем в динамично развивающемся направлении электронно-вычислительной и информационной техники является разработка датчиков температуры с улучшенными функциональными характеристиками на основе модифицированных полупроводников, в частности, с нанокластерами, используемых для диагностики различных параметров и процессов в промышленности, на атомных реакторах, научных исследованиях и в других областях народного хозяйства.

Исследование взаимосвязи электрофизических параметров активной области кремниевых терморезисторов содержащих нанокластерные включения различных атомов с их эксплуатационными параметрами, позволяют раскрыть их ранее неизвестные новые технические решения. Усовершенствование активной области, увеличение чувствительности и решение проблем снижения разброса параметров, а также разработка технологии изготовления нового поколения термодатчиков на основе материалов с нанокластерами обеспечивающих измерение температуры при различных условиях контроля является важным направлением исследований.

Применение в устройствах и системах контроля параметров промышленных объектов термодатчиков входящих в класс полупроводниковых приборов на основе материалов с нанокластерами требует исследования путей повышения их чувствительности и схем включения. Поэтому исследования, проводимые по диффузионным процессам различных нановключений, а также влияния на свойства терморезисторов нанокластерных включений, направленных на оптимизацию функциональных параметров терморезисторов являются актуальными.

Данное исследование направлено на создание нового способа диффузии обеспечивающего формирование нановключений, а также выбору параметров материала базы и разработке путей получения контактов с улучшенной адгезией, что в совокупности направлено на изготовление термодатчиков со стабильными параметрами. Необходимость улучшения функциональных характеристик таких термодатчиков, разработка экономичной технологии их изготовления и создание технологического маршрута этой технологии имеет важное научно-практическое значение.

Настоящая диссертация в определенной степени служит выполнению задач по повышению конкурентоспособности изделий электронной техники отмеченных в постановлении Президента Республики Узбекистан ПП-1442 «О приоритетах развития промышленности республики Узбекистан в 2011 - 2015 годах» от 15 декабря 2010 года, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

**Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики.** Диссертация выполнена в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики Узбекистан III «Энергетика, энерго- ресурсосбережение,

транспорт, машино- и приборостроение; развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники, электронного приборостроения».

**Обзор международных научных исследований по теме диссертации<sup>1</sup>.** Исследования вопросов теории и практики термометрии ведутся в ведущих центрах и университетах, в том числе, американскими учёными Ф. Мейзда и А.А. Volinsky, а также китайскими исследователями М. Shao и N. Zhano. Обращают внимания работы ученых В.В. Сахина, А.А. Шехурдина по применению микропроцессоров в устройствах измерения температуры, а известными фирмами, такими как Hewlett-Packard (Англия), Analog Devices (США) и Oméga (Германия) ведутся разработки термодатчиков и устройств различного назначения.

В мировом масштабе в области изготовления измерителей температуры на основе различных полупроводниковых материалов получены ряд научных и практических результатов, в том числе, в фирмах Volvo, Siemens (Германия), Philips (Нидерланды), ИТТ Components Group (Великобритания) изготовлены кремниевые термодатчики с положительным температурным коэффициентом, а в предприятии Rodan Industries Inc, Texas Instruments (США) развита технология изготовления термодатчиков, предназначенных для различных целей.

В настоящее время получены научные и практические результаты по разработке термодатчиков сравнительно дешевой технологией на основе кремния с оптимальными параметрами и отвечающих современным требованиям по чувствительности, замещающих интегральные датчики, предназначенные для управления традиционными технологическими процессами, а также по расширению их функциональных свойств.

**Степень изученности проблемы.** До сегодняшнего дня значительный вклад в развитие теории и практики термочувствительных элементов внесли ряд ученых, в том числе: В.С. Громов, Н.П. Удалов, А.И. Кривоносов, Ю.В. Зайцев, И.Л. Ротберт, И.Т. Шефтель и Г. Виглеб. Они способствовали пополнению рынка различных датчиков температуры, включая измерительно-преобразовательные устройства на различный диапазон температур. Однако полупроводниковым термодатчикам свойственен узкий температурный диапазон и неспособность работы в экстремальных условиях. Поэтому создание нового поколения термодатчиков и измерительных преобразователей регистрирующих температуру в широком диапазоне и сохраняющих стабильность параметров в жестких условиях эксплуатации является востребованной и определяет предъявляемые к ним требования.

---

<sup>1</sup> Обзор международных научных исследований по теме диссертации проведен на основе Мейзда Ф. / Электронные измерительные приборы и методы измерений: Пер. с англ. - М.: Мир, 1990. – С.250-335. Alex A. Volinsky and Lev Ginzburgsky. / Irradiated cubic single crystal SiC as a high temperature sensor. 2003 Materials Research Society Fall Meeting. С. 273-278. Zhano N, Fu HW, Shao M, Li HD, Liu YG, Qiao XG. Research on high sensitivity temperature sensor based on Mach-Zehnder interferometer with waist-enlarged fiber bitapers. // Guang Pu Xue Yu Guang Pu Fen Xi, 2014 Jun;34(6):1722-6. Сахин В.В., Шалимов В.П. Теплопередача // БГТУ, СПб. 2003. С. 120-135. Шехурдин А.А. Использование оптоэлектронных систем с кварцевыми монолитными световодами в АСУ ТП промышленных печей // Автоматизация в промышленности. 2007. №4. С.23-24 и других источников.

На современном этапе большое внимание уделяется развитию цифровой техники и средств электронных коммуникаций, где требуются датчики с цифровым выходным сигналом. Известные учёные, как Э.И. Цветков и А.М. Мелик-Шахназаров исследовали вопросы применения микропроцессоров в устройствах измерения температуры. Ю.В. Гуляевым предложены новые принципы построения датчика, на основе поверхностных акустических волн, используемых при изготовлении пассивных датчиков температуры с рекордной чувствительностью по сравнению с известными аналогами. В этом аспекте следует отметить, что оптимизация параметров датчиков температуры взаимосвязана с исходным материалом и технологией его изготовления. Традиционные диффузионные методы, используемые для получения термодатчиков на основе кремния, исчерпали свои возможности, создание новой технологии формирования нановключений, наноконструкций и нанокластеров в матрице полупроводника весьма перспективно. В этом направлении ученые Узбекистана, в частности, школа М.К. Бахадирханова создав новый способ диффузии переходных металлов, внесла свой вклад в усовершенствование технологии получения нанокластерных материалов, которая может служить основой технологии для создания датчиков температуры с высокой (выше 120 °С) рабочей температурой и чувствительностью. Школой М.С. Юнусова совместно с рядом ученых создана технология терморadiационного легирования кремния и основано направление радиационной физики полупроводников, а группой профессора Б.Э. Эгамбердиева развиты принципы создания многоканальных измерительных преобразователей температуры на основе термодатчиков.

Из вышеизложенного следует, что требуют своего решения проблемы разработки физико-технологических аспектов формирования структур с нановключениями на основе кремния и совершенствование диффузионных процессов обеспечивающих управляемое встраивание примесей в матрицу кремния, направленных на интегральный выбор конструкции датчиков температуры, а также получению оптимального сочетания их параметров с технологическими процессами, вместе с тем проблемы обеспечения стабильности их параметров имеют научно-практическое значение.

**Связь темы диссертации с научно-исследовательскими работами высшего учебного заведения, в котором выполнена диссертация.** Диссертация выполнено в рамках плана научно-исследовательских работ прикладных проектов в рамках Государственной программы по теме П-10.19 «Разработка и создание принципиально нового класса датчиков физических величин (температуры, магнитного поля, давления, ИК излучения, влажности, радиации)» (2010-2012), ИД6-022 «Разработка многоканального прибора для дистанционного контроля температуры сельхозпродуктов» (2008-2010гг.).

**Целью исследования** является развитие диффузионной технологии получения высокочувствительных датчиков температуры с нанокластерами никеля и разработка на их основе управляющих температурные процессы комплекса термодатчиков и устройств со стабильными параметрами и

устойчивых к различным видам воздействий для систем контроля температуры объектов.

**Задачи исследования:**

разработать способ диффузии никеля с упорядоченно встраиваемыми нанокластерами в кремний;

реализовать технологию получения сильнолегированной области для омических контактов к кремниевым структурам;

разработать технологический маршрут изготовления термодатчиков на основе компенсированного кремния с нанокластерами;

изучить влияние радиационного воздействия на рабочие характеристики термодатчиков на основе кремния, легированного никелем;

выбрать конкурентоспособное устройство по различным показателям в качестве датчика с учетом особенностей искомым включений;

провести оценку и компенсацию погрешности измерительного устройства температуры на основе термодатчика.

**Объектом исследования** являются впервые полученные кремниевые  $n^+ - n - n^+$ -структуры с нановключениями, изготавливаемые диффузионной технологией и измерительные преобразователи на их основе.

**Предметом исследования** являются технологические процессы диффузионного легирования кремния никелем, модели идентификации эксплуатационных параметров системы измерительного преобразователя на основе термодатчика, технология получения омических контактов с улучшенной адгезией к поверхности полупроводника.

**Методы исследования.** В работе применены комплексные информативные методы экспериментальной физики: вольтамперные, четырехзондовый метод и метод измерения эффектом Холла, растровая электронная микроскопия, метод электронно-зондового микроанализа, метод дифракции медленных и быстрых электронов, теория погрешности.

**Научная новизна исследования** заключается в следующем:

разработан способ диффузии никеля в объем кремния с встраиваемыми нанокластерами в кремнии, который состоит из трех ступеней, то есть в каждой ступени температура (300÷600; 600÷900; 900÷1200 °С) последовательно повышается со скоростью 5 град/мин., выдерживается в течение определенного времени (10 минут), затем охлаждается со скоростью 100 град/сек;

создана технология получения сильнолегированного слоя для омических контактов к кремниевой структуре легированной никелем, которая заключается в том, что на поверхность кремниевой структуры слой металла никеля осаждается химическим способом и подвергается термо-обработке при 650°С в течение 10 минут;

впервые на основе кремния с нанокластерами разработан термодатчик обладающий высокой чувствительностью (7800 К) и стабильностью выходных характеристик и предложен технологический маршрут его изготовления;

экспериментально показано, что введение корректирующей обратной связи с помощью операционного усилителя приводит к снижению времени переходного процесса термодатчика до одного порядка;

экспериментально показано, что удельное сопротивление легированных никелем кремниевых датчиков температуры с концентрацией носителей больше  $10^{16} \text{ см}^{-3}$  при воздействии гамма радиации дозой  $10^6$  рентген изменяется незначительно, то есть являются устойчивыми воздействию радиации, а в образцах с концентрацией носителей меньше  $10^{14} \text{ см}^{-3}$  при дозах  $(5 \div 10) \cdot 10^6$  рентген происходит инверсия типа проводимости ( $n \rightarrow p$ );

предложен способ оптимального структурного параметрического проектирования измерительного преобразователя на основе термодатчика путем компьютерного моделирования позволяющая выбрать, в соответствии с требуемыми параметрами (чувствительность, линейность статических характеристик, быстродействие и других), форму, контактные выводы, защитный слой и параметры измерительной схемы;

определена возможность уменьшения погрешностей термодатчиков, характеризуемых тепловой инерционностью и нелинейностью статических характеристик, путем подбора требуемого граничного интервала температуры.

**Практические результаты исследования** заключаются в следующем:

разработан способ диффузии никеля в кремний, в режиме нарастания температуры обеспечивающий образование устойчивых нанокластеров в объеме, на их основе разработана технология изготовления термодатчиков для измерения температуры в широком интервале температур от  $-100$  до  $180$  градусов Цельсия;

предложены технические решения, позволяющие создавать микропроцессорные измерительные схемы для измерения температуры различных объектов с расстояния.

**Достоверность результатов исследований** подтверждается применением современных научных и технологических методов, стандартных и апробированных методик контроля параметров и характеристик полупроводниковых приборов. Результаты и выводы обосновываются на физических представлениях, основанных на теоретических и экспериментальных данных. Достоверность экспериментальных данных обеспечивается использованием комплексных независимых методик измерения и обработки данных, а также их соответствием современным понятиям физики и техники полупроводников и изделий на их основе.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.**

Научная ценность исследований заключается в том, что создание нанокластеров атомов никеля в кремнии методом диффузионного легирования и всестороннее изучение их влияния на электрофизические свойства кремния представляет научный интерес по расширению представлений о структуре и свойствах компенсированных материалов.

Практическая ценность работы состоит в том, что усовершенствованная диффузионная технология позволяет проводить целенаправленную моди-

фикацию свойств полупроводниковых материалов и получать на их основе термочувствительные структуры датчиков, предназначенных для использования в приборах и системах контроля параметров различных объектов.

**Внедрение результатов исследования.** Получен патент «Термодатчик» Агентства Интеллектуальной собственности Республики Узбекистан на термочувствительный датчик с широким рабочим диапазоном ( $-40 \div 180$  °C) (UZ IAP 04778 от 29.11.2013г.). Разработанный термодатчик позволяет контролировать температуру промышленных оборудования, научных объектов и различных устройств бытового назначения, а также субъектов;

в Открытом акционерном обществе «FOTON» изготовлена партия термодатчиков отличающихся стабильностью параметров и устойчивостью к внешним воздействиям и изготовленные на их основе устройства измерения температуры использованы для сохранения отвечающих требованиям всхожести хлопковых семян в хлопкозаготпунктах Кашкадаринской области (Справка Акционерного общества «FOTON» от 30 июня 2016 года). В результате внедрения устройства обеспечена устойчивость и стабильность параметров термодатчика к внешним воздействиям;

пятиканальные микропроцессорные устройства измерения температуры использованы для контроля температуры в сооружениях (элеватор) хранения зерна (Справка Открытого акционерного общества «Галла-Алтег» от 04 июля 2016 года). Внедрение разработки за счет обеспечения стабильных условий хранения зерновых культур обеспечило сохранность их качества, предотвращая порчу зерна.

**Апробация результатов исследования.** Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и республиканских конференциях: «8-th international Conference Solid state physics» (Almaty, 2004); «Геотехнология: инновационные методы недропользования в XXI веке» (Москва-Навои, 2007); «Рост, свойства и применение кристаллов» (Андижан, 2008); «Интеграция образования, науки и производства» (Москва, 2008); «Казахстан в новом мире и проблемы Национального образования» (Чимкент, 2008); «Наука и производство» (Жетысай, 2009); «Кремний-2010» (Нижний Новгород, 2010); «Фундаментальные и прикладные вопросы физики» (Ташкент, 2010); «Ўзбекистоннинг инновацион тараққиёти-ёшлар нигоҳида» (Ташкент, 2010); «Фотоэлектрические и теплофизические основы преобразования солнечной энергии» (Фергана, 2011); «Оптическая и фотоэлектрическая явления в полупроводниковых микро и наноструктурах» (Фергана, 2011); «Нанотехнология ва қайта тикланадиган энергия манбалари: муаммолар ва ечимлар» (Қарши, 2012).

Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на объединенном семинаре Ташкентского государственного технического университета (28 мая 2016), а также в одноразовом Научном семинаре (10 июня 2016) при Научном совете 16.07.2013.FM/Т.12.01 при Физико-техническом институте и Самаркандском государственном университете по присуждению ученой степени доктора наук по специальности 01.04.10-

Физика полупроводников (технические науки).

**Опубликованность результатов исследований.** По материалам диссертации опубликовано 28 научных работ, из них 14 статей, в том числе 4 в зарубежных реферируемых журналах, 1 книга (монография), 12 трудов конференций и 1 патент на изобретение.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающей 112 наименований и 2-х приложений. Текст диссертации изложен на 200 страницах машинописного текста, включая 76 рисунков и 26 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, определена связь исследований с основными приоритетными направлениями развития науки и технологий в республике, приведены обзор международных научных исследований по теме диссертации, степень изученности проблемы, сформулированы цель и задачи, выявлены объект, предмет и методы исследования, изложена научная новизна исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта их теоретическая и практическая значимость, приведены краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, а также об объеме и структуре диссертации.

В первой главе **«Состояние проблемы и тенденции улучшения технологии изготовления полупроводниковых структур с нанокластерами»** приведен обзор литературных данных по состоянию проблемы и тенденциям улучшения функциональных характеристик термодатчиков в зависимости от его технологии изготовления, а также определены схемотехнические пути улучшения электрических параметров. На основе анализа имеющихся теоретических и экспериментальных данных сформулирована постановка задачи.

Во второй главе **«Разработка способа легирования кремния атомами никеля»** приведены технологические этапы получения кремния, легированного термодиффузией никеля, процессы упорядочения распределения нанокластеров в объеме кремния.

Известно<sup>1</sup>, что путем применения процесса диффузии с последующим резким охлаждением можно получить нанокластеры никеля в кремнии. При этом варьируя температурой диффузии от 750 до 1050 градусов Цельсия, а также изменяя скорость охлаждения можно управлять размерами нанокластеров от 10 до 900 нм. Исходя из этого обстоятельства нами изучено влияние температурного диапазона и скорости охлаждения на формирование кластеров никеля в кремнии.

На основе изучения процессов диффузии примесей переходных металлов в кремний при различных скоростях охлаждения  $10 \div 10^4$  град/сек установлено, что концентрация электрически активных атомов в них практически не зависит от скорости охлаждения.

Для получения в объеме кремния, повышающих его термочувствительность, нанокластеров процесс диффузии никеля в кремний осуществляли в диффузионной печи в режиме нарастающей температуры со скоростью  $5 \div 7$  С/мин в интервале температур  $700 \div 1250$  °С. Осуществление нагрева кремния с самой начальной температуры создает условия для термоотжига неустойчивых центров. Температура диффузии, контролировалась платина-платинородиевой термопарой, расположенной непосредственно рядом с ампулой. Нарастающий нагрев осуществляли в течение 110 минут, а затем после достижения максимальной температуры выдерживали в

---

<sup>1</sup> F. Riedel, W. Schöter. Electrical and structural properties of nanoscale NiSi<sub>2</sub> precipitates in silicon // Phys. Rev. B., 2000. – Vol. 62. – № 11– pp. 7150-7156.

течение 10 минут, после чего ампулу с образцами вынимали из печи и сбрасывали в воду, чем и обеспечивалось высокая скорость охлаждения  $V=100\div 300$  °C/сек и упорядоченное распределение нанокластеров в объеме.

Для получения омического контакта с улучшенной адгезией к поверхности кремния, в объем которого проведена диффузия никеля, проведено осаждение тонкого слоя (3 мкм) металла никеля химическим способом с последующей термообработкой при 650 градусах Цельсия в течение 10 минут.

Сопоставление параметров разработанных термодатчиков с известными аналогами показало, что зависимости их сопротивлений от температуры как при положительных, так и отрицательных температурах в отличие от известных аналогов подчиняются одному и тому же закону, а температурный коэффициент имеет высокие значения (табл. 1).

**Таблица 1**

Параметры кремниевых термодатчиков  
( $1\times 1\times 0,5$  мм<sup>3</sup>) с нанокластерами никеля

№	$\rho$ , Ом·см	B, К	T, °C
1	$3\cdot 10^2$	4600	-60÷120
2	$3\cdot 10^3$	6250	-60÷130
3	$2\cdot 10^4$	7000	-70÷140
4	$10^5$	7200	-80÷150
5	$6\cdot 10^5$	7300	-100÷160
КМТ-1	$22\cdot 10^3\div 1\cdot 10^6$	3600÷7200	-60÷180
ММТ-1	$1\cdot 10^3\div 220\cdot 10^3$	2030÷4300	-60÷125
ММТ-6	$10\cdot 10^3\div 100\cdot 10^3$	2060÷4300	-60÷125

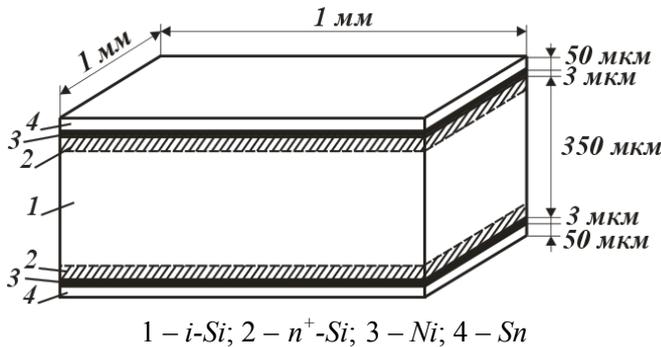
Впервые разработанная технология изготовления кремниевого термодатчика  $n^+ - n - n^+$ -структурой включает в себя проведение диффузии никеля в кристалл кремния с удельным сопротивлением  $40\div 60$  Ом·см  $n$ -типа проводимости в режиме нарастающей температуры, формирование сильнолегированных областей  $n^+$ - типа проводимости методом диффузии, из химически осажденного никеля с последующим отжигом и осаждение подслоя олова толщиной 50 мкм, а также нарезку пластины кремния на дискретные элементы площадью 1 мм<sup>2</sup> и напайку проволочных токосъемных выводов.

В отличие от аналога, улучшение адгезии омического контакта к поверхности кремния термоотжигом в вакууме, предотвращает разброс параметров термодатчиков в обоих направлениях, обеспечивая линейность токовых характеристик.

В третьей главе «**Разработка технологии изготовления термодатчика на основе кремния легированного никелем**» обоснован выбор параметров базовой области термодатчика с  $n^+ - i - n^+$ -структурой, приведены процессы получения к ним омических контактов, герметизации, технологический

маршрут изготовления, статические и динамические характеристики, а также надежность.

Термодатчик, содержащий термочувствительную высокоомную  $i$ -область на основе монокристаллического кремния и оснащенный электрическими контактами, отличающийся тем, что  $i$ -область заключена между двумя сильнолегированными  $n^+$ -областями, выполненными путем легирования атомами металла с образованием структуры  $n^+ - i - n^+$ , при этом наружная поверхность каждой  $n^+$ -области никелирована и образует омический переход между  $n^+$ -областью и соответствующим электрическим контактом, а между никелированными поверхностями и электрическими выводами введены слои олова.



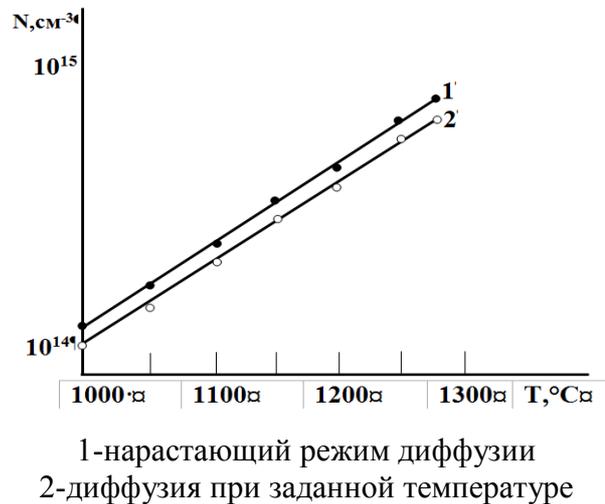
**Рис. 1. Структура предложенного термодатчика**

Структура предложенного термодатчика приведена на рис. 1, где базовая область 1 представляет собой высокоомный кремний толщиной 350 мкм легированный никелем. На его обе поверхности сформированы низкоомные сильнолегированные области 2  $n^+$ -типа толщиной 2 мкм, поверх которых химическим способом осаждены слои никеля 3 толщи-

ной 3 мкм служащие основой омических контактов. Для облегчения напайки проволочных токосъемных выводов поверх никеля нанесен слой олова толщиной 50 мкм.

Выбор в качестве материала базовой области термодатчика, промышленного монокристаллического кремния  $n$ -типа проводимости с удельным сопротивлением  $\rho = 10 \div 100$  Ом·см, обусловлен возможностью контролируемого управления концентрацией электроактивных атомов вводимого в него никеля (рис. 2) и рабочим диапазоном температуры.

При этом процесс диффузии никеля в кремний осуществлен в режиме с нарастающей температурой, конечное значение которого совпадал с фиксированной температурой обычной технологии. То есть, в обычной технологии, контрольные образцы, помещенные в ампулы, устанавливали в печь с набранной конечной температурой диффузии, а время диффузии составляло 2 часа. Концентрация электроактивных атомов никеля в них получалась приблизительно на 7÷10 %



**Рис. 2. Зависимость электроактивной концентрации от температуры термообработки**

меньше (кривая 2), чем в образцах, полученных в режиме с нарастающей температурой (кривая 1). Преимущество диффузии никеля в режиме с нарастающей температурой заключается в том, что при этом для получения заданной концентрации носителей на процесс диффузии тратиться в два раза меньше времени.

По расчетным данным при коэффициенте диффузии  $D_{Ni}=2,3 \cdot 10^{-3} \exp(-0,47/kT)$  см<sup>2</sup>/с и температуре  $T=(600 \div 900)$  °С концентрация никеля  $N_{Ni}=1,4 \cdot 10^{25} \exp(-2,3/kT)$  см<sup>-3</sup>, то есть, растворимость никеля должна быть  $N_{Ni} \sim 10^{14}$  см<sup>-3</sup>, а коэффициент диффузии должен иметь значение  $D=(10^{-4} \div 10^{-7})$  см<sup>2</sup>/с. Тогда, чтобы однородно легировать образцы толщиной 1мм, необходимо было бы около  $t=l^2/D=(0/1)^2/10^{-7}=1000$  сек, т.е. потребовалось бы около  $t=7$  часов, а в нашем случае весь технологический процесс диффузии занимает 3 часа. Концентрация атомов никеля в объеме составляла  $N_{Ni} \sim 10^{14}$  см<sup>-3</sup>, т.е. больше чем ожидалось.

Сделано заключение, что в режиме нарастания температуры диффузия никеля происходит по междоузлиям, а примесные атомы находятся в междоузельных состояниях, так как при этом концентрация вакансий -  $N_v$  составляет порядка  $10^7$  см<sup>-3</sup>, т.е. она почти на  $10^7 \div 10^8$  порядков меньше, чем концентрация атомов никеля в междоузлиях.

С целью исключения влияния внешних факторов типа влаги, света и мгновенных возмущений потока воздуха на измерительные параметры термодатчиков в качестве герметика использовали заливочные компаунды. Для исключения влияния разницы между коэффициентами линейного расширения компаунда и термодатчика в компаунд вводили наполнитель, в частности, сурик-свинцовую краску. За основу заливочных компаундов взяты смолы ЭД-20 с малеиновым ангидридом и триэтаноламином в качестве отвердителей.

Выбор малеинового ангидрида и триэтанолamina обусловлен тем, что малеиновый ангидрид позволяет получить компаунды с малой начальной вязкостью и большой жизнеспособностью. Триэтаноламин же выбран из-за малой его токсичности, несмотря на худшие технологические качества получаемого компаунда. Рецепт эпоксидного заливочного компаунда Д-2 приведена в табл. 2. С точки зрения предотвращения больших механических напряжений большое значение имеет усадка компаунда в процессе полимеризации.

Поэтому нами проводился экзотермический прогрев при различных температурах в процессе полимеризации при температуре  $T=80^\circ\text{C}$  в течение 4 часов, при  $T=120^\circ\text{C}$  в течение 12 часов, при  $T=140^\circ\text{C}$  в течение 24 часов. В результате удалось свести к минимуму образование механических напряжений в процессе отверждения выбранной эпоксидной смолы.

Структурное описание последовательности технологических процессов и наименования требуемых участков, а также оборудования для изготовления термодатчиков оформлено в виде технологического маршрута изготовления термодатчика на основе компенсированного кремния.

Таблица 2

## Рецептура эпоксидного заливочного компаунда Д-2

Компаунд	Условное обозначение	Состав, весовые части					
		Смола		Отвердитель		Наполнитель	
		наименование	количество	наименование	количество	наименование	количество
Заливочное	Д-2	ЭД-20	100	ма	2,28К	СС	1,5÷1,8г

Экспериментально показаны возможности оптимизации измерительного параметра термодатчика в схеме с последовательно-паралельно соединенными резисторами и установлена взаимосвязь этих параметров с чувствительностью оптимизированной схемой, что способствует обеспечению точности измерений и снижению погрешности.

$$K_{ga} = \frac{(R_1 - R_2)r_1^2}{(T_2 - T_1)(R_1 + r_1)(R_2 + r_1)}, \quad (1)$$

При этом измеряемая температура определяется условиями контролируемой среды (газ, жидкость и другие) и имеет незначительные отклонения (табл. 3), а в стационарных условиях дает истинную температуру.

Таблица 3

## Отклонение параметров и характеристических величин термодатчика от номинальных значений

Факторы	$\Delta U_{II}/U_{II}$	$\Delta K/K$	$\Delta R/R$	$\Delta \beta/\beta$
Температура окружающей среды	0,06	0,05	0,01	0,001
Старение материала	0	0	0,1	0,01
Приведенная погрешность	0,05	0,05	0,01	0,01

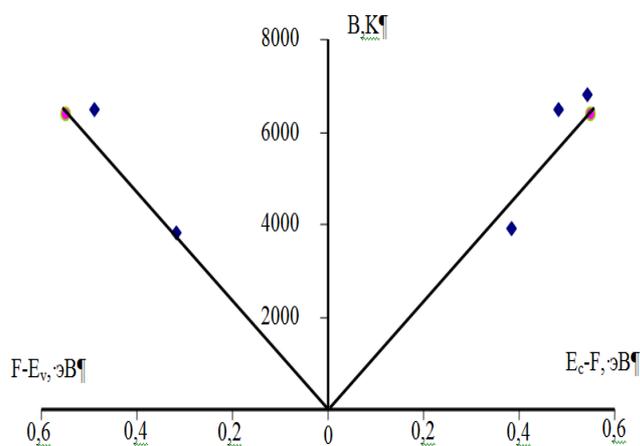
Надежность термодатчика в отношении постоянных отказов с учетом дестабилизирующих факторов при погрешности не более 1,0% составляет 0.966.

$$\Delta S_{\max} / S_{\max} = 0,45 \quad (2)$$

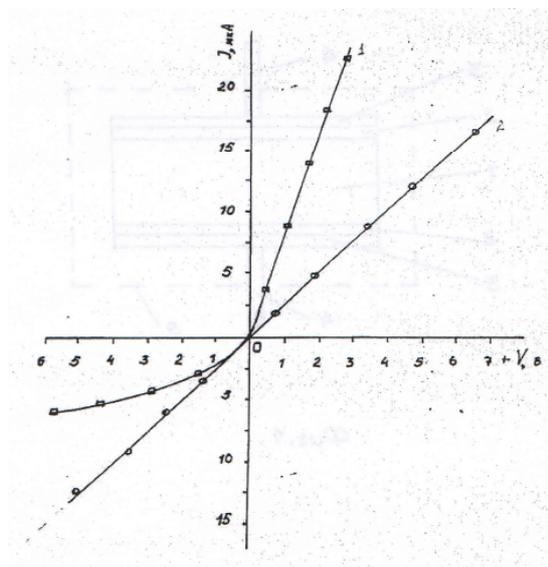
$$P = \Phi\left(\frac{\Delta S_{\max}}{\sigma_s}\right) - \Phi\left(-\frac{\Delta S_{\max}}{\sigma_s}\right) = \Phi\left(\frac{1}{0,45}\right) - \Phi\left(-\frac{1}{0,45}\right) = 0,966 \quad (3)$$

Четвертая глава «**Изучение характеристических параметров термодатчиков**» посвящена методике исследования параметров и характеристик разработанных термодатчиков, изучению электрических и основных характеристических параметров, а также влияния  $\gamma$ -облучения и вибрации на их рабочие характеристики.

Основные характеристики термодатчиков - коэффициент температурной чувствительности и температурный коэффициент сопротивления, диапазон измеряемых температур, быстродействие определяли с помощью стандартной экспериментальной установки. Измерения проведены в рабочей камере путем повышения температуры с шагом  $2\div 3^\circ\text{C}$  в минуту поступающей воды из термостата, а минусовые температуры создавали жидким азотом. На основе измеренных и расчетных данных установлена взаимосвязь коэффициента температурной чувствительности с глубиной залегания уровня Ферми задаваемого удельным сопротивлением базы термодатчика определяемого с точностью до 10%. То есть, чем ближе уровень Ферми к середине запрещенной зоны, тем выше коэффициент температурной чувствительности, рис. 3.

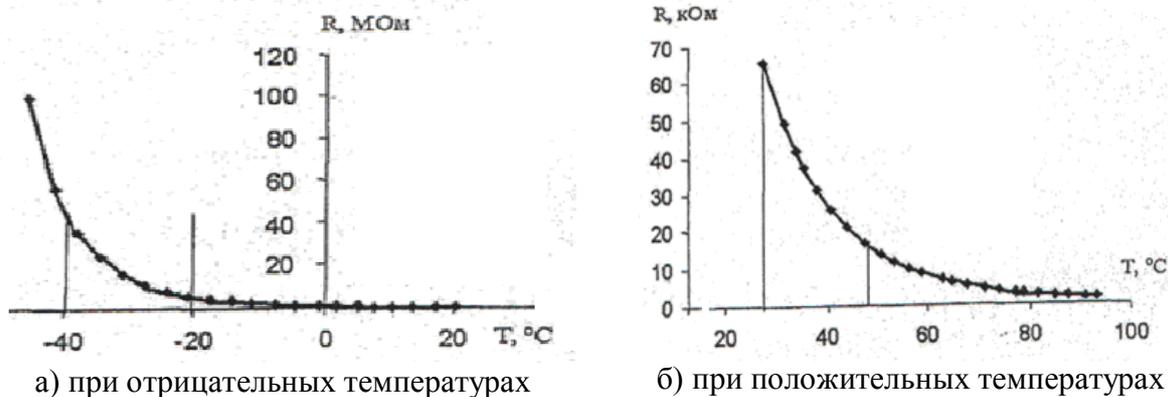


**Рис. 3. Зависимость коэффициента температурной чувствительности от глубины залегания энергетического уровня Ферми в компенсированном кремнии *p*-и *n*-типа проводимости**



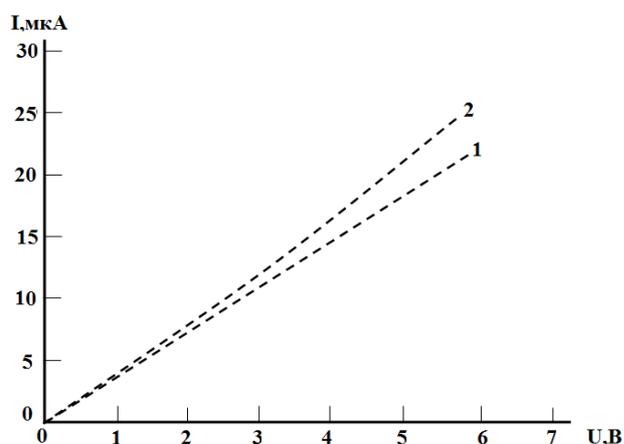
1-известный; 2- предлагаемый  
**Рис. 4. Вольтамперная характеристика термодатчика**

Экспериментально показано, что предложенные датчики температуры в отличие от известных имеют линейную зависимость вольтамперных характеристик в обоих направлениях (рис.4), что обеспечивает одинаковую температурную чувствительность сопротивления во всем рабочем диапазоне температур (рис. 5).



а) при отрицательных температурах  
б) при положительных температурах  
**Рис. 5. Зависимость сопротивления термодатчика, легированного никелем от температуры**

Герметизация термодатчиков способствует исключению влияния светового излучения и импульсных колебаний потока окружающей атмосферы на вольтамперную характеристику, что способствует повышению стабильности выходных параметров при низких напряжениях питания (рис. 6), а высокие



**Рис. 6.**  
**Вольтамперная характеристика**  
**термо-датчиков на основе n-Si<S>**  
**с  $\rho = 10^5$  Ом·см ( $T = 300$  К)**

1-без герметизации;  
 2 - с герметизацией

значения удельного сопротивления базовой области способствуют снижению погрешности измерения, исключая влияние сопротивления соединительного кабеля на результаты измерений.

Другое отличие разработанных термодатчиков ( $1 \times 1 \times 0,5$  мм<sup>3</sup>) состоит в том, что по мере увеличения удельного сопротивления базы термодатчика его температурная чувствительность и диапазон рабочих температур расширяется, табл. 4.

**Таблица 4**

Параметры кремниевых термодатчиков с нанокластерами никеля

$\rho$ , Ом·см	$3 \cdot 10^2$	$3 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^4$	$10^5$	$6 \cdot 10^5$
V, К	4600	6250	7000	7200	7300
T, °С	-60÷120	-60÷130	-70÷140	-80÷150	-100÷160

Сравнительный анализ основных характеристик разработанных полупроводниковых датчиков температуры с существующими аналогами (КМТ-1, ММТ-1, ММТ-6, СТ6) показывает (табл.5), что по таким показателям, как

**Таблица 5**

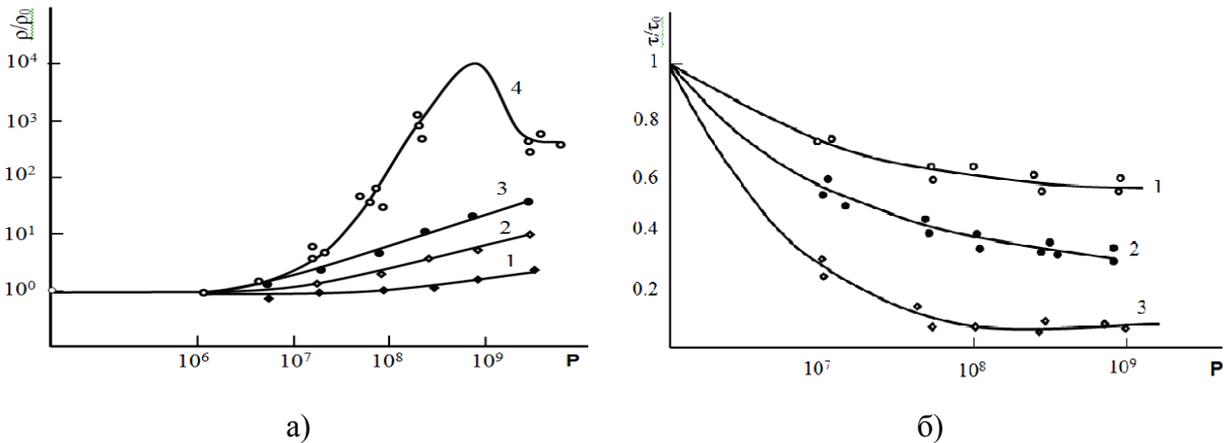
Сравнительные данные рабочих характеристик  
 разработанных термодатчиков\*

Тип термо датчика	Удельное сопротивление Ом	Диапазон измерения температур °С	Температурная чувствительность В	Постоянная времени, сек
Si<P,Ni>	$3 \cdot 10^2 \div 1 \cdot 10^6$	-80÷150	4600÷7200	5
КМТ-1	$22 \cdot 10^3 \div 1 \cdot 10^6$	-60÷180	3600÷7200	85
ММТ-1	$1 \cdot 10^3 \div 220 \cdot 10^3$	-60÷125	2030÷4300	85
ММТ-6	$10 \cdot 10^3 \div 100 \cdot 10^3$	-60÷125	2060÷4300	35
СТЗ-6	$6,8 \cdot 10^3 \div 8,2 \cdot 10^3$	-90÷125	1200÷2400	35
p-i-n диод	$1,2 \cdot 10^3 \div 6 \cdot 10^3$	-60÷150	$2,3 \text{ мВ} \cdot \text{К}^{-1}$	12

\*Если разработанный термодатчик работает в более теплопроводной среде, например в жидкости, то постоянная времени будет уменьшаться

удельное сопротивление, температурный диапазон, температурная чувствительность и постоянная времени разработанные полупроводниковые датчики температуры имеют лучшие показатели.

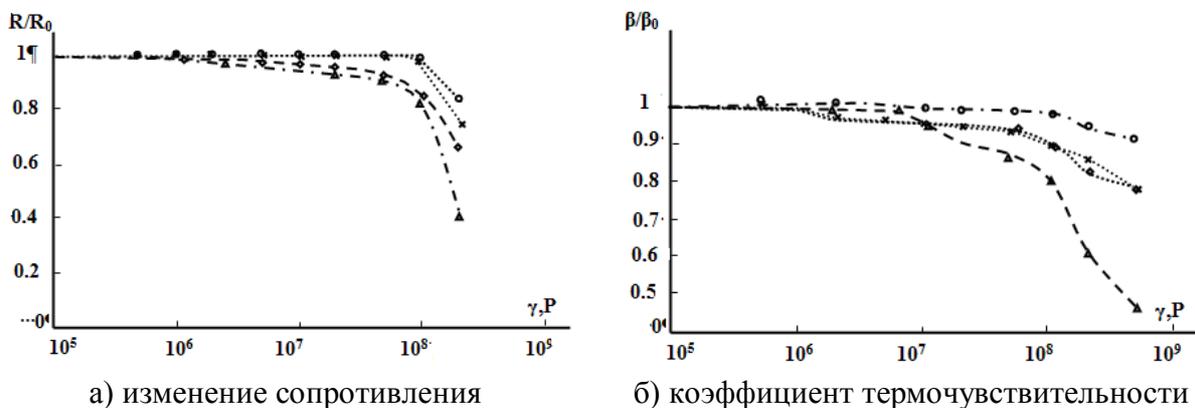
Экспериментально установлено, что в отличие от контрольного образца на кремнии, удельные сопротивления изготовленных термодатчиков для широкого диапазона концентрации носителей ( $10^{16} \div 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ) или с удельным сопротивлением порядка  $0.1 \div 1.0 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  при воздействии радиации до дозы  $10^9 \text{ Р}$  изменяются незначительно, а времена жизни уменьшаются, способствуя повышению быстродействия ( $5 \div 7 \text{ сек.}$ ), рис. 7.



1- $N=5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ; 2- $N=10^7 \text{ см}^{-3}$ ; 3- $N=6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  образцы Si<Ni> с различной концентрацией никеля, 4- контрольный образец

**7 - расм. Относительное изменение удельного сопротивления (а) и времени жизни носителей тока (б) от дозы  $\gamma$ -облучения**

Для термодатчиков с более высоким омическим сопротивлением  $(1 \div 5)10^5 \text{ Ом}$  или с удельным сопротивлением  $\rho \sim 10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  коэффициент термочувствительности (В) и быстродействие при облучении до дозы  $\Phi = 10^8 \text{ Р}$  практически не меняется, а в дальнейшем наблюдается ухудшение этих параметров. При более высоких дозах  $\Phi > 10^8 \text{ Р}$  постепенно ухудшаются параметры термодатчиков и состояние герметизации. С увеличением дозы облучения до  $\Phi \sim 10^9 \text{ Р}$ , все параметры ухудшаются на  $25 \div 30\%$  (рис.8).



а) изменение сопротивления

б) коэффициент термочувствительности

**Рис. 8. Влияние гамма облучения на характеристические параметры термодатчиков**

Соответственно, чем меньше концентрация примесных атомов, тем больше сопротивление термодатчика и выше радиационная стойкость. При этом в данном интервале доз надежность и омичность электрического контакта практически не изменяются. Основные параметры разработанных термодатчиков и зависимость состояния их герметизации от дозы облучения приведены в табл. 6.

Таблица 6

Влияние  $\gamma$  облучения ( $Co^{60}$ ) на эксплуатационные параметры и состояние герметизации термодатчиков на основе Si<P,Ni>

Доза облучения, Р												
Чувствительность и время восстановления	$10^5$		$10^6$		$10^7$		$5 \cdot 10^7$		$10^8$		$5 \cdot 10^8$	
	В, К	$\tau$ , сек	В, К	$\tau$ , сек	В, К	$\tau$ , сек	В, К	$\tau$ , сек	В, К	$\tau$ , сек	В, К	$\tau$ , сек
	6800	$5 \div 7$	6800	$5 \div 7$	6750	$5 \div 7$	6700	$5 \div 7$	6650	$5 \div 7$	6600	$5 \div 7$
	7000	$5 \div 7$	7000	$5 \div 7$	6950	$5 \div 7$	6900	$5 \div 7$	6850	$5 \div 7$	6800	$5 \div 7$
7200	$5 \div 7$	7200	$5 \div 7$	7150	$5 \div 7$	7100	$5 \div 7$	7050	$5 \div 7$	7000	$5 \div 7$	
Состояние	нет изменений		нет изменений		нет изменений		изменился цвет		разрушение		полное разрушение	

Выявлено, что разработанные термодатчики на основе кремния с нанокластерами атомов никеля не только обладают достаточно высокой чувствительностью и быстродействием, но также обладают достаточно высокой радиационной стойкостью и могут использоваться в условиях повышенного уровня радиации. При этом увеличение коэффициента температурной чувствительности при больших дозах облучения открывает возможность создания термодатчика для дистанционного контроля температуры различных объектов, находящихся как в обычных, так и в условиях радиационного воздействия.

Пятая глава «**Разработка измерительного преобразователя температуры на основе термодатчика**» посвящена изучению основных параметров измерительных преобразователей, их структурному и параметрическому проектированию с учетом критерия чувствительности, линейности статической характеристики и точности, а также разработке пятиканального прибора на основе измерительного преобразователя, исследованию источников погрешностей измерительного преобразователя и разработке методов их компенсации.

В зависимости от чувствительности и сопротивления термодатчика, они включаются с делительным резистором, по мостовой схеме и с двумя термодатчиками.

Для делительной измерительной схемы выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$  равно

$$U_{\text{вых}} = U_n \frac{R_{T1}}{R_{T1} + R_2} \quad (4)$$

При изменении температуры сопротивление измерительного преобразователя  $R_{T1}$  изменится на величину  $R_{T1}\varepsilon_1$  и станет равным

$$R_{T1}(1+\varepsilon_1),$$

$$\text{где } \varepsilon = \Delta R_g / R_g$$

а выходное напряжение будет определяться выражением

$$U_{\text{вых}} = U_n \frac{K}{(K+1)} - U_n \frac{\varepsilon_1}{(K+1+K\varepsilon_1)} \quad (5)$$

где  $K=R_{T1}/R_2$  коэффициент симметрии схемы или в более упрощенном виде получим

$$U_{\text{вых}} = U_n \frac{K\varepsilon_1}{(K+1)^2} \quad (6)$$

Для мостовой измерительной схемы с учетом  $K=R_{T1}/R_2 = R_3/R_4$  имеем

$$U_{\text{вых}} = U_n \frac{K\varepsilon_1}{(K+1)(K+1+K\varepsilon_1)} \quad (7)$$

или при включении двух термодатчиков в противоположные плечи мостовой измерительной схемы существенно увеличивается его чувствительность, а выходное напряжение вычисляется по формуле:

$$U_{\text{вых}} = U_n \frac{K}{(K+1)^2} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \quad (8)$$

Для разработанного кремниевого полупроводникового термодатчика верхний температурный предел определяется температурой плавления припоя (ПОС 61 температура плавления  $180^\circ\text{C}$ ), которым припаиваются выводные электроды. Температурная чувствительность разработанных термодатчиков во всем диапазоне рабочих температур за счет симметричности вольтамперной характеристики остается неизменной. Их использование определяется требованиями к чувствительности, точности и быстродействию. Для этого необходимо выбрать термодатчик определенного вида, тип выводных проводов, материал защитного покрытия и схему включения, каждый из которых в нашем случае состоит из пяти позиций. Пример предлагаемой компоновочной таблицы (табл.7) для выбора вида датчика приведен ниже.

В результате соответствующей компоновки этих элементов получают новую структурную композицию измерительного преобразователя.

Таблица 7

## Компоновочные компоненты измерительного преобразователя

1. Вид датчика								
1.1. Цилиндрическая		1.2. Шарообразная		1.3. Кубическая				
	3	1		2	1		1	1
	4	2		2	2		2	2
	3	3		1	3		1	3
	3	4		1	4		1	4
	3	5		5	5		1	5
	3	6		1	6		1	6
	3	7		5	7		2	7
	4	8		1	8		1	8
	1	9		1	9		1	9
	4	10		2	10		1	10
1.4. Стержневая		1.5. Тонкая пленка		Показатели качества				
	2	1		4	1	Чувствительность	1	
	3	2		1	2	Стоимость	2	
	2	3		5	3	Надежность	3	
	2	4		5	4	Точность	4	
	2	5		1	5	Линейность	5	
	2	6		5	6	Диапазон	6	
	4	7		1	7	Минимум потерь	7	
	3	8		2	8	Быстродействие	8	
	1	9		1	9	Экологичность	9	
	3	10		1	10	Вес	10	

Все представленные варианты элементов измерительного преобразователя проранжированы по критериям качества: чувствительности, стоимости, надежности, точности, линейности, диапазона измерения температуры, минимальной потери, быстродействия, экономичности и весу. На рис 9а. приведен пример компоновки конструкции измерительного преобразователя по критерию “чувствительность”, которая состоит из сочетаний следующих элементов из компоновочной табл. 7: 1.3– 2.1 – 3.4 – 4.1. Наиболее «надёжная» конструкция измерительного преобразователя соответствует композиции: 1.3 – 2.1 – 3.4 – 4.5, схема которого приведена на рис. 9б.

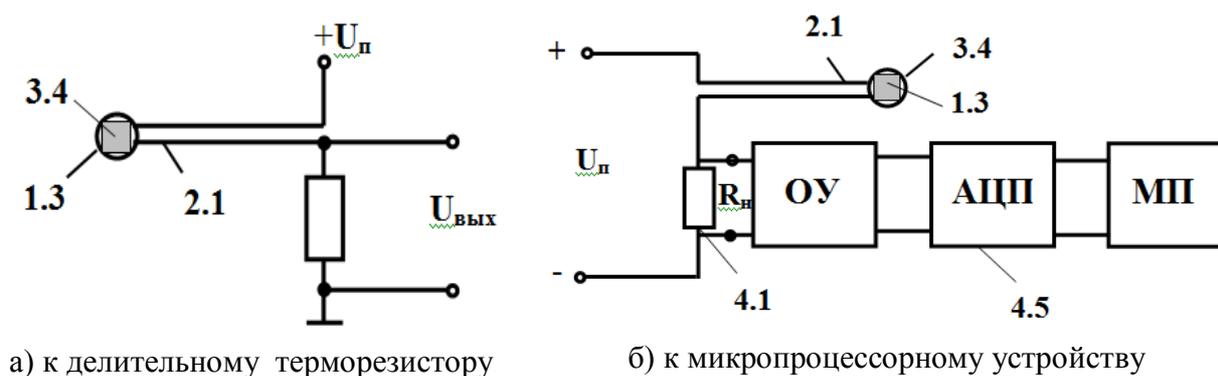


Рис. 9. Схема подключения измерительного преобразователя

Путем параметрического проектирования измерительного преобразователя найдены интервалы оптимальных параметров рабочего напряжения, корректирующих сопротивлений:

$$a_1=U_{\text{п}}=1\div 10\text{В}, a_2=K=R_1/R_2=0.1\div 2, a_3=R=10\div 160\text{Ком}, a_4=\beta=0.2\div 6\%,$$

$$a=\{a_1, a_2, a_3, a_4\}, \quad (9)$$

где  $a_1 = U_n$ ;  $a_2 = K$ ;  $a_3 = R$ ;  $a_4 = \beta$ ,

а проектированием измерительного преобразователя по критерию чувствительности и линейности статической характеристики для выбранной структуры и, следовательно, принимая статическую характеристику измерительного преобразователя в виде

$$U_{\text{вых}} = U_n \frac{K \cdot \varepsilon}{(K + 1)^2} \quad (10)$$

за счет оптимизации методом Гаусса - Зайделя получены оптимальные параметры измерительного преобразователя, представляющие собой:

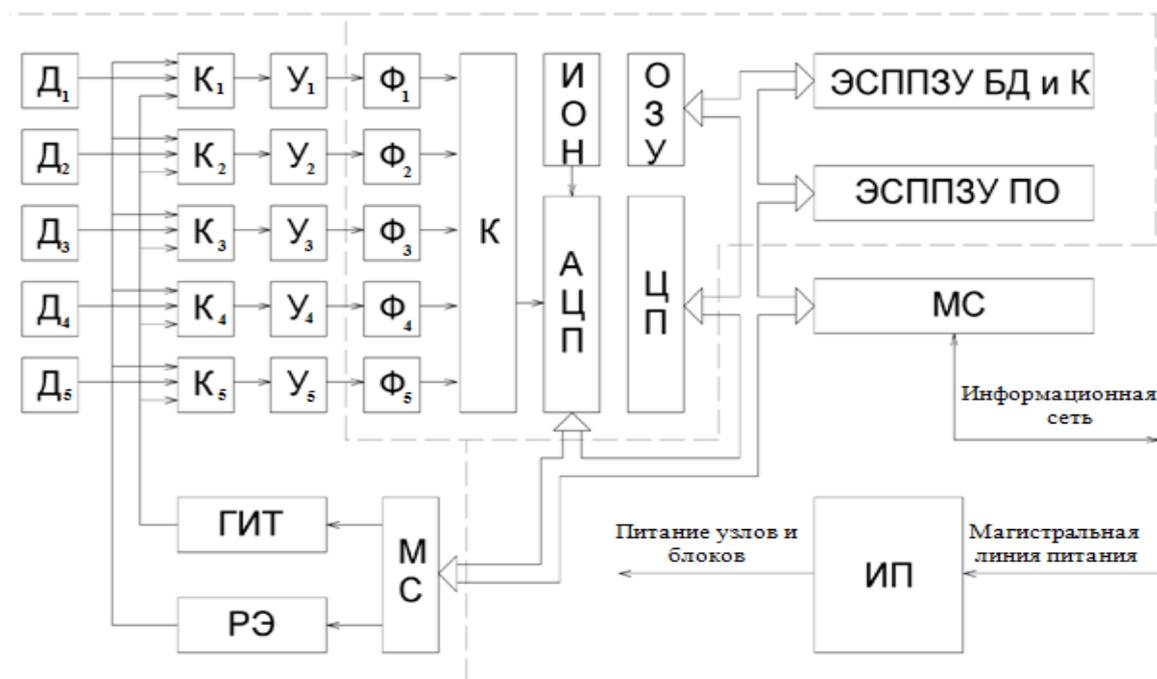
$$a_1=U_{\text{п}}=6\text{В}, a_2=K=1.4, a_3=R_g=110\text{Ком}, a_4=\beta=5.8\%.$$

Выявив область требуемых чувствительностей, линейность статических характеристик, точность и быстродействие, соответственно, нами был разработан усовершенствованный вариант нового поколения микропроцессорного прибора для измерения температуры (рис. 10), который включает блок схему входного усилителя, узел генератора тока, узлы питания и цифровую часть с микроконтроллером, который позволял получить оперативные достоверные данные о температуре поверхности, среды измерения, и о температуре в самом объекте, а также о динамике его изменения.

В структуру прибора также введены элементы, представленные частями программного кода управляющей программы прибора, которые в плане функциональности несут весьма важную роль и обуславливают вынесение их в структурной схеме прибора в отдельные блоки для удобного восприятия структурной схемы. Технические характеристики микропроцессорного измерителя температуры приведены в табл. 8.

Для выяснения бесперебойного и стабильного функционирования разработанного измерительного прибора проведена оценка его погрешностей и рассмотрены пути его уменьшения. В частности, для уменьшения погрешности, вносимой нелинейностью статической характеристики, предусмотрено ограничение диапазона, смещение начала диапазона и коррекция нелинейности с помощью микропроцессорных устройств. При этом максимальное значение погрешности количественно равно степени нелинейности определяемого по формуле:

$$\gamma_{\text{нл}} = 0.5 \frac{U_{\text{выхнл}} - U_{\text{вхнл}}}{U_{\text{выхмакс}} - U_{\text{вхмин}}} 100\% \quad (11)$$



Д-термодатчик с измерительной схемой;  $K_i$ -контроллеры ( $i=1\div 5$ ); У- усилитель;  $\Phi$ - фильтры; К-контроллер; ИОН-источник опорного напряжения; ОЗУ-оперативное запоминающее устройство; АЦП-аналого-цифровой преобразователь; ЦП-цифровой преобразователь; ИП-источник питания; МС-магистральная система; ГИТ-генератор измерительного тока; РЭ-рабочие эталоны; ЭСПЗУ ПО- электрически стираемое программируемое постоянное запоминающее устройство программного обеспечения; ЭСПЗУ БД и К-электрически стираемое программируемое постоянное запоминающее устройство буфера данных и конфигураций

**Рис. 10. Структурная схема измерительного прибора**

где  $U_{\text{выхнл}}$ ,  $U_{\text{выхл}}$ - нелинейные и линейные значения выходного сигнала измерительного преобразователя, а погрешности связанные с динамической погрешностью измерительного преобразователя в виде абсолютной

$$\Delta_A U_{\text{вых}}(\tau) = U_{\text{вых}}(\tau) - U_{\text{вых}}(\tau \rightarrow \infty) \quad (12)$$

или относительной динамической погрешности

$$\Delta_{\text{отн}} U_{\text{вых}}(\tau) = \frac{U_{\text{вых}}(\tau) - U_{\text{вых}}(\tau \rightarrow \infty)}{U_{\text{вых}}(\tau \rightarrow \infty)} 100\% \quad (13)$$

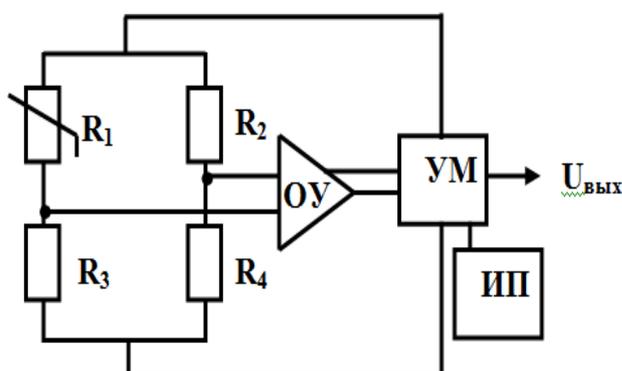
предлагается уменьшить выбором конструкции обеспечивающей уменьшение тепловой инерции, так и введения электрических корректирующих устройств.

Экспериментально показано, что введение корректирующей обратной связи с помощью операционного усилителя приводит к снижению времени переходного процесса до одного порядка, рис. 11, 12. По разработанной нами технологии можно изготавливать стандартизованные термодатчики с допусками  $\pm 0,2$  °С или  $\pm 0,1$  °С в диапазоне  $0\div 100$  °С и с меньшей точностью в области  $-60$  °С и  $+150$  °С. При этом номиналы термодатчиков изготовленных

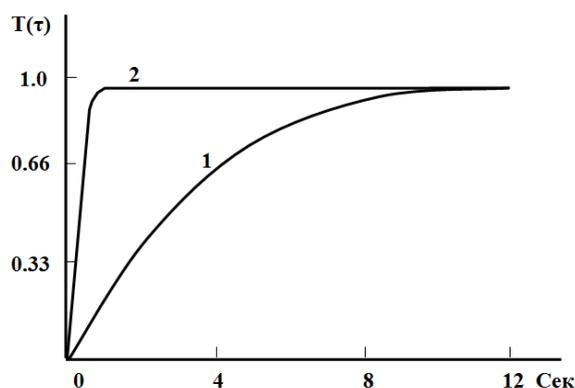
**Таблица 8**

**Технические характеристики прибора нового поколения  
микропроцессорного прибора**

Число каналов измерений	5
Диапазон измеряемой температуры, °С	-50, +200
Тип датчиков	Термодатчик Si<P,Ni >
Разрешающая способность, °С	0,2; 1;2
Средняя наработка на отказ, час	Не менее 3000
Время установления рабочего режима, сек	не более 3
Габаритные размеры корпуса, мм	96 x 50 x 110
Масса, кг	не более 0,4
Средний срок службы, лет	10
Индикация показаний	на светодиодном дисплее, на ПК
Максимальный период опроса всех каналов, с	8
Программное обеспечение	Под Windows
Допустимая температура эксплуатации, °С	-10+50
Атмосферное давление, кПа	80-107
Относительная влажность при температуре 35 °С	не более 80 %
Точность	$\pm(0,4\% \text{ Тизм.} + 1 \text{ К})^1$
Воспроизводимость	$\pm(0,4\% \text{ Тизм.} + 1 \text{ К})^1$
Разрешение	1°С
Пределы допускаемой основной погрешности измерения температуры в диапазоне температур от 0 °С до 100 °С при измерениях с использованием индивидуальных статических характеристик (ИСХ) термодатчика, °С	$\pm 0,05$
Пределы допускаемой погрешности в диапазонах температур от -50 °С до 0 °С и от 100 °С до 200 °С при измерениях с использованием ИСХ термодатчика, °С	$\pm 0,1$
Пределы допускаемой дополнительной погрешности, обусловленной отклонением температуры окружающего воздуха от нормальной области значений ( $20 \pm 5$ ) °С при измерении температур от 0 °С до 100 °С с использованием ИСХ термодатчика, °С	$\pm 0,05$



**Рис. 11. Схема коррекции динамической погрешности измерительного преобразователя с обратной связью**



1-без коррекции; 2- с цепью обратной связи

**Рис. 12. Переходные процессы в измерительном преобразователе с термодатчиком**

по разработанной технологии (при 25 °С) составляют соответственно: 100÷500 Ом; 1÷300 килоом и 1 мегаом. Среди них термодатчики с большими номиналами взаимозаменяемы для различных изготовителей и имеют разброс номинальных сопротивлений не более ±5%.

При изготовлении партии полупроводниковых термодатчиков в количестве 1000 штук разброс номинальных сопротивлений не превышал ±5%.

**В приложении** диссертации приведены методика измерения, статической обработки и программное обеспечение алгоритма управления измерительного прибора, а также созданы листинг основного файла программы.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

На основе проведенных исследований по докторской диссертации на тему «Разработка термодатчика на основе кремния с нанокластерами атомов никеля и его технологии изготовления» представлены следующие выводы:

1. Предложен новый способ процесса диффузии никеля в кремний, заключающийся в проведении процесса диффузии в режиме нарастания температуры со скоростью 5÷10 градус/минут в интервале температур 600÷1250 °С обеспечивающий получение нанокластеров никеля в объеме кремния.

2. Для получения омического контакта с улучшенной адгезией к поверхности кремния, в объем которого проведена диффузия никеля, предложено произвести осаждение тонкого слоя (3 мкм) металла никеля химическим способом с последующей термообработкой при 650 градусах Цельсия в течение 10 минут.

3. Впервые предложены принципы создания термодатчика на основе кремния с нанокластерами никеля обладающего высокой чувствительностью (7800 К) и стабильностью выходных характеристик, предложен технологический маршрут его изготовления.

4. Показано, что при воздействии гамма излучением дозой  $10^6$  рентген удельное сопротивление легированных никелем кремниевых термодатчиков остается неизменным, а по мере увеличения дозы облучения до  $10^8$  рентген коэффициент температурной чувствительности увеличивается на 10%.

5. Путем компьютерного моделирования в зависимости от требуемого фактора (чувствительности, стоимости, точности, надежности и т.д.) предложены методы структурного параметрического проектирования измерительного преобразователя позволяющие выбрать соответствующую форму датчика, контактные выводы, защитный слой датчика и параметры измерительной схемы.

6. Установлена взаимосвязь между корректирующими (линеаризующими измерительный параметр) сопротивлениями и чувствительностью термодатчика, позволяющая выявить область максимальной чувствительности датчика в электронной схеме.

7. Выявлена возможность снижения погрешностей датчиков температуры от 10% до 2% обусловленных нелинейностью их статических характе-

ристик и тепловой инерционностью путем выбора корректирующих сопротивлений и интервала температуры в требуемой окрестности.



**SCIENTIFIC COUNCIL ON AWARD OF SCIENTIFIC DEGREE OF  
DOCTOR OF SCIENCES 16.07.2013.FM/T.12.01 at PHYSICAL-  
TECHNICAL INSTITUTE AND SAMARKAND STATE UNIVERSITY**

---

**TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY**

**NASRIDDINOV SAYFILLO SAIDOVICH**

**THE DEVELOPMENT OF SILICON-BASED TEMPERATURE  
SENSOR WITH NICKEL NANOCLUSTERS OF ATOMS  
AND TECHNOLOGY OF ITS MANUFACTURE**

**01.04.10 – Physics of semiconductors (technical sciences)**

**ABSTRACT OF DOCTORAL DISSERTATION**

**Tashkent – 2016 year**

**Subject doctoral dissertation is registered in the Higher Attestation Commission under the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan in 28.04.2016/ B.2016.2T.323.**

The doctoral dissertation carried out at the Tashkent State Technical University.

Abstract of the dissertation in three languages (Uzbek, Russian and English) is available on the web page of the Scientific Council at **fti- kengash.uz** and educational and informational-portal "ZiyoNet" in address **www. ziyonet.uz**

**Scientific consultant:** **Egamberdiev Bahrom Egamberdievich**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

**Official Reviewers:** **Muminov Ramizulla Abdullayevich**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Academician of Uzbekistan Academy of Science

**Abdukadirov Mukhitdin Abdurashidovich**  
Doctor of Technical Sciences, Professor

**Aliyev Rayimdjan**  
Doctor of Technical Sciences, Professor

**Lead organization:** **Fergana polytechnical institute**

Protection will be held " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2016y in \_\_\_\_ hours at a meeting of the Scientific Council of 16.07.2013.FM / T .12.01 at the Physico-Technical Institute and Samarkand State University at the following address: 100084, g.Tashkent Str. Bodomzor Yuli - 2b.Tel / Fax.: (Contacts: +99871) 235-42-91, an e-mail address: [lutp@uzsci.net](mailto:lutp@uzsci.net).

Doctoral thesis registered at the Information Resource Center of Physical-Technical Institute of the number 04, which can be found in the IRC at: 100084, g.Tashkent Str. Bodomzor Yuli - 2b. Tel / Fax.: (+99871) 235-30-41.

Abstract of the dissertation sent to " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2016y  
(distribution protocol \_\_\_\_ of \_\_\_\_\_ 2016y

**S.L.Lutpullaev**  
Chairman of the Scientific Council for the award of the degree of Doctor of Science, Doctor of science, professor

**A.V.Karimov**  
Scientific secretary of the scientific council of the disposable to award the degree of Doctor of Science, Ph.D.

**I.G.Atabaev**  
Chairman single scientific seminar of the Scientific Council to award the degree of Doctor of Science, Doctor of science, professor

## **Introduction (annotation of doctoral dissertation)**

**Topicality and demand of the subject of dissertation.** Currently, one of the important physical and technical problems in dynamically developing directions of electronic computing and information technology is developing temperature sensors with improved functional characteristics on the basis of modified semiconductors, in particular with nanoclusters used for diagnosing various parameters and processes in industry, nuclear reactors, scientific researches and other areas of the national economy.

The study of the interrelationship of electro-physical parameters of the active region of silicon thermistors containing nanocluster inclusions of different atoms with their operational parameters allows revealing their previously unknown new technical solutions. Improving the active region, increasing the sensitivity and solving the problem of reducing the spread of the parameters, as well as developing the technology of producing a new generation of temperature sensors on the basis of materials with nanoclusters, which provide temperature measurement at different control conditions, are an important direction of researches.

The use of temperature sensors belonging to the class of semiconductor devices based on materials with nanoclusters in devices and systems of control of parameters of industrial facilities requires researching the ways to improve their sensitivity and switch schemes. Therefore, the studies conducted on the diffusion processes of various nanoinclusions, as well as the effects on the features of thermistors of nanocluster inclusions aimed at optimizing the functional parameters of thermistors are urgent.

This research is aimed at developing a new method of diffusion that provides the formation of nanoinclusions, as well as the choice of parameters of the material of a base, and developing the ways of obtaining contacts with improved adhesion, which are directed to the manufacture of temperature sensors with stable parameters. The need for the improvement of the functional characteristics of such temperature sensors, development of cost-effective technologies for their manufacturing and creation of a route of this technology has great scientific and practical importance.

This dissertation in the certain degree serves to perform the tasks assigned for the improvement of the competitiveness of the electronic products mentioned in the Decree PD-1442 of the President of Uzbekistan “On the priorities of industrial development of the Republic of Uzbekistan in 2011 – 2015” of 15 December 2010, as well as in other regulatory documents adopted in this field.

**Relevance of the research to the priority areas of science and technology development of the republic.** The research was carried out in accordance with the priority direction III. “Power engineering, energy and resource conservation, transport, mechanical engineering and instrument making; the development of modern electronics, microelectronics, photonics, electronic instrument making” of science and technology development of the Republic of Uzbekistan.

**Review of international scientific researches on the subject of dissertation<sup>1</sup>.** Overview of international scientific research on topic of the dissertation. Research questions of the theory and practice of thermometry carried out in the leading centers and universities, including American scientists F. Meyzda and A.A. Volinsky, and Chinese researchers M. Shao and N. Zhano. Pay attention to the work of scientists V.V. Sakhin, A.A. Shekhurdin on the use of microprocessors in temperature measurement devices, as well-known companies, such as Hewlett-Packard (England), Analog Devices (USA) and Oméga (Germany) are being developed temperature sensors and devices for different purposes.

In the field of producing temperature measurement gauges on the basis of various semiconductor materials, a number of scientific and practical results were obtained throughout the world. Such companies as Volvo, Siemens (Germany), Philips (the Netherlands) and ITT Components Group (UK) manufactured silicon temperature sensors with a positive temperature factor, and the company Rodan Industries Inc., Texas Instruments (USA) developed the technology of manufacturing temperature sensors intended for different purposes.

At present, scientific and practical results were obtained on the development of relatively cheap temperature sensors based on silicon technology with optimal parameters, which meet modern requirements for sensitivity, substituting the integrated sensors intended for controlling the conventional technological processes, as well as on the enhancement of their functional features.

**Degree of study of problem.** So far, a significant contribution has been made to the development of the theory and practice of heat-sensitive elements by a number of scientists, including: V.S. Gromov, N.P. Udalov, A.I. Krivonosov, Y.V. Zaitsev, I.L. Rotbert, I.T. Sheftel and G. Vigleb. They contributed to supplying the market with a variety of temperature sensors, including measuring and converting devices for different temperature ranges. However, narrow temperature range, and inability to work in extreme conditions are peculiar to semiconductor temperature sensors. Therefore, the creation of a new generation of temperature sensors and measurement converters that record the temperature in a wide range and preserve the stability parameters in harsh conditions is urgent and defines the demand for them.

However semiconducting thermal sensor peculiar narrow temperature range and an inability to work in extreme conditions. Therefore, the creation of a new generation of temperature sensors and measurement converters that record the

---

<sup>1</sup> Review of international scientific researches on the subject of dissertation Is carried out on a basis the review of the international scientific researches on a subject of the dissertation is carried out (spent) on a basis Мейзда Ф. / Электронные измерительные приборы и методы измерений: Пер. с англ. - М.: Мир, 1990. – С.250-335. Alex A. Volinsky and Lev Ginzburgsky. / Irradiated cubic single crystal SiC as a high temperature sensor. 2003 Materials Research Society Fall Meeting. С. 273-278. Zhano N, Fu HW, Shao M, Li HD, Liu YG, Qiao XG. Research on high sensitivity temperature sensor based on Mach-Zehnder interferometer with waist-enlarged fiber bitapers. // Guang Pu Xue Yu Guang Pu Fen Xi, 2014 Jun;34(6):1722-6. Сахин В.В., Шалимов В.П. Теплопередача // БГТУ, СПб. 2003. С. 120-135. Шехурдин А.А. Использование оптоэлектронных систем с кварцевыми монолитными световодами в АСУ ТП промышленных печей // Автоматизация в промышленности. 2007. №4. С.23-24 and other sources.

temperature in a wide range and preserve the stability parameters in harsh conditions is urgent and defines the demand for them.

At present, great attention is paid to the development of the digital technology and means of electronic communication, which require sensors with digital output signals. Outstanding scientists like E.I. Svetkov and A.M. Melik-Shakhnazarov studied the issues of application of microprocessors in temperature measurement devices. Y.V. Gulyaev proposed the new principles of building sensors on the basis of surface acoustic waves used in the manufacture of passive temperature sensors with record sensitivity compared to the known analogues. In this respect, it should be noted that the optimization of the parameters of temperature sensors are linked with the initial material and technology of its manufacture. The traditional diffusion methods used for making temperature sensors on the basis of silicon have exhausted their possibilities, instead, creating a new technology of forming nanoinclusions, nanocomplexes and nanoclusters in the semiconductor matrix is very promising. In this direction, the scientists of Uzbekistan, in particular, the school of M.K. Bahadir Khanov, creating a new way of diffusion of transition metals, contributed to the improvement of the technology of obtaining nanocluster materials that can serve as a basic technology for creating temperature sensors with high-operating temperature (above 120 ° Celsius) and sensitivity. Together with a number of scientists, the school of M.S. Yunusov created the technology of thermoradiation doping of silicon and founded the direction of radiation physics of semiconductors. The group of Professor B.E. Egamberdiev developed the principles of creating multichannel measurement temperature converters on the basis of temperature sensors.

The abovementioned suggest that there is a need for the solution of the problems of developing the physical and technological aspects of formation of structures with silicon based nanoinclusions, and improving the diffusion processes providing controlled incorporation of admixtures into the silicon matrix, aimed at the integral choice of a temperature sensor design, as well as obtaining the optimal combination of their parameters with technological processes. Besides, the problems of ensuring the stability of their parameters have scientific and practical values.

**Connection of the dissertational research with the plans of scientific-research works.** The dissertation was performed in TSTU within the framework of the State Programs P-10.19 “Development and creation of a fundamentally new class of sensors of physical quantities (temperature, magnetic field, pressure, infrared radiation, humidity, radiation)” (2010-2012), ID6-022 “Development of a multi-channel device for remote temperature control of agricultural products” (2008-2010).

**The aim of the research** is to develop methods for obtaining a new diffusion technology for highly sensitive temperature sensors with nickel nanoclusters and develop on their basis a set of temperature sensors and devices with stable parameters and are resistant to different types of effects for temperature control systems of objects.

**The tasks of the research:**

developing a method of nickel diffusion with orderly embedded nano-inclusions in silicon;

implementing the technology of obtaining highly doped region for ohmic contacts to silicon structures;

developing a technological route of manufacturing of temperature sensors on the basis of compensated silicon with nanoclusters;

studying the impact of radiation exposure on the operational characteristics of temperature sensors based on silicon, doped with nickel;

choosing a competitive device as a sensor for various indications taking into account the features of the desired inclusions;

evaluating and compensating the error of the temperature measuring device based on the temperature sensor.

**The objects of the research** are  $n^+ - n - n^+$  silicon structures with nano-inclusions that are manufactured through diffusion technologies, and measurement transducers based on them.

**The subjects of the research** are the technological processes of diffusion doping of silicon with nickel, models of identification of operational parameters of the measuring transducer system on the basis of the temperature sensor, technology for obtaining ohmic contacts with improved adhesion to the semiconductor surface.

**Method of research.** In the dissertation, we used complex informative methods of experimental physics: volt-ampere, four-probe method, and measurement method by the Hall effect, scanning electronic microscopy, method of electronic and probe microanalysis, method of diffraction of slow and fast electrons, theory of errors.

**Scientific novelty of the research** is as follows:

A method of nickel diffusion with embedded nano-inclusions in silicon was worked out, which consists of three steps, that is in each stage the temperature ranges (300÷600; 600÷900; 900÷1200 °C) within which the temperature is risen consistently at a speed of 5 degrees/min, is maintained for 10 minutes and then is cooled at a speed of 100 degrees/sec.

A technology was created for obtaining a highly-doped layer for ohmic contacts to silicon structure doped with nickel, which means that a metal layer of nickel is deposited on the surface of the silicon structure by chemical means and is subjected to thermal treatment at 650°C for 10 minutes.

For the first time, a temperature sensor with high sensitivity (7800 K) and stability of output characteristics was developed on the basis of silicon nanoclusters and a technological route of its production was proposed.

It was experimentally shown that the introduction of the correction feedback with the help of the operational amplifier leads to the reduction of the transient time of the temperature sensor by one time;

It was experimentally shown that the specific resistance of silicon temperature sensors doped with nickel with a carrier concentration of more than  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  changes slightly when exposed to gamma radiation dose of  $10^6$

roentgens, i.e. remains stable at radiation influence, and in samples with a carrier concentration of less than  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$  at doses  $(5 \div 10) \cdot 10^6$  roentgens, conductivity type inversion ( $n \rightarrow p$ ) occurs.

A method of optimal structural parametrical designing of a measuring transducer based on the temperature sensor was proposed by computer simulation that allows to choose the form, output contacts, protective layer and parameters of the measuring system, in accordance with the required parameters (sensitivity, linearity of static characteristics, speed, etc.).

By choosing the required boundary interval of temperature, the possibility of reducing the errors of temperature sensors was determined, which are characterized by thermal inertia and nonlinearity of static natures.

**Practical results of the research** are as follows:

A method of diffusion of nickel into the silicon was developed in temperature rise mode ensuring the formation of stable nanoclusters in bulk, and on their basis, the technology of manufacturing temperature sensors was developed for measuring the temperature over a wide temperature range from -100 to 180 degrees Celsius.

Technical solutions were found that allow creating microprocessor measuring circuits for measuring the temperature of various objects from a distance.

**The reliability of the research results** is confirmed by the use of modern scientific and technological methods, standard and proven methods of control parameters and characteristics of semiconductor devices. The results and conclusions are justified on physical performances based on theoretical and experimental data. The reliability of the experimental data is provided by the use of complex independent techniques of data measurement and processing, as well as their compliance with modern concepts of physics and technology of semiconductors and products based on them.

**Theoretical and practical significance of the research results.**

The theoretical significance of the researches lies in the fact that the creation of nanoclusters of nickel atoms in silicon by diffusion doping and comprehensive study of their impact on the electrical properties of silicon are of scientific interest to expand the notions of the structure and properties of compensated materials.

The practical significance of the work is in the fact that the improved diffusion technology allows a targeted modification of the properties of semiconductor materials and, on their basis, obtaining temperature-sensitive structures of sensors intended for use in devices and control systems of the parameters of different objects.

**Implementation of the research results.** Received the patent for "temperature sensor" with a wide operating range ( $-40 \div 180 \text{ }^\circ \text{C}$ ) (UZ IAP 04,778 from 29.11.2013y.) property of the Republic of Uzbekistan. Designed temperature sensor allows to control the temperature of the industrial equipment, research facilities and various household purpose devices and entities;

by open Joint Stock Company «FOTON» manufactured a parti of temperature sensors differing by it's parameters stability and resistance to external

influences. This device was successfully applied to store germination of cotton seeds with meeting the requirements in cotton recruitment Centers of Kashkadarya region (FAQ Joint Stock Company «FOTON» on June 30, 2016y.). As a result of the introduction of devices ensured the sustainability and stability of the temperature sensor parameters to external influences;

the five-channel microprocessor-based on temperature measurement device used to control to temperature in buildings where stored grain. (FAQ Open Joint Stock Company "Galla-Alteg" on July 04, 2016y.). Implementation of device gave stable conditions for the storage of crops to ensure the safety of their quality, preventing spoilage of grain.

**Testing of the research results.** The results of the dissertation were reported and discussed at international and republican conferences: “8th International Conference Solid State Physics” (Almaty, 2004); “Geotechnology: Innovative Methods of Subsoil Use in the 21st Century” (Moscow-Navoi, 2007); “Growth, Properties and Applications of Crystals” (Andijan, 2008); “Integration of Education, Science and Industry” (Moscow, 2008); “Kazakhstan in the New World and the Problems of the National Education” (Chimkent, 2008); “Science and Industry” (Zhetysai, 2009); “Silicon-2010” (Nizhny Novgorod, 2010); “Fundamental and Applied Questions of Physics” (Tashkent, 2010); “Innovative Development of Uzbekistan in the View of the Youth” (Tashkent, 2010); “Fundamentals of Photoelectric and Thermal Physics of Solar Energy Conversion” (Fergana, 2011); “Optical and Photoelectric Phenomena in Semiconductor Micro and Nanostructures” (Fergana, 2011); “Nanotechnology and Renewable Energy Sources: Problems and Solutions” (Karshi, 2012).

The main results of the dissertation were reported and discussed at a joint workshop of Tashkent State Technical University (28 May 2016), as well as one-time Scientific Seminar (10 June 2016) under the Scientific Council 16.07.2013.FM/T.12.01 at the Physical and Technical Institute and Samarkand State University on award of the degree of doctor of sciences in the specialty 01.04.10-Physics of Semiconductors (engineering sciences).

**Publication of the research results.** A total of 28 scientific works were published on the materials of the dissertation, including 14 articles (of these 4 in English), 1 book (monography), 12 conferences proceedings and 1 patent for the invention.

**Structure and volume of the dissertation.** The dissertation is presented on 200 pages, consisting of an introduction, five chapters, conclusions, and a list of 112 references and 2 appendixes. The dissertation contains 76 figures and 26 tables.

## MAIN CONTENT OF DISSERTATION

**In the introduction** the topicality and relevance of the theme of the dissertation were justified, its conformity to the priority directions of science and technology development of the republic was shown, a review of international researches on the topic of the dissertation was provided, the degree of study of the problem, the aims, tasks as well as the objects and subjects of the dissertation were formulated, the scientific novelty, the reliability of the obtained results, their theoretical and practical significance were disclosed, a summary of the implementation and announcement of the research results and the structure of the dissertation were given.

The first chapter of the dissertation titled **“The condition of the problems and trends to improve the technology of manufacturing semiconductor structures with nanoclusters”** presents an overview of the published data on the state of the problem and trends to improve the functional characteristics of temperature sensors, depending on its manufacturing technology, as well as identifies the schematic and technological ways to improve the electrical parameters. We formulated the problem on the basis of the analysis of available theoretical and experimental data.

In the second chapter **“Development of a method of doping silicon with nickel atoms”**, the technological stages of obtaining silicon doped by thermal diffusion of nickel and the processes of ordered distribution of nano-impurities in bulk silicon are given.

As is known<sup>1</sup>, it is possible to obtain nickel nanoclusters in silicon by applying a diffusion process followed by rapid cooling. At the same time, the size of nanoclusters from 10 to 900 nm can be controlled by varying diffusion temperatures from 750 to 1050 degrees Celsius, as well as changing the cooling rate. On the basis of this fact we have studied the effect of the temperature range and cooling rate on the formation of nickel clusters in silicon.

As is known, it is possible to obtain nickel nanoclusters in silicon by applying a diffusion process followed by rapid cooling. At the same time, the size of nanoclusters from 10 to 900 nm can be controlled by varying diffusion temperatures from 750 to 1050 degrees Celsius, as well as changing the cooling rate. On the basis of this fact we have studied the effect of the temperature range and cooling rate on the formation of nickel clusters in silicon.

Based on the study of diffusion processes of transition metal impurities in silicon at various cooling speeds  $10 \div 10^4$  deg/sec, it was established that the concentration of electrically active atoms in them is practically independent of the cooling rate.

In order to obtain nanoclusters in bulk silicon, which raise its temperature sensitivity, the nickel diffusion process in silicon was carried out in the diffusion furnace in a mode of increasing temperature at a speed of  $5 \div 7$  C/min in

---

<sup>1</sup> F. Riedel, W. Schöter. Electrical and structural properties of nanoscale NiSi<sub>2</sub> precipitates in silicon // Phys. Rev. B., 2000. – Vol. 62. – № 11– pp. 7150-7156.

temperature intervals of 700÷1250 °C. Heating the silicon with the initial temperature created the condition for thermal annealing of unstable centres. The diffusion temperature was controlled by the platinum-rhodium platinum thermocouple located directly next to the ampoule. The increasing heating was carried out for 110 minutes, then after achieving the maximal temperature, it was maintained for 10 minutes after which the ampoule with samples was removed from the furnace and thrown into the water, which provided a high cooling rate  $V=100\div300$  °C/sec and an ordered distribution of nanoclusters in bulk.

To make ohmic contact with improved adhesion on the silicon surface, where the nickel diffusion was conducted, deposition of a thin layer (3 microns) of nickel metal was made with a chemical process followed by heat treatment at 650 degrees Celsius for 10 minutes.

The comparison of the parameters of the designed temperature sensors with known analogues showed that the dependence of their resistances on the temperature both in positive and negative temperatures, in contrast to known analogues obey the law, and the temperature coefficient has high values (Table 1).

**Table 1**

Parameters of silicon temperature sensors  
(1x1x0,5 mm<sup>3</sup>) with nanoclusters nickel

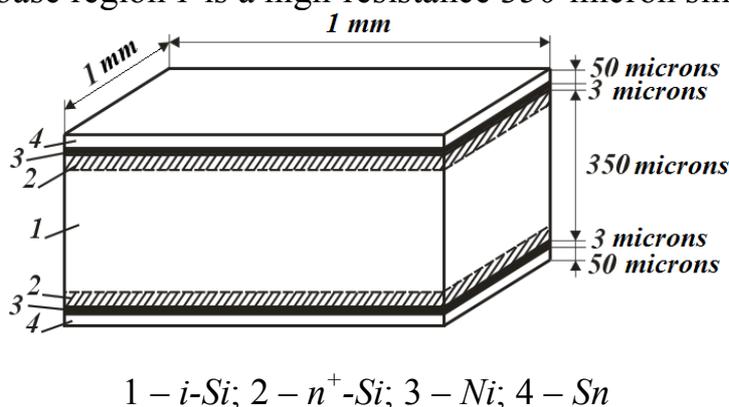
No	$\rho$ , ohms·cm	B, K	T, °C
1	$3 \cdot 10^2$	4600	-60÷120
2	$3 \cdot 10^3$	6250	-60÷130
3	$2 \cdot 10^4$	7000	-70÷140
4	$10^5$	7200	-80÷150
5	$6 \cdot 10^5$	7300	-100÷160
Cobalt-manganese thermistors -1	$22 \cdot 10^3 \div 1 \cdot 10^6$	3600÷7200	-60÷180
Copper-manganese thermistors -1	$1 \cdot 10^3 \div 220 \cdot 10^3$	2030÷4300	-60÷125
Copper-manganese thermistors -6	$10 \cdot 10^3 \div 100 \cdot 10^3$	2060÷4300	-60÷125

Developed for the first time the technology of making a silicon temperature sensor with  $n^+ - n - n^+$ -structure includes conducting diffusion of nickel in the silicon crystal with a specific resistance of 40÷60 ohms·cm  $n$ -type conductivity in an increasing temperature mode, the formation of heavily doped regions of  $n^+$ -type conductivity by diffusion from chemically deposited nickel, followed by annealing and deposition of 50 microns thick tin sublayer, and cutting the silicon wafer on discrete elements of an area of 1 mm<sup>2</sup> and soldering current collecting wire terminals. Unlike the analogue, the improvement of adhesion of ohmic contact to the silicon surface by thermal annealing in vacuum, prevents the spread parameters of temperature sensors in both directions, providing the linearity of current characteristics.

In the third chapter titled “**Development of the technology of making a temperature sensor based on silicon doped with nickel**”, the choice of the base area parameters of the temperature sensor with  $n^+ - i - n^+$ -structure is substantiated,

the processes of getting for them ohmic contacts, hermetization, technological route of making, static and dynamic characteristics, as well as the reliability are given.

The temperature sensor containing a heat-sensitive high-resistance *i*-region on the basis of monocrystalline silicon and equipped with electrical contacts is characterized by the fact that the *i*-region is contained between the two heavily doped  $n^+$ -regions performed by alloying the metal atoms to form a structure of  $n^+ - i - n^+$ , while the outer surface of each  $n^+$ -region is nickeled and forms an ohmic transition between the  $n^+$ -region and corresponding electrical contact, and tin layers are introduced between the nickel-plated surfaces and electrical terminals. The structure of the proposed temperature sensor is shown in Fig. 1, where the base region 1 is a high-resistance 350-micron silicon doped with nickel.



1 – *i*-Si; 2 –  $n^+$ -Si; 3 – Ni; 4 – Sn

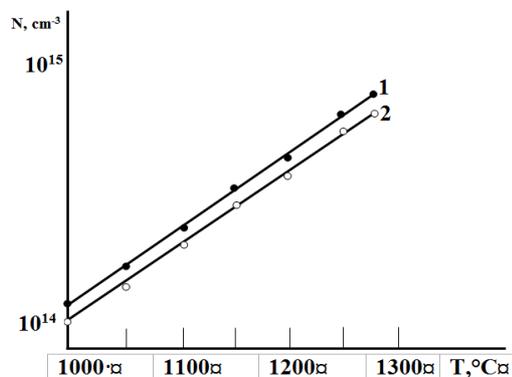
**Fig. 1. The structure of the proposed temperature sensor**

On its both surfaces, low-resistant heavily doped regions 2 of  $n^+$ -type of 2-micron thickness are formed, the top of which are deposited by chemical means with 3-micron thick nickel layers 3 serving as the basis of ohmic contacts. To facilitate the soldering of the current collecting wire terminals over nickel, a tin layer of 50-micron thickness was deposited.

sited.

The choice of industrial monocrystalline silicon of *n*-type conductivity with a specific resistance of  $\rho = 10 \div 100$  ohms·cm as a material of the base area of the temperature sensor is due to the possibility of managing the concentration of electroactive nickel atoms introduced into it (Fig. 2) and the operating temperature range. In this process, the nickel diffusion in the silicon was done with an increasing temperature mode, the final value of which coincided with the fixed temperature of the conventional technology.

That is, in the conventional technology, the test samples placed in ampules are fixed in an oven with dialled finite diffusion temperature, and the diffusion time was 2 hours. The concentration of the electroactive nickel atoms therein was approximately 7÷10% smaller (Curve 2) than in the samples obtained in the mode with increasing temperature (Curve 1). The advantage of the nickel diffusion in an increasing temperature mode is in that in this case, to obtain the desired carrier concentration, the diffu-



1-increasing diffusion mode  
2-diffusion at a predetermined temperature

**Fig.2. Dependence of the electroactive concentration on the**

sion process requires twice less time. According to the calculations, when the diffusion coefficient is  $D_{Ni}=2.3 \cdot 10^{-3} \exp(-0.47/kT)$  cm<sup>2</sup>/s and temperature  $T=(600 \div 900)$  °C, the nickel concentration is  $N_{Ni}=1.4 \cdot 10^{25} \exp(-2.3/kT)$  cm<sup>-3</sup>, i.e., the solubility of nickel should be  $N_{Ni} \sim 10^{14}$  cm<sup>-3</sup>, and the diffusion coefficient should have a value  $D=(10^{-4} \div 10^{-7})$  cm<sup>2</sup>/s. Then, to uniformly dope the samples of 1 mm thick, it would need about  $t = l^2/D = (0/1)^2/10^{-7}=1000$  sec, i.e. it would take about  $t = 7$  hours. As for our case, the entire technological process of diffusion takes 3 hours. The concentration of nickel atoms in the bulk was  $N_{Ni} \sim 10^{14}$  cm<sup>-3</sup>, i.e. greater than expected.

It is concluded that in the mode of increasing temperature, nickel diffusion occurs along the interstices, and impurity atoms are in interstitial states, so here, the concentration of vacancies -  $N_v$  is about  $10^7$  cm<sup>-3</sup>, i.e. it is almost  $10^7 \div 10^8$  times less than the concentration of nickel atoms in the interstices.

In order to eliminate the influence of external factors such as moisture, light and instant air flow disturbances on the measurement parameters of temperature sensors, we used the potting compounds as a sealant. To eliminate the influence of the difference between the coefficients of linear expansion of the compound and temperature sensor, we put a filler in the compound, specifically, minium – lead-based paint. For the basis of potting compounds, ED-20 resin with maleic anhydride and triethanolamine was taken as hardeners.

The choice of the maleic anhydride and triethanolamine is due to the fact that the maleic anhydride allows obtaining the compounds with a low initial viscosity and high vitality. Triethanolamine was selected because of its low toxicity despite the worst technological quality of the resulting compound. The recipe for the epoxy potting compound D-2 is shown in Table 2. From the viewpoint of preventing large mechanical tension, the compound shrinkage during polymerization is very important.

**Table 2**

Recipe for the epoxy potting compound D-2

Compound	Conventional sign	Structure, weight parts					
		Resin		Hardener		Filler	
		name	quantity	name	quantity	name	quantity
Potting	D-2	ED-20	100	ma	2.28K	LM	1.5 ÷ 1.8g

Therefore, we carried out an exothermic heating at various temperatures in the polymerization process at a temperature of  $T=80$  °C for 4 hours, at  $T=120$  °C for 12 hours, at  $T=140$  °C for 24 hours. As a result, we were able to minimize the formation of mechanical tension in the hardening process of the selected epoxy resin.

The structural description of the sequence of technological processes and names of the required areas, as well as the equipment for making temperature

sensors were designed in the form of a technological route of making temperature sensors based on compensated silicon.

The possibilities of optimizing the measurement parameter of the temperature sensor in the circuit with a series parallel-connected resistors were experimentally shown and the interrelation of these parameters with the optimized circuit sensitivity was identified, which helps to ensure the measurement accuracy and reduce the errors.

$$K_{ga} = \frac{(R_1 - R_2)r_1^2}{(T_2 - T_1)(R_1 + r_1)(R_2 + r_1)} \quad (1)$$

The measured temperature is determined by the conditions of the controlled medium (gas, liquid, etc.) and has a slight deviation (Table 3), and in stationary conditions gives the true temperature.

**Table 3**

Deviation of the parameters and characteristic quantities of the temperature sensor from the nominal values

Factors	$\Delta U_{ps}/U_{ps}$	$\Delta K/K$	$\Delta R/R$	$\Delta \beta/\beta$
Environment temperature	0.06	0.05	0.01	0.001
Aging of the material	0	0	0.1	0.01
Given error	0.05	0.05	0.01	0.01

The reliability of the temperature sensor in relation to permanent failures with destabilizing factors in the error of not more than 1.0% is 0.966.

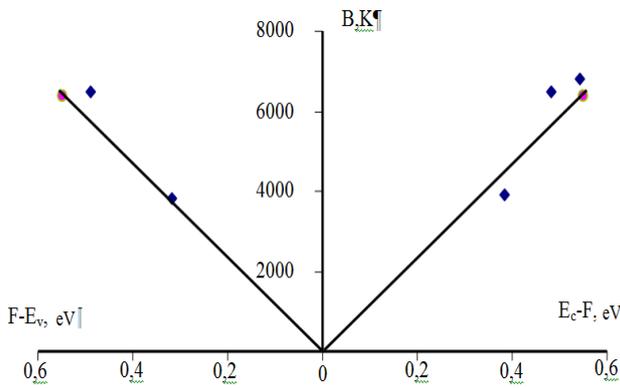
$$\Delta S_{max} / S_{max} = 0,45 \quad (2)$$

$$P = \Phi\left(\frac{\Delta S_{max}}{\sigma_s}\right) - \Phi\left(-\frac{\Delta S_{max}}{\sigma_s}\right) = \Phi\left(\frac{1}{0,45}\right) - \Phi\left(-\frac{1}{0,45}\right) = 0,966 \quad (3)$$

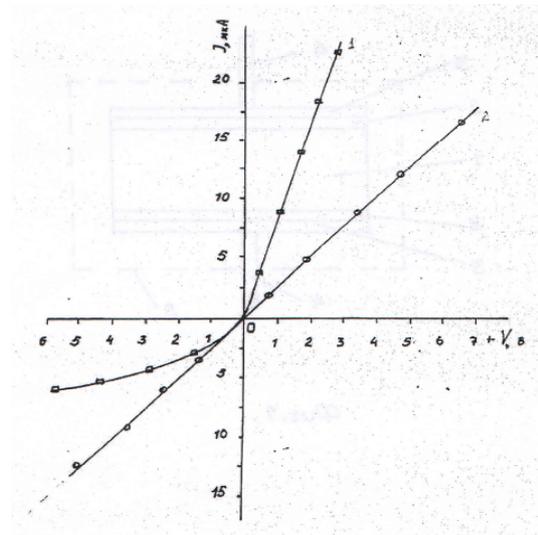
The fourth chapter titled “**The study of the characteristic parameters of temperature sensors**” is dedicated to the research methodology of the parameters and characteristics of the developed temperature sensors, the study of the electrical and main characteristic parameters, as well as the effect of  $\gamma$ -irradiation and vibration on their performance.

The main characteristics of temperature sensors are the coefficient of temperature sensitivity and temperature coefficient of resistance; the range of temperature measurement and speed were measured using a standard experimental setup. The measurements were performed in the processing chamber by raising the temperature of the incoming water from the thermostat in the increments of 2÷3 °C per minute, and freezing temperatures were created with liquid nitrogen. On the basis of the measured and calculated data, we established the interrelation of the coefficient of temperature sensitivity with the depth of the Fermi level given by the occurrence of a specific resistance of the temperature sensor base determined with

an accuracy of 10%. That is, the closer is the Fermi level to the middle of the bandgap, the higher is the coefficient of temperature sensitivity (Fig. 3).

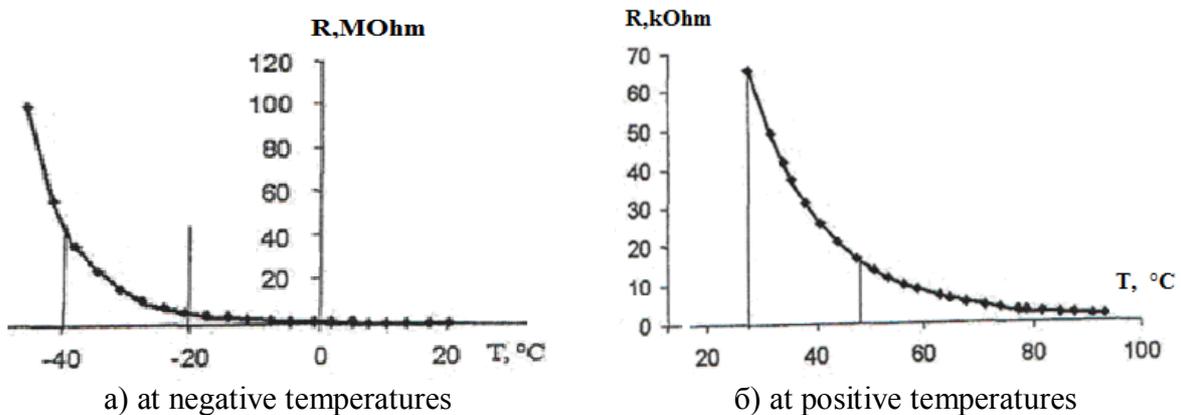


**Fig. 3. Dependence of the coefficient of temperature sensitivity on the depth of the energy level of the Fermi in compensated silicon *p*- and *n*-type conductivity**



**Fig. 4. Volt-ampere characteristics of the temperature sensor**  
1- known; 2- proposed

It was experimentally shown that the proposed temperature sensors, unlike the known, have linear dependence of volt-ampere characteristics in both directions (Fig. 4) that provides the same temperature sensitivity resistance over the entire operating temperature range (Fig. 5). Hermetization of temperature sensors helps to eliminate the influence of light radiation and pulse oscillation of



**Fig. 5. Dependence of the resistance of the temperature sensor doped with nickel on temperature**

the flow of the surrounding atmosphere on the volt-ampere characteristics, thereby increasing the stability of output parameters at low supply of voltages (Fig. 6), and the highest values of resistivity of the base region help to reduce the measurement errors, excluding the impact of the connecting cable resistance on the measurement results.

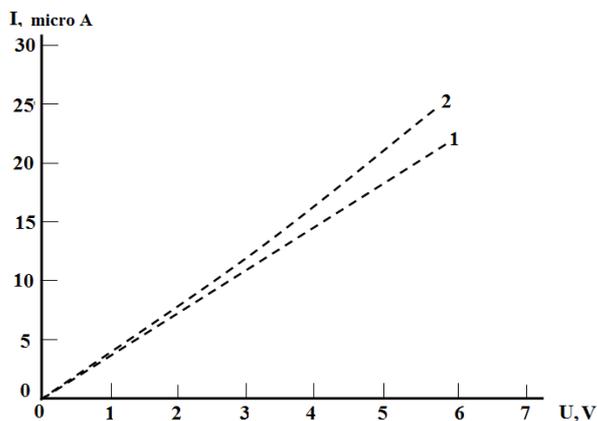
Another difference of the developed temperature sensors ( $1 \times 1 \times 0.5 \text{ mm}^3$ ) is in that with the increasing resistivity of the base of the temperature sensor its temperature sensitivity and working temperature range expand (Table 4).

**Table 4**

Parameters of silicon temperature sensors with nickel nanoclusters

$\rho$ , ohms·cm	$3 \cdot 10^2$	$3 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^4$	$10^5$	$6 \cdot 10^5$
B, K	4600	6250	7000	7200	7300
T, °C	-60÷120	-60÷130	-70÷140	-80÷150	-100÷160

The comparative analysis of the main characteristics of the developed semiconductor temperature sensors with existing analogues (KMT-1, MTM-1,



**Fig. 6.**  
**Volt-ampere characteristics of**  
**temperature sensors based on n-**  
**Si<S> with  $\rho=105$  ohms·cm**  
**(T=300 K)**

1 - without hermetization;  
 2 - with hermetization

MTM-6 ST6) shows that (Table 5) with such indicators as resistivity, temperature range, temperature sensitivity and constant time the developed semiconductor temperature sensors have the best performance.

**Table 5**

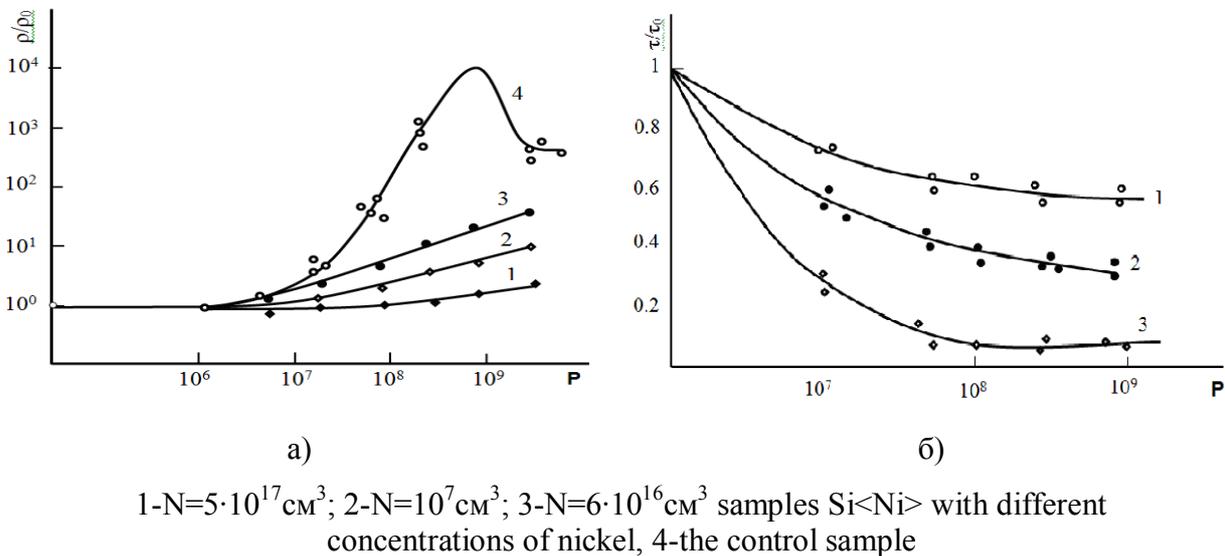
Comparative data of operational characteristics of the developed temperature sensors \*

Type of the temperature sensor	Specific resistivity, ohm	Temperature measurement range, °C	Temperature sensitivity, V	Constant time, sec.
Si<P,Ni>	$3 \cdot 10^2 \div 1 \cdot 10^6$	-80÷150	4600÷7200	5
Cobaltmanganese thermistors -1	$22 \cdot 10^3 \div 1 \cdot 10^6$	-60÷180	3600÷7200	85
Coppermanganese thermistors -1	$1 \cdot 10^3 \div 220 \cdot 10^3$	-60÷125	2030÷4300	85
Copper-manganese thermistors -6	$10 \cdot 10^3 \div 100 \cdot 10^3$	-60÷125	2060÷4300	35
CT3-6	$6,8 \cdot 10^3 \div 8,2 \cdot 10^3$	-90÷125	1200÷2400	35
p-i-n diode	$1,2 \cdot 10^3 \div 6 \cdot 10^3$	-60÷150	$2.3 \text{ mV} \cdot \text{K}^{-1}$	12

\* If the developed temperature sensor works in a thermally conductive medium, such as a liquid, the constant time will decrease.

It was experimentally established that, in contrast to the control sample on silicon, the specific resistivity of the developed temperature sensors for a wide range of the carrier concentrations ( $10^{16} \div 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ) or with a specific resistivity of  $0.1 \div 1.0$  ohms·cm varies slightly when exposed to radiation to a dose of  $10^9$  P, and the lifetime is reduced, helping to the increase of the speed (5÷7 sec.) (Fig. 7).

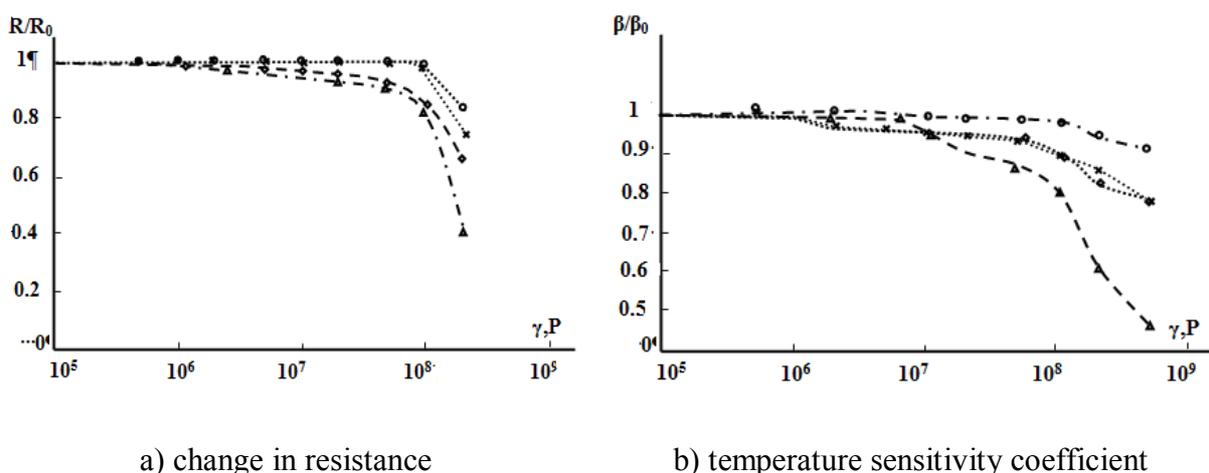
For the temperature sensors with a higher ohmic resistance  $(1\div 5)10^5$  ohms or with a specific resistivity  $\rho \sim 10$  ohms·cm, the coefficient of temperature sensitivity (B) and speed under irradiation to a dose of  $F=10^8$ P practically does not change, and further worsening of these parameters is observed. At higher doses of  $F > 10^8$ P, the parameters of temperature sensors and the state of hermetization gradually get



**Fig. 7. Relative change of specific resistivity (a) and lifetime of current carriers (b) from the dose  $\gamma$ -irradiation**

worse. With the increase of the radiation dose to  $F \sim 10^9$ P, all the parameters worsen at 25÷30% (Fig. 8).

Accordingly, the lower is the concentration of impurity atoms, the more is the temperature sensor resistance and higher is the radiation resistance. Thus, in this dosage range, the reliability and ohmicness of electrical contact practically remain unchanged.



**Fig. 8. Effect of gamma irradiation on the characteristic parameters of temperature sensors**

The main parameters of the developed temperature sensors and the dependence of the condition of their hermetization on the radiation dose are given in Table 6.

It was revealed that the developed temperature sensors based on silicon with nanoclusters of nickel atoms do not only have sufficiently high sensitivity and speed, but also have a sufficiently high radiation resistance, and can be used in conditions of high radiation level. The increase of the coefficient of temperature sensitivity at high doses of radiation opens the possibility of creating a temperature sensor for the remote control of the temperature of various objects located at both usual and radiation exposure conditions.

**Table 6**

Impact of  $\gamma$  irradiation ( $\text{Co}^{60}$ ) on the operating parameters and hermetization condition of temperature sensors based on Si<P, Ni>

Irradiation dose, P												
Sensitivity and recovery time	$10^5$		$10^6$		$10^7$		$5 \cdot 10^7$		$10^8$		$5 \cdot 10^8$	
	B, K	$\tau$ , sec.	B, K	$\tau$ , sec.	B, K	$\tau$ , sec.	B, K	$\tau$ , sec.	B, K	$\tau$ , sec.	B, K	$\tau$ , sec.
	6800	5÷7	6800	5÷7	6750	5÷7	6700	5÷7	6650	5÷7	6600	5÷7
	7000	5÷7	7000	5÷7	6950	5÷7	6900	5÷7	6850	5÷7	6800	5÷7
7200	5÷7	7200	5÷7	7150	5÷7	7100	5÷7	7050	5÷7	7000	5÷7	
Hermetization condition	no changes		no changes		no changes		colour changed		destruction		complete destruction	

The fifth chapter titled “**Development of the temperature measuring transducer on the basis of the temperature sensor**” is devoted to the study of the basic parameters of measuring transducers, their structural and parametric design, taking into account the sensitivity criterion, linearity of static characteristics and accuracy, as well as the development of a five-channel device on the basis of the measuring transducer, the study of the error sources of the measuring transducer and the development of the methods of their compensation.

Depending on the sensitivity and resistance of the temperature sensor, they are switched with a divider resistor, a bridge circuit and with two temperature sensors.

For the dividing measuring circuit, the output voltage  $U_{out}$  is equal to

$$U_{out} = Un \frac{R_{T1}}{R_{T1} + R_2} \quad (4)$$

When the temperature changes, the resistance of the measuring transducer  $R_{T1}$  changes to  $R_{T1}\varepsilon_1$  and equals

$$R_{T1}(1+\varepsilon_1),$$

where  $\varepsilon = \Delta R_g / R_g$

and the output voltage is determined by

$$U_{out} = U_{ps} \frac{K}{(K+1)} - U_{ps} \frac{\varepsilon_1}{(K+1+K\varepsilon_1)} \quad (5)$$

where  $K=R_{T1}/R_2$  symmetry coefficient of the circuit or in a simplified form, we obtain

$$U_{out} = U_{ps} \frac{K\varepsilon_1}{(K+1)^2} \quad (6)$$

For bridge measuring circuit based on  $K=R_{T1}/R_2= R_3/R_4$  we have

$$U_{out} = U_{ps} \frac{K\varepsilon_1}{(K+1)(K+1+K\varepsilon_1)} \quad (7)$$

or when the two temperature sensors are included in the opposite arms of a bridge measuring circuit, its sensitivity significantly increases, and the output voltage is calculated as follows:

$$U_{out} = U_{ps} \frac{K}{(K+1)^2} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \quad (8)$$

For the developed silicon semiconductor temperature sensor, the upper temperature limit is determined by the solder melting point (Tin-lead solder 61 melting point 180°C), with which lead-out electrodes are soldered. The temperature sensitivity of the developed temperature sensors around the operating temperature range due to the symmetry of the volt-ampere characteristics remains unchanged. Their use is determined by the requirements for sensitivity, precision and speed. This requires choosing a certain type of the temperature sensor, type of lead wires, protective coating material and incorporating circuitry, each of which in our case consists of five positions. An example of the proposed table for the choice of the sensor type is shown below.

As a result of a corresponding arrangement of these elements, a new structural composition of the measuring transducer can be obtained. All the presented options of the elements of the measuring transducer are arranged by quality criteria: sensitivity, cost, reliability, accuracy, linearity, temperature measuring range, minimum loss, speed, economical efficiency and weight. In Fig. 9a, an example of the design of the measuring transducer is given for the “sensitivity” criterion, which consists of the following combinations of the elements from Table 7: 1.3 – 2.1 – 3.4 – 4.1. The most “reliable” design of the measuring transducer corresponds to the composition: 1.3 – 2.1 – 3.4 – 4.5, the circuit of which is shown in Fig. 9b.

Through the parametric design of the measuring transducer, we found the optimal parameter intervals of the operating voltage, which adjust the resistance:

$$a_1=U_{ps}=1\div 10B, a_2=K=R_1/R_2=0.1\div 2, a_3=R=10\div 160k\text{ohms}, a_4=\beta=0.2\div 6\%,$$

$$a=\{a_1, a_2, a_3, a_4\}, \quad (9)$$

where  $a_1 = U_{ps}$ ;  $a_2 = K$ ;  $a_3 = R$ ;  $a_4 = \beta$ ,

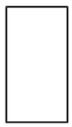
and by designing the measuring transducer according to the criteria for

sensitivity and linearity of static characteristics for the selected structure and, therefore, taking the static characteristics of the measuring transducer in the form:

$$U_{out} = U_{ps} \frac{K \cdot \varepsilon}{(K + 1)^2} \quad (10)$$

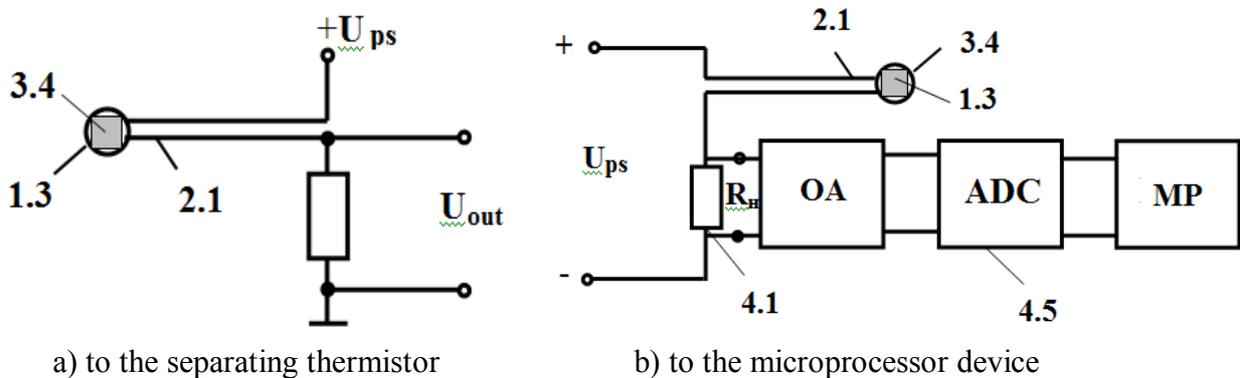
**Table 7**

Components of the measuring transducer

1. Sensor type								
1.1. Cylindrical		1.2. Spherical		1.3. Cubic				
	3	1		2	1		1	1
	4	2		2	2		2	2
	3	3		1	3		1	3
	3	4		1	4		1	4
	3	5		5	5		1	5
	3	6		1	6		1	6
	3	7		5	7		2	7
	4	8		1	8		1	8
	1	9		1	9		1	9
	4	10		2	10		1	10
1.4. Rod		1.5. Thin film		Quality indicators				
	2	1		4	1	Sensitivity	1	
	3	2		1	2	Cost	2	
	2	3		5	3	Reliability	3	
	2	4		5	4	Accuracy	4	
	2	5		1	5	Linearity	5	
	2	6		5	6	Temp. measuring range	6	
	4	7		1	7	Minimum losses W	7	
	3	8		2	8	Speed	8	
	1	9		1	9	Economical efficiency	9	
	3	10		1	10	Weight	10	

by optimizing with Gauss-Seidel method, we obtained the optimal parameters of the measuring transducer, which are:

$$a_1=U_{ps}=6B, a_2=K=1.4, a_3=R_g=110k\text{ohms}, a_4=\beta=5.8\%.$$

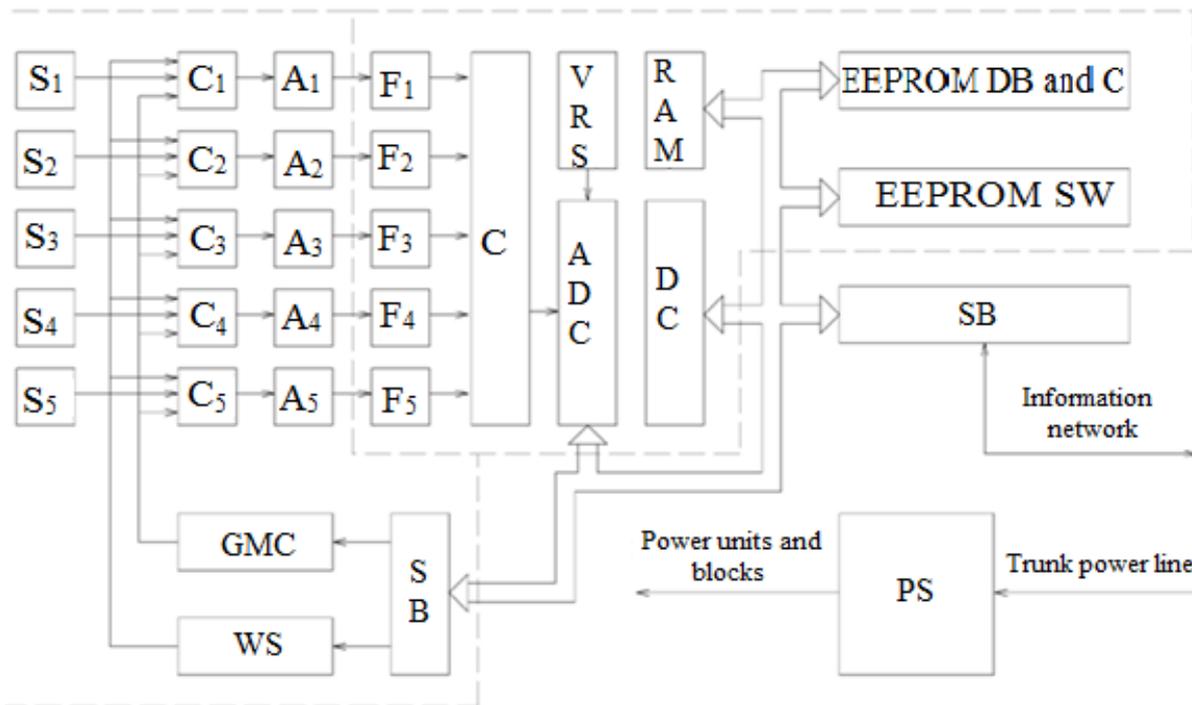


**Fig. 9. Wiring of the measuring transducer**

By revealing the areas of the required sensitivity, linearity of static characteristics, accuracy and speed, respectively, we have developed an improved

version of the new generation of the microprocessor device for measuring the temperature (Fig. 10), which includes a circuit block of the input amplifier, power generator unit, power supply units and digital part with the microcontroller, which allowed obtaining operative reliable data on the temperature of the surface, measurement medium and temperatures in the object, as well as the dynamics of its change.

We also introduced in the device structure the elements that represent parts of the code control unit program, which in terms of functionality play a very important role and include them in the block diagram of the device in separate blocks for easy perception of the block diagram.



S-temperature sensor with a measuring circuit; C<sub>i</sub>-controllers (i=1÷5); A-amplifier; F-filters; C-controller; VRS-voltage reference source; RAM-Random Access Memory; ADC-analogue-to-digital converter; DC-digital converter; PS-power supply; SB-system bus; GMC-generator of measuring current; WS-working standards; EEPROM SW- Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory software; EEPROM DB and C Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory data buffer and configurations

**Fig. 10. Structural diagram of the measuring device**

The technical specifications of the microprocessor temperature measure are shown in Table 8.

In order to ascertain the smooth and stable operation of the developed measuring instrument, we assessed its errors and considered the ways to reduce it. In particular, to reduce the errors introduced by the nonlinearity of static characteristics, we provided the range limit, the displacement of the range and nonlinearity correction using microprocessor units. The maximum value of the error is quantitatively equal to the degree of the nonlinearity, which is determined by the formula:

$$\gamma_{nl} = 0.5 \frac{U_{outnl} - U_{outl}}{U_{out \max} - U_{ent \min}} 100\% \quad (11)$$

where  $U_{outnl}$ ,  $U_{outl}$ - nonlinear and linear values of the output signal of the measuring transducer, and the errors associated with the dynamic error of the measuring transducer are in the form of absolute

$$\Delta_A U_{out}(\tau) = U_{out}(\tau) - U_{out}(\tau \rightarrow \infty) \quad (12)$$

or relative dynamic error

$$\Delta_{rel} U_{out}(\tau) = \frac{U_{out}(\tau) - U_{out}(\tau \rightarrow \infty)}{U_{out}(\tau \rightarrow \infty)} 100\% \quad (13)$$

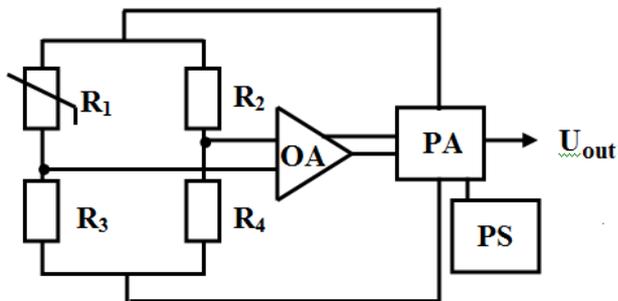
**Table 8**

Technical characteristics of the new generation microprocessor device

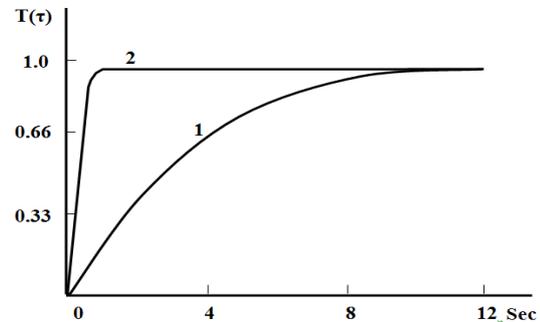
Number of measuring channels	5
Range of measured temperature, °C	-50, +200
Type of sensors	temp.sensor Si<P,Ni >
Resolution, °C	0.2; 1;2
Mean time to failure, hour	not less than 3000
Operation mode setup time, sec.	no more than 3
Mounting dimensions, mm	96 x 50 x 110
Weight, kg	no more than 0.4
Average life, years	10
Display readings	on the LED display, on the PC
Maximal period of a survey of all the channels, sec.	8
Software	for Windows
Permissible operating temperature, °C	-10+50
Atmospheric pressure, kPa	80-107
Relative humidity at 35 °C	no more than 80%
Accuracy	$\pm(0.4\% T_{ch} + 1 K)^1$
Repeatability	$\pm(0.4\% T_{ch} + 1 K)^1$
Resolution	1°C
Limits of allowable main error of temperature measurements in the temperature range from 0 °C to 100 °C in the measurements using the individual static characteristics (ISC) of the temperature sensor, °C	$\pm 0.05$
Limits of allowable errors in the temperature range from -50 °C to 0 °C and from 100 °C to 200 °C in the measurements using the ISC of the temperature sensor, °C	$\pm 0.1$
Limits of allowable additional error due to the deviation of the ambient temperature from the normal range of values $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$ in the measurement of temperatures from 0 °C to 100 °C using the ISC of the temperature sensor, °C	$\pm 0.05$

It is proposed to reduce the design choice, providing the reduction of thermal inertia, as well as the introduction of the electrical corrective devices.

It is experimentally shown that the introduction of the corrective feed-back using the operational amplifier leads to the reduction of the transient process time to one Fig. 11, 12. According to the technology developed by us, standardized temperature sensors can be manufactured with tolerances of  $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$  or  $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  in the range of  $0\div 100\text{ }^{\circ}\text{C}$  and with less accuracy in the area of  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



**Fig. 11. The scheme of dynamic error correction of the measuring transducer with feedback**



1- without correction; 2- with the feedback circuit  
**Fig. 12. Transitional processes in the temperature transducer with a temperature sensor**

Thus, the denominations of the temperature sensors made according to the developed technology (at  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) are respectively:  $100\div 500$  ohms;  $1\div 300$  kilohms and 1 megohms. Among them, the temperature sensors with large denominations are interchangeable for different manufacturers and have a variation nominal resistance less than  $\pm 5\%$ .

When a consignment of semiconductor temperature sensors was made in the amount of 1000 pieces, the nominal resistance variation did not exceed  $\pm 5\%$ .

**In the appendix** of the dissertation, the method of measuring, static processing and software algorithm for the control of measuring devices are presented, as well as the listing of the main program file is created.

## CONCLUSION

On the basis of the conducted researches on the theme of the doctoral dissertation “Development of a silicon-based temperature sensor with the nanoclusters of nickel atoms and its manufacturing technology”, the following conclusions are presented:

1. A new method of nickel diffusion in silicon was proposed, consisting in carrying out a diffusion in an increasing temperature mode at a speed of  $5\div 10$  degrees/minute in the temperature intervals of  $600\div 1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ , which provides obtaining nickel nanoclusters in bulk silicon.

2. In order to obtain an ohmic contact with improved adhesion to the silicon surface, on which a diffusion of nickel was performed, we propose to make the deposition of a thin layer (3 microns) of nickel metal with a chemical process followed by heat treatment at 650 degrees Celsius for 10 minutes.

3. For the first time the principles of creating a silicon-based temperature sensor with nickel nanoclusters having a high sensitivity (7800 K) and stability of

output characteristics, and a technological route of its manufacturing were proposed.

4. It was proved that when exposed to gamma radiation with a dose of  $10^6$  roentgens, the specific resistivity of the silicon temperature sensors doped with nickel remains unchanged, and with the increase of the radiation dose up to  $10^8$  roentgens, the coefficient of the temperature sensitivity increases by 10%.

5. By means of computer modeling, depending on the desired factor (sensitivity, cost, accuracy, reliability, etc.), methods of structural parametric design of the measuring transducer allowing to select the proper form of the sensor, contact terminals, a protective layer of the sensor and parameters of the measuring system were proposed.

6. The relationship was established between the corrective (linearized measurement parameter) resistances and the sensitivity of the temperature sensor, which allowed revealing the area of maximal sensitivity of the sensor in the electronic circuit.

7. By selecting the corrective resistances and a temperature interval in the required vicinity, the possibility of reducing the errors of temperature sensors from 10% up to 2%, was revealed, which is conditioned by the nonlinearity of their static characteristics and thermal inertia.

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

**I бўлим (I часть; I part)**

1. Эгамбердиев Б.Э., Бахадирхонов М.К. Насриддинов С.С. / Наноструктурные полупроводниковые терморезисторные датчики «Шарк», Тошкент. 2013 157 бет.
2. Патент РУз № IAP 04778 от 10.10.2013. Расмий ахборотнома, №11. 29.11.2013 // Термодатчик. Бахадирхонов М.К., Эгамбердиев Б.Э., Насриддинов С.С., Зикриллаев Н.Ф., Валиев С.А.
3. Насриддинов С.С. / Разработка методов компенсации погрешностей измерительных преобразователей на основе полупроводниковых датчиков. // Журнал. Проблемы энерго и ресурсоснабжения. Тошкент. 2015г.,1-2, с.198-204. [05.00.00, №21]
4. Насриддинов С.С. / Методика проектирования измерительных преобразователей с полупроводниковыми датчиками на основе материалов с нанокластерами атомов никеля. // Ҳалқаро илмий-техникавий журнал. Кимёвий технология назорат ва бошқарув. Тошкент. 3/2012, -С. 34-39. [05.00.00, №12]
5. Насриддинов С.С. / Методика исследования параметров и характеристик полупроводниковых термодатчиков. // Тош ДТУ хабарлари. Тошкент. 1-2/2012, -С. 29-34. [05.00.00, №16]
6. Эгамбердиев Б.Э., Насриддинов С.С., Зикриллаев Н.Ф. / Источники погрешности измерительных преобразователей на основе полупроводниковых датчиков и разработка методов их компенсации. // Ҳалқаро илмий-техникавий журнал. Кимёвий технология. Назорат ва бошқарув. 2/2012, -С. 30-35. [05.00.00, №12]
7. Rysbaev A.S., Tashatov A.K., Dzhuraev Sh.X., Khuzhaniyazov Zh. B., Arzikulov G., Nasriddinov S.S. / On New Two-Dimensional Structures Produced on the Si (111) and Si (100) Surface upon Molecular-Beam Epitaxy of Cobalt and Silicon. // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron techniques, 2011, Vol.5, No.6, -P.1193-1196. [№11, Springer, IF=0.359]
8. Эгамбердиев Б.Э., / Насриддинов С.С. Многоканальный прибор для дистанционного контроля температуры объектов. // Журнал. Проблема энерго и ресурсоснабжение. Тошкент.1-2 /2011,-С.172-175. [05.00.00, №21]
9. Насриддинов С.С. / Структура прибора для измерения температуры с помощью датчика на основе кремния с нанокластерами никеля. // Журнал. Проблема энерго и ресурсоснабжение. Тошкент. 3-4/2011, -С.145-150. [05.00.00, №21]
10. Эгамбердиев Б.Э., Насриддинов С.С. / Исследование термодатчиков на основе Si<P, Ni> при экстремальных условиях Ҳалқаро илмий-техникавий журнал. // Кимёвий технология. Назорат ва бошқарув. Тошкент. 2010 й. № 3 (33), -С.54-56. [05.00.00, №12]

11. Bakhadyrkhanov M.K., Valiev S.A., Egamov U., Nasriddinov S.S. / Features of Thermal Properties of Strongly Compensated Si<B,Mn> // InorganicMaterials, 2009, V.45, No.11, -P.1210-1212. [№11, Springer, IF=0.556]
12. Насриддинов С.С. / Анализ методов измерения температуры. / Вестник ТашГТУ, Ташкент. 1-2/2009, -С.23-27 [05.00.00, №16]
13. Зикриллаев Н.Ф., Тачилин С.А., Валиев С.А., Отахонов А.С., Рашидов А., Насриддинов С.С. / Прибор для дистанционного одновременного контроля температуры нескольких объектов. // Кимё технология назорат ва бошқарув. Ташкент. 1/2008, -С. 59-60. [05.00.00, №12]
14. Насриддинов С.С., Тачилин С.А., Валиев С.А., Отахонов А.С. / Прибор для дистанционного одновременного измерения температуры нескольких объектов // Вестник ТашГТУ, Ташкент. 3/2007, -С. 37-40. [05.00.00, №16]
15. Bakhadyrkhanov M.K., Valiev S.A., Tachilin S.A., Nasriddinov S.S. / Sensitive thermosensors on the bases of highly compensated silicon. // Surface Engineering and Applied Electrochemistry, 2007, Vol.43, No.6, -P. 505-507. [№11, Springer, IF=0.289]
16. Normuradov M.T., Tashatov A.K., Rysbaev A.S., Nasriddinov S.S., Khuzhaniyazov Zh.B., Yldashev Yu.Yu., Kholikov Yu.D. / Variations in the Electronics Structure of the Silicon Near-Surface Region during Implantation of Phosphorus and Boron Ions. // Journal of Communications Technology and Electronics, 2007, Vol.52, No.8, P. 898-900., [№11, Springer, IF=0.388]

### **II бўлим (II часть; II part)**

17. Насриддинов С.С. / Исследование термодатчиков на основе Si<P,Ni> // Журнал Нано-электронная физика. Киев. Том 7, 3 03037 (5cc) 2015г.
18. Насриддинов С.С. / Технология получения термодатчика с нанокластерами атомов никеля. // Журнал Нано-электронная физика. Киев. Том 5, 4,04001 (3cc) 2013г
19. Tashmatov N.Azimbaev N.Kalandarov P., Nasriddinov S.S. / The multifunction heat sensor of level. // Advanced science open access journal, ISSUE 5, December 2012, ISSN 2219-746X, P. 96-100.
20. Эгамбердиев Б.Э., Насриддинов С.С., Валиев С.А. / Разработка нового способа диффузионного легирования для формирования нанокластеров примесных атомов никеля Республика илмий-амалий анжуман материаллари. Қарши. 2012, -С. 40-42.
21. Бахадирхонов М.К., Эгамбердиев Б.Э., Насриддинов С.С., Абдурахманов Б.А. / Высокочувствительный термодатчик для дистанционного контроля температуры объектов. // 2-Международная конференция по оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро и наноструктурах. Фергана. 8-9-сентябрь 2011, -С. 293-295.
22. Рысбаев А.С., Хужаниязов Ж.Б., Насриддинов С.С., Арзикулов Г.П., Рахимов А. / Гетероструктурных переходов BaSi-Si, NaSi-Si. // Республика илмий-техник конференцияси материаллари. Фаргона. 2011, -С. 66-68.

23. Насриддинов С.С. / Термодатчик на основе кремния с нанокластерами атомов никеля Узбекистоннинг инновацион тараккиёти-ёшлар нигоҳида. Ташкент. 2010, УзНУ, -С.155-158.
24. Эгамбердиев Б.Э., Насриддинов С.С., Атаханов А.С. / Терморезисторы на основе кремния с кластерами атомов никеля Материалы меж. конференции. // Фундаментальные и прикладные вопросы физики. Ташкент. 24-25-ноября, 2010, -С. 309-310.
25. Аюпов К.С. Эгамбердиев Б.Э., Насриддинов С.С., Исамов С., Саттаров О.Э. / Датчики температуры и магнитного поля на основе кремния с нанокластерами атомов марганца и никеля. // Тезиси док. 7-Международной конференции «Кремний-2010» Нижний новгород, 6-9 июля 2010, -С.187.
26. Аюпов К.С., Илиев Х.М., Валиев С.А., Тачилин С.А. / Разработка и создание прибора для дистанционного управления температурой сельхоз-продуктов. // Интеграция образования, науки и производства МГТУ Москва, 23-апреля, 2008, -С.7-9.
27. Зикриллаев Н.Ф., Насриддинов С.С., Аюпов К.С. / Хаос и самоорганизация в сильнокомпенцированном кремнии. // Республиканская научно-технической конференции «Истиклол» Москва-Навои 2007, -С. 177-179.
28. Risbaev A.S. Yuldashev Yu.Yu., Nasriddinov S.S. Djuraev Sh.H. / Thin silicide films: producing and properties. // 8-th international Conference Solid state physics. Abstracts. Almaty 2004, P. 353-354.

Автореферат “Тил ва адабиёт таълими” журнали таҳририясида  
таҳрирдан ўтказилди (12.05.2016 йил)

Босишга рухсат этилди: 08.07.2016  
Бичими 60x84 1/16, «Times New Roman»  
гарнитурда рақамли босма усулида босилди  
Шартли босма табағи 5. Адади: 100. Буюртма № \_\_\_\_\_

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

«АКАДЕМИЯ НОШИРЛИК МАРКАЗИ» ДУК

