

**O‘ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI HUZURIDAGI  
YARIMO‘TKAZGICHLAR FIZIKASI VA MIKROELEKTRONIKA  
ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR  
BERUVCHI DSs.03/30.12.2019.FM/T.01.12 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

---

**O‘ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI HUZURIDAGI  
YARIMO‘TKAZGICHLAR FIZIKASI VA MIKROELEKTRONIKA  
ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI**

**MANNANOV MUZAFFAR IBRAGIMOVICH**

**SUVNI CHUCHUKLANTIRISH TIZIMI HARORATINI NAZORAT  
QILUVCHI MIKROELEKTRON QURILMANI ISHLAB CHIQISH**

**01.04.10 – Yarimo‘tkazgichlar fizikasi**

**TEXNIKA FANLARI FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI  
(PhD) DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

**Toshkent - 2025**

**Texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)  
dissertatsiyasi avtoreferati mundarijasi**

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

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

**Mannanov Muzaffar Ibragimovich**

Suvni chuchuklantirish tizimi haroratini nazorat qiluvchi mikroelektron qurilmani ishlab chiqish..... 3

**Маннанов Музаффар Ибрагимович**

Разработка микроэлектронного устройства для контроля температуры систем опреснения воды..... 23

**Mannanov Muzaffar Ibragimovich**

Development of technology for creating ultrasensitive thermoresistive silicon structures..... 47

E'lon qilingan ishlar ro'yxati

Список опубликованных работ

List of published works..... 51

**O‘ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI HUZURIDAGI  
YARIMO‘TKAZGICHLAR FIZIKASI VA MIKROELEKTRONIKA  
ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR  
BERUVCHI DSs.03/30.12.2019.FM/T.01.12 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

---

**O‘ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI HUZURIDAGI  
YARIMO‘TKAZGICHLAR FIZIKASI VA MIKROELEKTRONIKA  
ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI**

**MANNANOV MUZAFFAR IBRAGIMOVICH**

**SUVNI CHUCHUKLANTIRISH TIZIMI HARORATINI NAZORAT  
QILUVCHI MIKROELEKTRON QURILMANI ISHLAB CHIQISH**

**01.04.10 – Yarimo‘tkazgichlar fizikasi**

**TEXNIKA FANLARI FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI  
(PhD) DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

**Toshkent – 2025**

**Texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi Oliy attestatsiya komissiyasida B2023.4.PhD/T1502 raqam bilan ro'yxatga olingan.**

Dissertatsiya O'zbekiston Milliy universiteti huzuridagi Yarimo'tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot institutida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengashning veb-sahifasida (ispm.uz) va «ZiyoNet» Axborot-ta'lim portalida (www.ziynet.uz) joylashtirilgan.

**Ilmiy rahbar:** **Qo'ldashov Obbozjon Xokimovich**  
texnika fanlari doktori, professor

**Rasmiy oponentlar:** **Tagaev Marat Baymuratovich**  
texnika fanlari doktori, professor

**Raxmonov Anvar Tojibyeovich**  
texnika fanlari doktori, professor

**Yetakchi tashkilot:** **Namangan muhandislik-qurilish instituti**

Dissertatsiya himoyasi O'zbekiston Milliy universiteti qoshidagi Yarimo'tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti huzuridagi ilmiy darajalar beruvchi DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 raqamli Ilmiy kengashning 2025 yil «27» 03 soat 10 dagi majlisida bo'lib o'tadi. (Manzil: 100057, O'zbekiston, Tashkent sh., Yangi Olmazor ko'chasi, 20-uy, Tel. (99871) 248-79-94, faks: (99871) 248-79-92, e-mail: info@ispm.uz, O'zMU huzuridagi YaFM ITI majlislar zali).

Dissertatsiya bilan Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (67 raqam bilan ro'yxatga olingan). (Manzil: 100057, O'zbekiston, Toshkent shahri, Yangi Olmazor ko'chasi, 20-uy. Tel. (99871) 248-79-59. e-mail: info@ispm.uz.).

Dissertatsiya aytoreferati 2025 yil «14» 03.2025 kuni tarqatildi.  
(2025 yil «14» 03 dagi 67 raqamli reestr bayonnomasi).



**Sh.B.Utamuradova**  
Ilmiy darajalar beruvchi  
ilmiy kengash raisi, f-m.f.d., professor

**J.J.Hamdamov**  
Ilmiy darajalar beruvchi  
ilmiy kengash ilmiy kotibi, PhD, k.i.x.

**N.A.Turgunov**  
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash  
qoshidagi ilmiy seminar raisi, f-m.f.d., professor

## **KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasining annotatsiyasi)**

**Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati.** Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahonda fan va texnika taraqqiyoti, resurslarni tejashning texnik vositalari, yoqilg'i-energetika resurslaridan oqilona foydalanish, shuningdek, ekologik muammolarni muvaffaqiyatli hal etishda yarimo'tkazgichli harorat datchiklari muhim o'rin egallamoqda. Mavjud harorat datchiklari va ularni ishlab chiqarish texnologiyasi ularning sezgirlik va tezlik imkoniyatlarini oshirishga qaratilgan.

Jahon miqyosida harorat datchiklarining tubdan yangi turilari va optimal texnologik usullarini ishlab chiqishga katta e'tibor berilmoqda. Shu munosabat bilan olimlar va ishlab chiquvchilar hozirda quyidagi ilmiy muammolarga duch kelishmoqda: harorat datchiklarining sezgirligi va tezligini oshirish; harorat datchiklarining ishlash muddatini oshirish; harorat datchiklarining ishlash jarayonini soddalashtirish; masofaviy haroratni o'lchash. Ushbu muammoni hal qilish, yaxshilangan degradatsiya xususiyatlari va parametrlarning barqarorligi, kam energiya iste'moli va o'lchamlari kichik, qo'shimcha kuchaytirish tizimlari yo'qligi, ishlash qulayligini ta'minlaydigan, universal fizik kattalik datchiklarining tubdan yangi sinfini yaratishga imkon beradi, chunki, ular tashqi ta'sirlarga juda sezgir bo'lgan fizik hodisalar asosida ishlaydi va mavjud bo'lgan datchiklarga nisbatan sezgirlik va tezlik chegarasi yuqori bo'ladi.

Respublikamizda so'ngi yillarda iste'molchilarini toza va sifatli ichimlik suv bilan ta'minlash hamda oqova suv xizmatlarini yaxshilash borasida ilmiy tadqiqot ishlari olib borilib, muhim natijalar olindi. Ayniqsa yarimo'tkazgichli datchiklar asosida suvni chuchuklantirish tizimidagi haroratni real vaqt davomida avtomatik nazorat qiluvchi mikroelektron qurilmani ishlab chiqishda Ni, Cu kirishma atomlari bilan, diffuziya usuli yordamida legirlangan n- va p- tipli kremniy namunalari asosida issiqlik datchiklarini yaratish masalalarini xal qilishga alohida e'tibor qaratilgan.

Taqdim etilayotgan dissertatsiya tadqiqoti O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi "2022–2026 yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi" farmoni PF-60 son, O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022 yil 6 iyuldagi PQ-307-son "2022-2026 yillarda O'zbekiston Respublikasining innovatsion rivojlanish strategiyasini amalga oshirish bo'yicha tashkiliy chora-tadbirlar to'g'risidagi" qarorining 6 ilovasi 386 bandi, 2017 yil 13 fevraldagi "2017–2021 yillarda elektrotexnika sanoatini rivojlantirishning ustuvor yo'nalishlari to'g'risida" PQ-2772-son hamda 2017 yil 17 fevraldagi "Fanlar akademiyasining faoliyatini, ilmiy tadqiqot ishlarini tashkil etish, boshqarish va moliyalashtirishni yanada takomillashtirish chora-tadbirlari to'g'risida"gi PQ-2789-son Qarorlari, va mazkur faoliyatga tegishli boshqa me'yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishda xizmat qiladi.

**Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining asosiy ustuvor yo'nalishlariga mosligi.** Dissertatsiya tadqiqoti respublika fan va texnologiyalarni rivojlantirishning amaliy tadqiqot dasturi III «Energetika,

energoresurs tejamkorligi, transport, mashina va asbobsozlik, zamonaviy elektronika, mikroelektronika, fotonika va elektron asbobsozligining rivojlanishi»ning ustuvor yoʻnalishlariga muvofiq bajarilgan.

**Muammoning oʻrganilganlik darajasi.** Bugungi kunga qadar haroratga sezgir yarimoʻtkazgich elementlar nazariyasining rivojlanishiga va ularni amaliyotga qoʻllashda koʻplab olimlar ilmiy-tadqiqot ishlarini olib bormoqdalar. Xususan:

Chet el olimlaridan Kofi Makinva (Niderlandiya), Devid Rufe (Shveytsariya), Pyonvon Park (Singapur), Garri Maklay (AQSh), Syu Yuysi Lan (Xitoy), Tixiro Okutani (Yaponiya) yarimoʻtkazgich materiallari asosidagi harorat datchiklar yaratdilar. Ammo yaratilgan datchiklarning oʻlchash haroratlari oraligʻi tor doirada ( $-40 \div 120$  °C) ishlashga moʻljallangan.

Rossiyalik olimlardan V.M. Glazov, V.A. Dobrovolskiy, Yu.V. Zaysev, Sheftel va G.Vigleblarning ishlarida elektron qurilmalarda harorat datchiklaridan keng foydalanishga katta eʼtibor qaratilgan. Hozirda mavjud boʻlgan haroratlarga nisbatan oʻta sezgir sirtqi akustik toʻlqinlar asosida ishlaydigan haroratlarni yaratish Rossiyalik olim, akademik Yu.V. Gulyaev va uning shogirdlari tomonidan taklif qilingan.

Oʻzbekistonda kompensatsiyalangan kremniy asosidagi harorat datchiklar yaratish boʻyicha akademiklar: M.K. Baxadirxanov, S. Zaynabidinov, professorlar: B.Egamberdiyev, M.Toshmetovlar rahbarligi ostida tadqiqotlar olib borilmoqda. Ushbu harorat datchiklarining baza sohasi yuqori qarshilikka, yaʼni  $\rho = 10^4 \div 10^5$  Om·sm boʻlib, nisbatan yuqori kuchlanishlarda ( $9 \div 12$ V) ishlaydi. p-n-oʻtishli harorat datchiklar yaratish boʻyicha esa akad. R.A. Moʻminov, professorlar: A.V. Karimov, A.Z.Raxmatov, K.P.Abduraxmonov va A.S.Risbaevlar tomonidan ilmiy tadqiqotlar olib borilgan va koʻplab yangi datchiklar yaratilgan. Ammo yaratilgan yarimoʻtkazgich materiallari asosida yaratilgan harorat datchiklari tor harorat oraligʻida ishlashga moʻljallangan boʻlib, ekstremal holatda ishlash imkoniyati cheklangan va qimmat texnologiya hisoblanadi.

Bugungi kunda olish texnologiyasi nisbatan arzon boʻlgan, sanoatning barcha jarayonlarda boshqarilishi oson va ishchi parametrlari barqaror boʻlgan, haroratni oʻlchash oraligʻi keng ( $-60 \div 180$ °C) harorat datchiklar yaratilgan hamda avtomatlashtirilgan tizimlarda ulardan foydalanish imkoniyatlari mavjud, ammo bu texnologiyalar toʻliq oʻrganilmagan.

**Tadqiqotning dissertatsiya bajarilgan ilmiy-tadqiqot muassasasi ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bogʻliqligi.** Dissertatsiya tadqiqoti Oʻzbekiston Milliy universiteti huzuridagi Yarimoʻtkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot institutining ilmiy-tadqiqot ishlari rejasining F3-2019060723 shifrlı “Oʻta yuqori sezgir yangi harorat datchik tuzilmalar asosida oʻlchov kompleksini yaratish texnologiyasini ishlab chiqish” (2020-2023) mavzusidagi amaliy loyihalar doirasida bajarilgan.

**Ishning maqsadi** Ni yoki Cu kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy monokristalli harorat datchiklarini yaratish hamda n-Si<Ni>, n-Si<Cu> datchiklari

asosida suvni chuchuklantirish tizimidagi haroratni avtomatik nazorat qiluvchi mikroelektron qurilmani ishlab chiqishdan iborat.

**Tadqiqotning vazifalari:**

Si monokristaliga Ni yoki Cu kirishma atomlarini diffuziya qilish texnologiyasini takomillashtirish;

Ni va Cu bilan legirlangan kremniy asosida qalinligi 240-250 mkm bo'lgan harorat datchiklarini tayyorlash.

Si<Ni> va Si<Cu> namunalari asosida tayyorlangan harorat datchiklarining sezgirligini oshirish.

tayyorlangan datchiklar asosida suvni chuchuklantirish tizimidagi haroratni 45÷60°C oraliklarda real vaqt davomida avtomatik nazorat qiluvchi mikroelektron qurilmani ishlab chiqish va suvni chuchuklantirish samaradorligini oshirish.

**Tadqiqot obyekti** sifatida Ni yoki Cu kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy monokristallari asosidagi harorat datchiklari va ular orqali suvni chuchuklantirish tizimi haroratini nazorat qiluvchi mikroelektron qurilma olingan.

**Tadqiqot predmeti** sifatida nikel yoki mis kirishma atomlari bilan legirlangan n- va p-tipdagi Si<Ni> va Si<Cu> namunalar olingan.

**Tadqiqot usullari.**Qo'yilgan vazifalarni amalga oshirish uchun Si<Ni> va Si<Cu> namunalarni, zamonaviy qurilmalarda xususan, to'rtzondli (Jandel MR3000) qurilmasida namunalarning solishtirma qarshilini, Xoll effekti (Ecopia HMS-7000) va Van-der-Pau metodi (Ecopia HMS-5000) yordamida zaryad tashuvchilar tipini, solishtirma qarshiligini, xarakatchiligi va konsentratsiyasi aniqlandi. Shuningdek, yuza morfologiyasi va elementar tarkibini skanerlovchi elektron mikroskop (SEM EVO MA10) da va qarshilikni haroratga bog'liq o'zgarishini (Keithley 2400) qurilmalaridan foydalanilgan holda aniqlangan.

**Tadqiqotning ilmiy yangiligi** quyidagilardan iborat:

ilk bor 240 mkm qalinlikdagi n-Si<Ni> va n-Si<Cu> namunalar asosida 25÷70°C harorat oralig'ida sezgirligi mos ravishda  $\beta_{Cu}=8200K$ ,  $\beta_{Ni}=8600K$  bo'lgan harorat datchiklari yaratilgan;

ilk bor Si asosidagi mavjud harorat datchiklarida qo'shimcha qatlam sifatida metall (nikel) kompensatordan foydalanildi. Shunda mavjud harorat datchiklarini sezgirligi 8÷10 foizga oshirishga erishilgan;

tajribalar natijasiga ko'ra harorati  $T=100^{\circ}C$  bo'lgan suv va havo muhitlarida, datchiklarini sezgirligi, suvda gaz muhitiga nisbatan 17 foizga yuqori bo'lishligi n-Si<Ni> va n-Si<Cu> datchiklarda aniqlangan;

n-Si<Ni> va n-Si<Cu> datchiklari asosida suvni chuchuklantirish qurilmasi haroratini 45÷60°C oraliklarda avtomatik nazorat qiluvchi mikroelektron qurilma ishlab chiqilgan.

**Tadqiqotning amaliy natijalari** quyidagilardan iborat:

nikel va mis bilan legirlangan kremniy monokristallarida kirishma hosil qilishning optimal texnologik sharoitlari ishlab chiqilgan;

yupqa 240 mkm qalinlikdagi n-Si<Ni> yoki n-Si<Cu> namunalar asosida sezgirligi yuqori bo'lgan harorat datchiklar yaratishning qulay texnologik sharoitlari ishlab chiqilgan;

nikel va mis bilan legirlangan kremniy datchiklar asosida suvni chuchuklantirish tizim haroratini ma'lum oraliqda real vaqt davomida avtomatik nazorat qiluvchi mikroelektron qurilma ishlab chiqildi va tuzsizlantirilgan suv olinish samaradorligini oshirishga erishilgan.

**Tadqiqot natijalarining ishonchliligi** nikel yoki mis bilan legirlangan kremniy monokristali namunalarning elektrofizik xususiyatlari, diffuziya vaqtida va undan so'ng turli tashqi omillar ta'sirida ularda yuz beruvchi fizik jarayonlarni tadqiq qilishda umumqabul qilingan standart va keng qo'llaniladigan tadqiqot usullaridan shuningdek, tayyorlangan namunalarning elektrofizik kattaliklarini o'lchashda zamonaviy Jandel MR3000 va Ecopia HMS-5000 (Van-der-Pau) o'lchash qurilmalaridan, legirlangan kremniy monokristalida hosil bo'lgan kirishma atomlari to'plamlarining sirt morfologik xususiyatlarini o'rganishda SEM EVO MA10 skanerlovchi elektron mikroskopdan foydalanilganligi bilan asoslangan.

#### **Tadqiqotning ilmiy va amaliy ahamiyati.**

Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati shundaki, olingan natijalar Si asosidagi harorat datchiklarini yartishda Ni yoki Cu kirishma atomlari bilan legirlangan n-Si<Ni> va n-Si<Cu> namunalari tayyorlashni hamda harorat ta'sirida sodir bo'ladigan hodisalar to'g'risidagi tushunchani kengaytirishga yetarlicha imkon beradi.

Tadqiqotning amaliy ahamiyati shundan iboratki, n-Si<Ni> va n-Si<Cu> asosidagi harorat datchiklarini laboratoriya sharoitida kichik seriyada tayyorlash va sho'r suvlarni chuchuklantirishda haroratni nazorat qilishda amaliyotda qo'llash imkoniyatlari ochib berilgan.

#### **Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi.**

Suvni chuchuklantirish tizimi haroratini nazorat qiluvchi mikroelektron qurilma ishlab chiqish bo'yicha olingan ilmiy natijalar asosida:

mavjud harorat datchiklarga nisbatan sezgirlik koeffitsientini 8÷10 foizga oshirish uchun ularga qo'shimcha qatlam sifatida metall (nikel) kompensatordan foydalanish natijasida 240 mkm qalinlikdagi Si<Ni> yoki Si<Cu> namunalari asosida sezgirligi mos ravishda  $\beta_{Cu}=8200K$ ,  $\beta_{Ni}=8600K$  bo'lgan harorat datchiklari yaratilganligi «FOTON» aksiyadorlik jamiyatida ikki marta ionlashgan suv haroratini  $70\pm 0.5^{\circ}C$  da o'lchash uchun qo'llanilgan. ("O'zeltexsanoat" aksiyadorlik jamoasining 2024 yil 25 martdagi № 345-sonli ma'lumotnomasi). Olingan natijalar mavjud harorat datchiklariga nisbatan ishlab chiqarish samaradorligini 3 foizga oshirish imkonini bergan.

Si<Ni> namunalari asosidagi datchiklari yordamida suvni chuchuklantirish tizimlarida haroratni avtomatik boshqarish imkonini bergan va uning samaradorligini besh foizga oshirgan hamda "Er osti suvlarini tuzsizlantirish qurilmasi" uchun O'zbekiston Respublikasi Mulk agentligining foydali modeliga patenti olingan (№FAP 02349 28.04.2023y). Ilmiy natijalardan foydalanish er osti

suvlarini tuzsizlantirish samaradorligini oshirgan hamda aholini sifatli ichimlik suv bilan ta'minlashga imkonini bergan.

### **Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi.**

Ilmiy natijalar 8 respublika va 7 xalqaro konferensiyalarda ma'ruza va muhokama qilingan.

**Tadqiqot natijalarining e'lon qilinishi.** Dissertatsiya mavzusi bo'yicha jami 24 ta ilmiy ishda, ulardan 6 tasi dissertatsiya ishlarining asosiy ilmiy natijalarini nashr etish uchun O'zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasi tomonidan tavsiya etilgan ilmiy jurnallarda, shu jamladan 2 ta maqola xorijiy xalqaro jurnallarda chop etilgan hamda foydali model uchun 1 ta patent olingan.

**Dissertatsiyaning hajmi va tuzilishi.** Dissertatsiya kirish, to'rtta bob, xulosa, va 90 nomdagi foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati, 3 ta ilova, 120 sahifa matn, 43 ta rasm va 33 ta jadvaldan iborat.

## **DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI**

**Kirish** qismida dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zaruriyati asoslangan, Respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga mosligi ko'rsatilgan, muammoning o'rganilganlik darajasi ochib berilgan, tadqiqotning maqsad va vazifalari, obykti, predmeti va uslubi tavsiflangan, tadqiqotning ilmiy yangiligi va amaliy natijalari bayon qilingan, tadqiqot natijalarini amaliyotga joriy qilish, ishning aprobatsiyasi, nashr etilgan ishlar, shuningdek dissertatsiyaning hajmi va tuzilishi xaqida ma'lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiyaning **“Yarimo'tkazgichli harorat datchiklari va ularning istiqbollari”** deb nomlangan birinchi bobida, hozirgi kunda keng foydalanilayotgan harorat datchiklarning asosiy fizik parametrlari, afzalliklari va kamchiliklari haqidagi ma'lumotlar, haroratni o'lchash, nazorat qilishda yarimo'tkazgich materiallar asosida yaratilgan harorat datchiklarning, istiqbollari bo'yicha ma'lumotlar tahlili keltirilgan. Shuningdek yarimo'tkazgichli materiallarni kirishma atomlari bilan legirlanganda kirishmaviy nuqsonlarining kremniyning elektrofizik xususiyatlariga ta'siri bo'yicha adabiyotlardagi ma'lumotlar hamda sho'r suvlarni chuchuklantirish usullari tahlillari asosida dissertatsiya ishining maqsad va vazifalari bayon etilgan.

Dissertatsiyaning **“n-Si<Ni> va n-Si<Cu> namunalar tayyorlash texnologiyasi va o'lchash usullari”** deb nomlangan ikkinchi bobida, kirishmali namunalar asosida harorat datchiklar yaratish jarayonida kremniy monokristalini mexanik kesish, mexanik va kimyoviy ishlov berish, kirishma qatlamini hosil qilish, nikel yoki mis kirishma atomlarini kremniy monokristaliga diffuziya qilish, namunalarining solishtirma qarshiligini o'lchashda to'rt zondli usuli, zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi va harakatchanligini o'lchashda Xoll effekti, Van der Pau usullari va zamonaviy qurilmalari haqida ma'lumotlar hamda n-Si<Ni> va n-Si<Cu> namunalari elektrofizik parametrlari keltirilgan.

Shuningdek, ushbu bobda n- va p-tipdagi namunalari yuzasida hosil bo'lgan kirishma atomlari to'plamlarining sirt morfologik parametrlari va kimyoviy tarkibini o'rganish usullari keltirilgan.

Kirishmali namunalar asosida harorat datchiklar yaratishda mavjud adabiyotlardagi ma'lumotlarni tahlil qilish natijasida dastlabki materiallar sifatida n va p tipdagi, solishtirma qarshiligi  $\rho \sim 5 \div 130 \text{ Om}\cdot\text{sm}$ , hajmiy kislorod konsentratsiyasi  $N_0 \sim 10^{17} \div 10^{18} \text{ sm}^{-3}$ , dislokatsiyalar zichligi  $2,6 \div 4,5 \cdot 10^{-2}$  ga teng bo'lgan hamda Choxralskiy usuli bilan o'stirilgan kremniy monokristallardan foydalanildi. Yaratilgan harorat datchiklar bir xil ishchi parametrga ega bo'lishida kremniy monokristalini kesish va unga mexanik hamda kimyoviy ishlov berish muhimligi ko'p bora ta'kidlab o'tilgan. Shuning uchun dastlab tanlab olingan kremniy monokristall quymalarini doira shaklidagi plastinalarga kesishda quyidagi usullar o'rganildi:

1. sim yordamida kesish;
2. tashqi olmos disk bilan kesish;
3. ichki olmos disk bilan kesish;

Quymalarni kesishda texnologik jihatdan eng qulayi ichki olmos kukunli disklar ekanligi aniqlandi va plastinkalar diametri  $d=0,35 \div 1 \text{ mm}$  qilib kesildi.

Kesilgan kremniy plastinkalarni avval qalinliklari mikrometr yordamida o'lchandi va qalinliklari bir xil kremniy plastinkalarga ajratib olindi va jilvirlash (shlifovka) ishlari amalga oshirildi. Kremniy plastinkalarni jilvirlash (shlifovka) stanogining qattiq yuzida shishada va donalari  $3 \div 28 \text{ mkm}$  gacha bo'lgan abraziv mikrokukunlar asosida amalga oshirildi:

jilvirlash (shlifovka) jarayoni bir necha bosqichda, mikrokukun zarralarining o'lchamini kamayib borishi bilan va bir xil og'irlikdagi toshlar (og'irligi  $5 \text{ kg}$ ) amalga oshirildi:

birinchi navbatda temir listga maxkamlangan diametri  $d=45 \text{ mm}$  bo'lgan 6 ta rezinkaga kremniy plastinkalar suv bilan namlab yopishtildi;

so'ngra shu rezinkaga mos ravishda yasalgan temir qolib kiydirildi;

jilvirlash stanogi yoqildi, odatda stanok soat strelkasi bo'ylab aylanadi;

tegishli tezlikni tanlash foydalanilayotgan poroshok markasiga va plastinkalar qalinligiga bog'lik bo'ladi;

rezinka yopishtirilgan kremniy plastinkalar bilan temir qolib stanok ustiga ko'yiladi hamda bir xilda jilvirlash uchun ustiga toshlar bostirildi;

jilvirlash (shlifovka) stanogida mahkamlangan uchta podshibniklar mavjud bo'lib, ularning vazifasi stanok ustidagi rezinka bilan yopishtirilgan kremniy plastinkalar soat strelkasiga teskari aylantirishdan iboratdir;

dastlabki jilvirlash (shlifovka) M14 karbid kremniy bilan shisha ustida  $6 \div 7$  sinf darajasi tozaligigacha amalga oshirildi. Olib tashlangan qatlam qalinligi  $25 \div 30 \text{ mkm}$  bo'lib, olib tashlash tezligi  $1,5 \text{ mkm}/\text{min}$  ni tashkil etdi;

asosiy jilvirlash (shlifovka) M10 karbid kremniy bilan shisha ustida  $8 \div 9$  sinf darajasi tozalaguncha amalga oshirildi. Bunda  $1 \text{ mkm}/\text{min}$  tezlik bilan  $15 \div 20 \text{ mkm}$  qalinlikdagi sirt olindi;

yakuniy jilvirlash M5 karbid kremniy bilan 10-sinf darajasigacha shisha oyna ustida amalga oshirildi;

bunda  $0,17 \text{ mkm}/\text{min}$  tezlik bilan  $5 \div 10 \text{ mkm}$  qalinlikdagi sirt olindi.

Olib tashlangan qatlam qalinligi kremniy plastinka kalinligiga qarab 40÷50 mkm ni tashkil etadi. Bunda kremniy plastiklari imkon qadar bir xil qalinlikka keltirildi. Bunga sabab diffuziya jarayonida kiritilayotgan kirishma atomlari bir xil chuqurlikka kirishishiga erishiladi. Jilvirlash (shlifovka) dan so‘ng dionlashtirilgan 200 gr suvga 10 gr vodorod peroksidi (60%)li aralashtirib plastinkalar solib qo‘yildi. Bu jarayon plastinkaga mikrokukunlar yopishib qolmasligi uchun bajarildi. Jilvirlash (shlifovka) jarayonidan so‘ng plastinkalar texnologik kirlardan tozalandi va kremniy plastinkalar o‘lchamlari mikrometr yordamida qayta o‘lchandi. Ya‘ni, plastina qalinligi talab etilgan qalinlikdan ±3 mkm dan katta farq qilmasligi kerak.

Namunalarga kimyoviy ishlov berish texnologiyasida quyidagi ishlar amalga oshirildi: monokristall kremniy yuzasini turli xil texnologik ifloslardan tozalash; kremniy yuzasidagi mexanik buzilgan joylarni olib tashlash; kremniy yuzasini tavsiflarini nazoratli o‘zgartirish (yuza qalinligini turg‘unlashtirish); kerakli qalinlikdagi namunalar olish uchun materialni nazoratli yemirish; p-n o‘tishni tayyor asboblarni parametrlarini boshqarishda kimyoviy yemirish; kerakli shakldagi sirt olish; kremniy plastinani kerakli o‘lchamdagi kristallarga kesish; kristall strukturasiidagi nuqsonlarni aniqlash; sirt xossalarini modifikatsiyalash; yuzadagi oksid qatlamlarni yo‘qotish va boshqalar.

Kremniy plastina sirtini tozalashda dastlab sirtida kimyoviy bog‘langan va molekulyar organik kirlar, qoldiq ionli va atomlar darajasidagi nuqsonlar ketma-ket olib tashlandi. Kremniy plastina sirtini yog‘sizlantirish organik eritmalar va spirtlar yordamida amalga oshirildi.

Ionlashmagan kirlarni (vazelin, mineral yog‘lar, parafin) va eritmalar benzol, toluol, to‘rtxlor uglerodlar yordamida olib tashlandi. Ionlashgan kirlar (oqsillar, yog‘lar, sirdagi faol moddalar) ionlashgan eritmalar uchxloretilin, aseton, metil, etil va izopril spirtlar yordamida tozalandi. Organik eritmalar va spirtlar bilan yog‘sizlantirish cho‘ktirish usuli bilan qaynoq eritmada amalga oshirildi. Bunday jarayonni qo‘llashdan maqsad, sirtini tozalayotganda qaytadan kirlanib qolishni oldini olishdir. Yuqoridagilardan tashqari kremniy plastinalar ultratovushli vanna orqali xam tozalash ishlari olib borildi.

Dastlab ultratovush vannaga 2 litr dionlashtirilgan suv qo‘yiladi. So‘ng bolalar sovunini poroshok qilib sovunli suv tayyorlanadi, kremniy plastinkalar temir (400gr) idishga solinadi hamda tayorlangan sovunli suvdan 200 gr qo‘yiladi, albatta kremniy plastinalar suvga to‘laligicha botiriladi. Shundan so‘ng ultratovush vanna yoqiladi, dastlab sovunli suvda 20 minut, so‘ng dionlashtirilgan suvda 20 minut yuviladi.

#### 1- jadval

##### Kremniy uchun HF:HNO<sub>3</sub> tarkibli eritma komponentlarining nisbatlari

Turi	Tarkibi, ml	Foydalanishdan maqsad	Ishlov berish vaqti
CP-8	HNO <sub>3</sub> - 2, HF- 1	Kimyoviy sayqallash	1-2 min.
CP-4A	HNO <sub>3</sub> - 5, HF - 3, CH <sub>3</sub> COOH - 3	p-n-o‘tish chegarasini aniqlash	2-3 min.
Uayt yemirgichi	HNO <sub>3</sub> - 3, HF - 1	plastinalarni tez sayqallash	15-30 sek.
Desh yemirgichi	HNO <sub>3</sub> - 3, HF-1, CH <sub>3</sub> COOH - 8-12	plastinalarni sekin sayqallash	1 soatdan 16 soatgacha

Jarayonlar tugagandan so'ng dionlashtirilgan suvda 4 marta chayib olinadi va infraqizil lampada  $T=80\div 90$  °C gradusda 30 minut davomida quritiladi. Kremniy plastanalarda bu jarayonda tozalashdan maqsad plastinalar orasida qolib ketgan ifloslanishlarni chiqarib yuborishdir.

Kremniy monokristalli asosidagi harorat datchiklarni yaratishda kirindi sifatida tozaligi 99,999 % bo'lgan Ni yoki Cu elementlari kirishma atomlaridan foydalanildi. Kremniy plastinalarning yuzasiga Ni yoki Cu dan iborat metall qatlamni purkashda  $R=10^{-6}$  mm.sm.ust. bosimda VUP-4 vakuum qurilmasida amalga oshirildi va metall qatlam kalitligi (nikel  $d=600$  nm, mis  $d=715$  nm) MMI-4 qurilmasi yordamida o'Ichandi. Tayyorlangan namunalarni nikel yoki mis atomlari kirishmalarining diffuziyasi havosi so'rib olingan kvarsli ampulalarda (vakuum  $2 \cdot 10^{-3}$  mm.sm.ust.) amalga oshirildi.

Diffuziya jarayoni SOUL-4 markali diffuzion pechda  $T=1150\div 1250$  °C da  $t=10$  minutdan  $t=2$  soat vaqt oraligida diffuziya amalga oshirildi. Pechdagi harorat kvars ampulasi o'rtasiga joylashtirilgan platina- platina rodiy (TPP10) termoparasi yordamida nazorat qilindi va bunda berilgan haroratni og'ishi  $t=(\pm 4\div 5)$  °C dan oshmasligi ta'minlandi. Diffuziyadan so'ng ampulalar ikki xil rejimda, sekin hona haroratida ( $v_{\text{sov}} \approx 5\div 10$  °C/sek), texnik moyda tez ( $v_{\text{sov}} \approx 230\div 250$  °C/sek) tezlikda sovitildi.

p-n o'tishli harorat datchiklarini yaratish uchun biz ikkita jarayondan iborat texnologiyadan foydalandik. Birichi kremniy plastinalarni fosfor bilan boyitish uchun diffuzand tayyorlab olindi. Diffuzand uchun fosforli (ammoniy-fosfornokisliy 2 zam( $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ) 2 gr olinib 20 gr deionizatsiyalangan suvda  $T=60$  °C da eritib olindi. Tayyor bo'lgan diffuzandni perkal matoda namunaning bir tomoniga surildi va qalam bilan belgi qo'yildi hamda infraqizil lampada  $T=90$ °C haroratda quritildi. Fosforni diffuziya qilish diffuzion pechda  $T=1250$ °C da  $t=2$  soat diffuziya qilindi va sekin ( $v_{\text{sov}} \approx 5\div 10$  °C /sek) hona haroratida sovitildi.

Fosfor kirishma atomlari bilan boyitilgan kremniy namunalarning yuzasini nikel bilan kimyoviy usulda qoplash ishlari o'tkazildi. Ni metall qatlamini hosil qilishda ishlatadigan elektrolit tayorlash uchun elektr plitadan foydalanib, maxsus kvarsdan yasalgan idishda quydagi kimyoviy elementlar eritmasi tayyorlandi: 100 ml dionlashtirilgan suv, nikel xlorit ( $\text{NiCl}_2$ ) - 2.1 gr, xlorli ammoniy ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) - 4.9 gr, limon kislotasini ( $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ ) - 7.9 gr, natriy gipofosfit ( $\text{NaH}_2\text{PO}_2$ ) - 1.7 gr, amiakli suvi 25% li eritmasi - 1 gr solindi va indikator qog'oz 7÷8 bo'lguncha ammiak qo'shib borildi), 70÷75 °C haroratda elektrolitga plastinalarning birinchi, fosfor tomoniga, rangsiz lak bilan surkab, kimyoviy eritmaga tushirildi. Plastinalar eritmada bir daqiqa ushlab turildi. Ni metall qatlamlari hosil qilinganda plastinalarning sirtida och sariq rangdagi qatlam yuzaga keladi.

Ni qatlamning qalitligi  $d=0,8$  mkm bo'lgan sof metall hosil bo'ldi. Tayyorlangan namunalarning diffuziyasi havosi so'rib olingan kvarsli ampulalarda (vakuum  $2 \cdot 10^{-4}$  mm.sm.ust.) amalga oshirildi. Diffuziya jarayoni SOUL-M2-U4.2 markali diffuzion pechda  $T=1250$  °C da  $t=2$  soat vaqt davomida diffuziya amalga oshirildi. Pechdagi harorat kvars ampulasining o'rtasiga joylashtirilgan xromel - alyuminiy termoparasidan foydalanib o'Ichab, nazorat qilib turildi va bunda

berilgan haroratni og‘ishi  $T=(\pm 5)^\circ\text{C}$  dan oshmasligi ta‘minlandi. Diffuziyadan so‘ng ampulalar ikki xil rejimda, hona haroratida  $v_{\text{sov}} \approx 5\div 10^\circ\text{C}/\text{sek}$  sekin, texnik moyda  $v_{\text{sov}} \approx 230\div 250^\circ\text{C}/\text{sek}$  tezlikda tez tushurish bilan sovitildi.

Si<Ni> va Si<Cu> namunalarining solishtirma qarshiligi, asosiy zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasi va harakatchanlik elektrofizik parametrlari Xoll effekti bilan, Van-der-Pau usulida HMS5000 zamonaviy uskunasi, o‘tkazuvchanlik termozond qurilmasida o‘lchangan, 2-jadvalda kelitirib o‘tilgan.

2-jadval

Si<Ni> va Si<Cu> namunalarining elektrofizik parametrlari

	$T(^\circ\text{C})$	$V_{\text{sov}} \approx 5^\circ\text{C}/\text{sek}$					$V_{\text{sov}} \approx 250^\circ\text{C}/\text{sek}$				
		T ip	$\rho$ , ( $\text{Om}\cdot\text{sm}$ )	$\mu$ , ( $\text{sm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ )	$n$ , ( $\text{sm}^{-3}$ )	$E_F$ , eV	T ip	$\rho$ , ( $\text{Om}\cdot\text{sm}$ )	$\mu$ , ( $\text{sm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ )	$n$ , ( $\text{sm}^{-3}$ )	$E_F$ , eV
Si<Ni>	Dast	n	129	1341	$3,6\cdot 10^{13}$	0,35	n	129	1341	$3,6\cdot 10^{13}$	0,35
	Naz-t	n	135	1284	$3,6\cdot 10^{13}$	0,35	n	140	1253	$3,7\cdot 10^{13}$	0,35
	1150	n	5359	1135	$1,1\cdot 10^{12}$	0,42	n	9359	1103	$6,1\cdot 10^{11}$	0,35
	1200	n	10513	1081	$5,5\cdot 10^{11}$	0,46	n	18644	945	$3,6\cdot 10^{11}$	0,45
	1225	n	24351	931	$2,8\cdot 10^{11}$	0,47	n	68531	867	$1,1\cdot 10^{11}$	0,49
	1250	p	52522	386	$3,1\cdot 10^{11}$	0,45	p	97274	313	$2,1\cdot 10^{11}$	0,46
Si<Cu>	Naz-t	n	134	1267	$3,7\cdot 10^{13}$	0,35	n	139	1281	$3,5\cdot 10^{13}$	0,35
	1150	n	4521	1114	$1,2\cdot 10^{12}$	0,45	n	6532	1157	$8,3\cdot 10^{11}$	0,46
	1200	n	11314	992	$5,6\cdot 10^{11}$	0,46	n	15540	992	$4,1\cdot 10^{11}$	0,46
	1225	n	19562	917	$3,4\cdot 10^{11}$	0,47	n	38357	819	$2,0\cdot 10^{11}$	0,48
	1250	p	35285	310	$5,7\cdot 10^{11}$	0,43	p	69249	327	$2,8\cdot 10^{11}$	0,45

Diffuziya vaqtlari  $t = 2$  soat

Fermi sathini taqiqlangan sohada joylashishi quyidagi formulalardan foydalanib xisoblandi;

$$E_c - F = kT \ln e\mu_n\rho N_c \quad (1)$$

$$F - E_v = kT \ln e\mu_p\rho N_v \quad (2)$$

Bunda:  $\mu_n$ ,  $\mu_p$  –mos ravishda elektron va kovaklarning harakatchanligi,  $\rho$ -materialning solishtirma qarshiligi, ye-elektron zaryadi,  $N_c=2,4\cdot 10^{19}$  elektronlarni o‘tkazuvchanlik sohasidagi va  $N_v = 8,5\cdot 10^{18}$  kovaklarni valent sohasidagi holatlar zichligi, k-Bolsman doimiysi.

Olingan namunalarning sirtini tadqiq qilganda ikkilamchi (SED-secondary electron detector) detektori orkali tasviri olindi, bunda filamentga  $10\div 20$  kV gacha bo‘lgan tezlashtiruvchi kuchlanish qo‘llanildi. Namunani o‘lchash davomida ishlash masofasi (WD-working Distance) 8,5 mm saqlanib qolindi. Namunalar yuzasidan 30 mkm oksid qatlami M10 kukuni yordamida olib tashlandi. SEM qurilmasi yordamida o‘lchashda mis bilan legirlangan namuna uchun asosiy tarkibi kremniydan 92 vazn% iborat bulib, shuningdek mis taxminan 5 vazn% , qalay 1.4 vazn% va kislorod 1.3 vazn% ulushini tashkil etadi. Nikel bilan legirlangan namunada kremniy ulushi 94 vazn% iborat bo‘lib, nikel 3.5% atrofida, qolgan elementlar kislorod 1.7%, uglerod 0.7% va alyuminiy 0.6% lardan iborat. Diffuziyali yuqori termik ishlov berishdan so‘ng namunalar yuzasida mis va nikel atomlarining

klasterlari hosil bo'lgan va kremniy miqdori kamaygan. Bu legirlangan namunalarning elektr parametrlarini o'lchashimizning to'g'riligini ko'rsatdi.

Fosfor kirishma atomlarni diffuziya qilingan namunalar yuzasidan M5 kukuni yordamida 3 mkm olib tashlangan, namuna asosiy tarkibi kremniydan iborat bo'lib 98.6 vazn%, fosforning ulushi 1.4 vazn% tashkil etdi. Olingan ma'lumotlardan ko'rinib turibdiki, Si<P> namuna yuzasida xech qanday atomlarining klasterlari hosil bo'lmagan. Fosfor bilan legirlangan namunada fosforning konsentratsiya miqdori ortgan, hamda o'lchovlar natijasida 6 mkm qalinlikdagi sohada  $n^{++}$  soha hosil bo'lgan va uning konsentratsiya miqdori  $n=10^{20}$  dan yuqoriligini ko'rsatadi.  $n^{++}$  soha hosil qilingan namunaning ikkinchi tomonini nikel bilan legirlash orqali p-n o'tishga ega strukturalar olish imkonini yaratildi.

Disertatsiyaning **“n-Si<Ni> va n-Si <Cu> namunalar asosida harorat datchiklar ishlab chiqish”** deb nomlangan uchinchi bobida, n-Si<Ni> va n-Si<Cu> namunalari asosida harorat datchiklar yaratishda namunalarga omik kontakt olish va kimyoviy usulda kristallarga ajratish, datchiklarni payka qilish hamda germetizatsiyalash ishlari, harorat datchiklarni qarshilikning haroratga bog'likligi qonuniyatlarini o'rganishda yangi zamonaviy usullardan foydalanib olingan eksperimental tadqiqot natijalari keltirilgan.

n-Si<Ni> va n-Si<Cu> namunalari asosidagi xarorat datchiklarini haroratga sezgirlik koeffitsientini past va yuqori haroratlardagi qiymatlari hamda omik kontakt, p-n o'tish asosida yaratilgan datchiklarning VAXlari keltirib o'tilgan.

Shuningdek, harorat datchiklarni graduirovkasi bo'yicha bajarilgan ishlar va tadqiqotlar natijalari keltirilgan.

Yarimo'tkazgichli materiallar asosida yaratilgan asboblar uchun omik kontakt olish texnologik jarayonning asosiy omillardan biri bo'lib, yaratilgan asboblarning sifatiga va ishchi parametrlariga katta ta'sir ko'rsatadi. Yaratilgan harorat datchiklarga omik kontakt olishda tanlab olingan metallning chiqish ishidan kelib chiqqan holda amalga oshirildi. Omik kontakt olish jarayonini amalga oshirishda quyidagi shartlar hisobga olingan holda amalga oshildi: ya'ni n-tipdiga kremniy monokristalli uchun omik kontakt olishda,  $\phi_{yar} > \phi_m$  yoki  $\phi_{yar} = \phi_m$  yarimo'tkazgich materialni chiqish ishi metallning chiqish ishidan katta yoki teng bo'lishi kerakligi adabiyotlarda keltirib o'tilgan. Agar bu jarayonning aksi bo'lsa  $\phi_{yar} < \phi_m$ , Shottki Bar'er olish mumkin bo'ladi. p-tipdagi kremniy monokristalli uchun omik kontakt olishda,  $\phi_{yar} < \phi_m$  yarimo'tkazgich materialni chiqish ishi metallning chiqish ishidan kichik bo'lsa omik kontakt, aksincha  $\phi_{yar} > \phi_m$  bo'lsa Shottki Bar'er olish mumkin bo'ladi.

VUP-4 vakuum qurilmasi yordamida n-Si<Ni>, n-Si<Cu> va n-Si<P,Ni> namunalar sirtiga metall omik kontaktlarni olishda, haroratga chidamli, metall Volfram (W) spirali (tigel) ustiga kumush (Ag) va nikel (Ni) metallari qo'yib, undan elektr tokini o'tkazib, qizdirish yo'li bilan o'tqazilgan (1(b) va 1(c)-rasmlar)

Kimyoviy usul bilan omik kontakt olishda nikel metall qatlamlarini kremniy sirtiga o'tkazish asosida ham amalga oshiriladi. Kimyoviy usul bilan omik kontaktlarni olishdan oldin kremniy plastinalarning sirti M-7 mikrokukunida

jilvirlandi va HF kislotasi yordamida plastinalar sirtidagi oksid qatlam olib tashlandi.

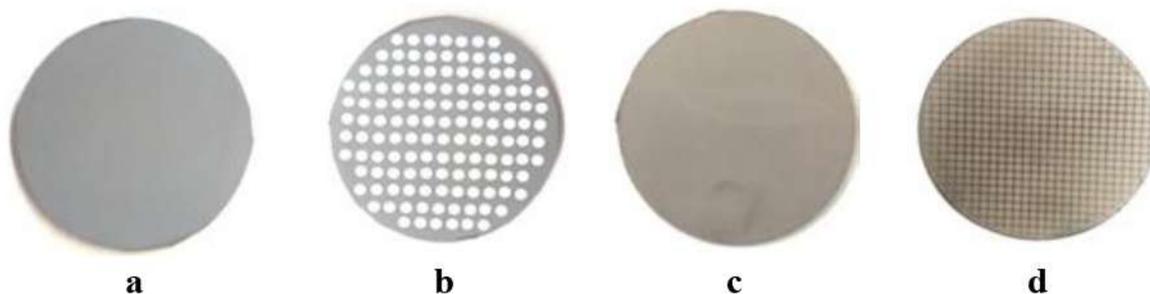
3-jadval

**Si plastinkalariga metall qatlam olishni texnik tavsifi**

Qurilma turi	Changlatish usuli	Changlanuvchi material	Vakuum qiymati, Pa	Plastinalarni, diametri, mm	Plastina soni
VUP-4	Rezistiv	Metal	$5,5 \cdot 10^{-5}$	20 ÷ 42	5

Nikel metall qatlamini hosil qilishda ishlatilgan elektrolit 100 ml dionlashtirilgan suv, nikel xlorid ( $\text{NiCl}_2$ ) - 2.1 gr, xlorli ammoniy ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) - 4.9 gr, limon kislotasini ( $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ )-7.9 gr, natriy gipofosfit ( $\text{NaH}_2\text{PO}_2$ ) - 1.7 gr, amiakli suvi 25% li eritmasi - 1 gr solinadi, indikator qog'oz 7-8 bo'lguncha ammiak qo'shib boriladi),  $85(\pm 5)^\circ\text{C}$  gradus haroratda elektrolitga plastinalar eritmada  $45(\pm 5)$  sek ushlab turildi.

Nikel metall qatlamlari hosil qilinganda plastinalarning sirti och sariq rangdagi qatlam bilan qoplandi (1(c)-rasm.). Bunda nikel metall qatlamida turli bo'shliqlar va adgeziyasi yomon bo'lgan qatlamlarni bo'lmasligi nazorat qilib turiladi.



**1-rasm.** Si<Cu> dastlabki namuna; b) vakumda olingan omik kontakt; c) kimyoviy usuldagi omik kontank; d) fotorezist qilingan namuna

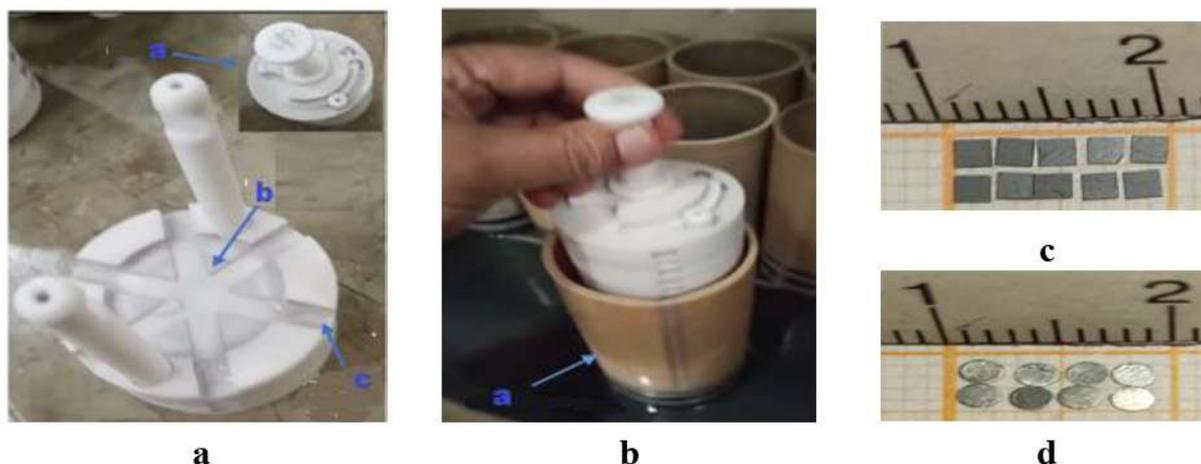
Omik kontakt olingan namunalarni dastlab plastinalar yuzasiga fotorezist joylashtiramiz. Fotorezist yorug'likka sezgir polimer plyonka bo'lib, uning yordamida biz kerakli o'lchamdagi namunalarni belgilab olamiz.

Fotorezist bilan hosil qilingan qatlam mexanik ta'sirga chidamlidir. Bizning ishimizda pozitiv FP-2550 fotorezisti ishlatilgan bo'lib quyidagi bosqichlarda amalga oshirildi; FP-2550 fotorezisti filtr kog'ozdan o'tkazildi; tomizg'ich yordamida namunaning bir tomoniga bir tomchi fotorezist tomizildi; fotorezis namuna sirtini to'la qoplashi uchun sentrafugada 20 sekund aylantirildi; fotorezis namunalar  $100^\circ\text{C}$  haroratli pechkaga 30 minut quritildi; shundan so'ng kerakli o'lchamdagi shablonni tozalab spirtida artildi va mikroskopda butunligi tekshirildi; namunaning yuzasiga shablon qo'yildi va maxsus qurilmada infraqizil nur ostida 30 sekund ushlab turildi; so'ngra kaliy ishqoriga 3 sekund solindi; dionlashtirilgan suvda yuvildi va  $100^\circ\text{C}$  haroratli pechkaga bir soat quritildi. (1(d)-rasm)

Namunaga fotorezist qo'llangandan so'ng yemirgich tayyorlandi. Yemirgichning tarkibi quyidagicha: politelen idishga bir hajmda HF ftoristovodorod

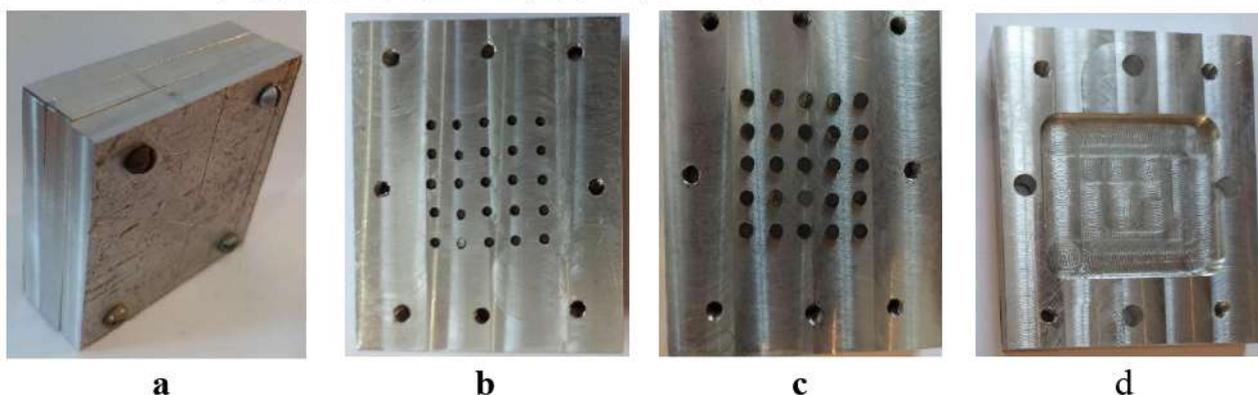
kislotasi va sakkiz hajmda  $\text{HNO}_3$  azot kislotasi ( $\text{HF}:\text{HNO}_3=1:8$ ) aralashtiriladi. Maxsus aylanadigan qurilma idishiga ushbu aralashma qo'yiladi (2(a)-2(b)-rasm).

Kremniy namunalar konteynerga joshlashtirilib aralashmali idishga tushirildi. Qurilmaning idishi 35 gradus burchak ostida soatiga 3600 marta aylanadi. Yemirilgan kristallar maxsus tirqishdan idishga tushadi. Aylanayotgan idish 14 minut aylangandan so'ng konteynerga chiqarildi. Aylanish jarayonida ajralgan idishning tagidagi kristallar deionizatsiyalangan suvda chayiladi (2(c)-rasm).



**2-rasm.** a) namunalar konteynerga joshlashtirish; b) kristallarga ajratish jarayoni; c) namunalar ko'rinishi; d) nikel kompensatorlar

Datchiklarni payka qilish kristallarga qalaylangan va qalinligi 130 mkm bo'lgan nikel kompensatorlar orqali amalga oshiriladi. Kompensatorlar maxsus stanoklar yordamida nikel listdan diametri 2 mm bo'lgan o'lchamda kesiladi (2(d)-rasm). So'ng tayyor kompensatorlar toluol eritmasida 15 daqiqa qaynatiladi va dionlashtirilgan suvda yuvilib hona haroratida quritiladi. Namunalar 3a-rasmda keltirilgan konteynerga joylashtiriladi. Konteynerdagi chuqurchalarga dastlab kompensator so'ng kristall (namuna), namunadan so'ng yana kompensator qo'yiladi va kassetaning qopqog'i yopiladi (3(b), 3(c) va 3(d)-rasmlar).



**3-rasm.** a) kovsharlash uchun konteynerni umumiy ko'rinishi; b) kristall joylatirish uchun joy; c) kristallni bosib turuvchi yukchalar; d) yukchalar tushib tirish uchun joy

Kasseta vodorodli payka qilish qurilmasiga qo'yiladi. Payka qilish asosiy metall oksidlariga nisbatan kamaytiruvchi xususiyatlarga ega bo'lgan gaz atmosferasida elektr isitiladigan maxsus pechlarda amalga oshiriladi. Boshqariladigan atmosferaga ega eng ko'p ishlatiladigan elektr kamerali

pechlarning ish joyiga payka qilish uchun yig'ilgan qismlarni yetkazib berish tarmoqli konveer, roliklar tizimi yoki maxsus uzatgichlar yordamida amalga oshiriladi.

Payka qilish jarayonida qismlar uchta kameradan o'tadi: dastlabki isitish kamerasi, payka qilish kamerasi va sovitish kamerasi. Barcha kamerada yengil ortiqcha bosim ostida himoyalovchi gazsimon muhit yaratiladi. Himoya gazlari nafaqat isitish vaqtida payka qilinadigan metallni oksidlanishdan himoya qiladi, balki ularning yuzasidan mavjud oksidlarni olib tashlash uchun ham ishlatiladi.

Usul, flyusdan foydalanishni talab qilmaydi, bu uning muhim texnik afzalligi bo'lib, payka qilish narxini pasaytiradi va jarayonning murakkabligini soddalashtiradi, chunki u flyus qo'llash operatsiyasini va payka qilish jarayonining so'nggida flyus qoldiqlarini olib tashlashni talab qilmaydi (4(a)-rasm).

Chiqish elektrodleri (kontaktleri) issiqlik o'tkazuvchanligi kichik bo'lgan metall simlar tayyorlanib olindi. Bunda elektrodlerining issiqlik o'tkazuvchanligi katta bo'lsa, harorat datchiklarining aniqligi va tezkorligi kamayadi.

Elektrodlerining uzunligi  $l = 4 \text{ sm}$  bo'lib, diametri  $d = 0.3 \text{ mm}$  ga teng yumshoq mis simlardan ishlatiladi. Mis simlar spirtida chayiladi, maxsus flyusga botirib, erib turgan qalay idishiga tashlanadi va payalnik yordamida datchiklarga payka qilinadi (4(b)-rasm).

Harorat datchiklarni germetizatsiyalash ularni turli tashqi ta'sirlardan himoya qilish (suv, namlik, kontaktlar mustaxkamligi va turli mexanik ta'sirlar) maqsadida amalga oshiriladi. Tashqi ta'sirlardan himoyalangan harorat datchiklar haroratni o'lchashdagi aniqligi va ishonchliligi ortadi. Germetizatsiyalashda ishlatiladigan materialning issiqlik o'tkazuvchanligi ham katta bo'lishi kerak. Bu o'lchanayotgan muhit bilan harorat datchiklarning o'zaro ta'sirini yaxshilaydi, ishlash tezkorligini oshiradi, shu bilan birga harorat datchiklardan o'tayotgan tok hisobiga hosil bo'ladigan qizishni kamaytiradi.

Harorat datchiklarni ustki qismini germetiklash uchun avval ishlab chiqilgan harorat datchik o'lchamiga mos ravishda qolib yasaladi.

Tayyor bo'lgan qolibni metallndan ajratib olib uni ichiga harorat datchik joylashtiriladi va nam bo'lgan sharoitlarda o'z parametrlarini o'zgartirmasdan ishlashi uchun dastlab EKLB-10 turdagi epoksid komponentdan foydalanib va  $85 \div 90 \text{ }^\circ\text{C}$  haroratda 1 soat davomida quritiladi.

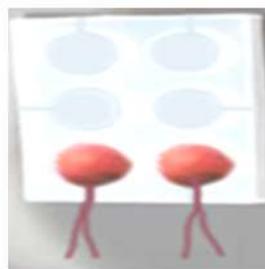
Harorat datchiklarni turli xil mexanik ta'sirlardan himoya qilish uchun EM-3 kompaundi ishlatildi. Buning uchun komponentni harorat turli qiymatlarda  $T=80 \text{ }^\circ\text{C}$  da  $t=4$  soat,  $T=120 \text{ }^\circ\text{C}$  da  $t=12$  soat,  $T=140 \text{ }^\circ\text{C}$  da  $t=24$  soat polimerizatsiya quritish jarayoni bilan amalga oshirildi (4(c) va 4(d)-rasmlar).



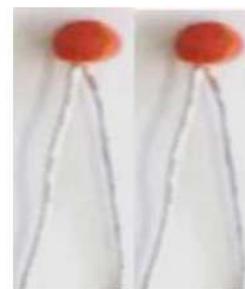
a



b



c



d

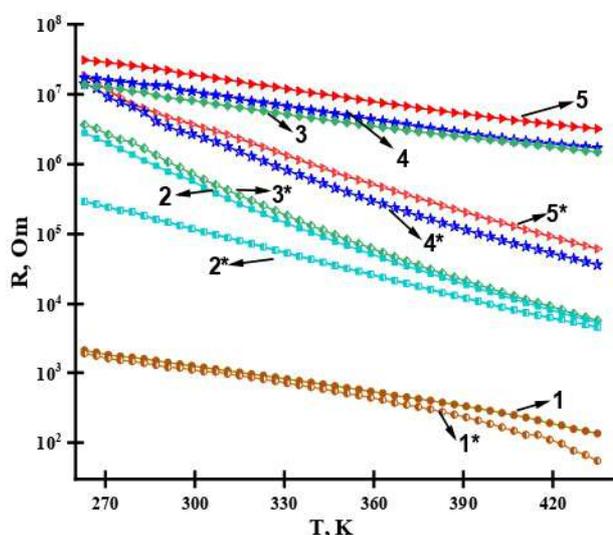
**4-rasm.** a) tayyorlangan harorat datchik; b) chiqish kontaktlari olingan datchik;  
c) germetiklangan datchik; d) tayyor datchik

Yaratilgan datchiklarning harorat ta'siridagi elektrofizik tavsiflarini bilish asosida ularning asosiy parametrlari bo'lgan  $\beta$  va  $\alpha$  koeffitsentlari o'rganildi va ular quyidagi ifodalar yordamida hisoblandi:

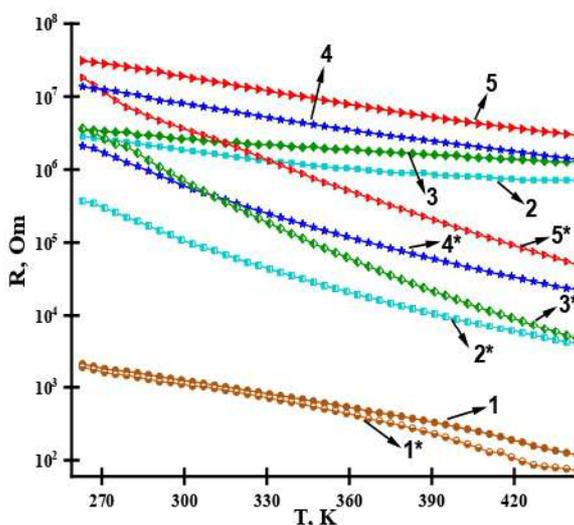
$$\alpha = \frac{1}{\rho_0} \frac{\Delta \rho}{\Delta T} \quad (3) \quad \beta = \frac{\ln \rho_0 / \rho}{\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}} \quad (4)$$

Bu yerda  $\beta$ -haroratga sizgirlik koeffitsenti,  $\alpha$ -qarshilikning harorat koeffitsenti.

Namunalar Keithley 2400 rusumdagi qurilma yordamida  $t = -10$  °C haroratidan boshlab, sekinlik bilan 1°C dan oshirib borilib +170 °C ga yetguncha qadar o'lchandi. Past haroratlarni olish uchun termostatga suyuq azot qo'yildi va o'lchashlar amalga oshirildi. Diffuziya vaqtlari 2 soat, o'lchamlari 4x8x0.5mm, bir xil Si<Ni>, Si<Su>, Si<P, Ni> namunalar asosida tayyorlangan harorat datchiklarni  $\alpha$  va  $\beta$ - koeffitsentlari keltirilgan.



**5-rasm.** Si<Ni> tez va (\*)sekin sovitilgan namunalar



**6-rasm.** Si<Cu> tez va (\*)sekin sovitilgan namunalar

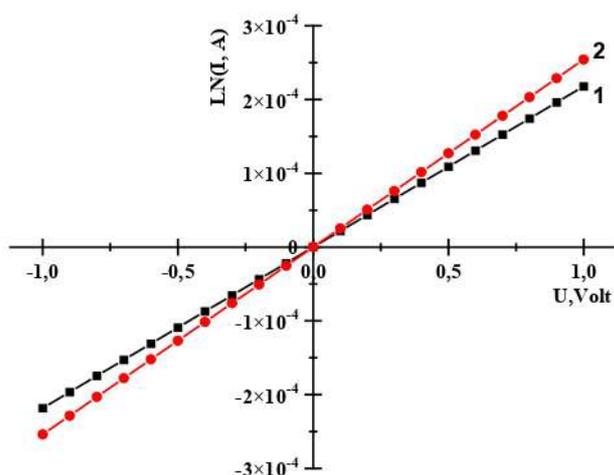
1;1\*- $T_n=1250$ °C; 2;2\*- $T=1150$ °C; 3;3\*- $T=1200$ °C; 4;4\*- $T=1225$ °C; 5;5\*- $T=1250$  °C;

Hona haroratida  $T=30$  °C da  $T=1250$  °C tez sovitilgan namuna asosida tayyorlangan harorat datchikning  $\alpha = -4.3$  K<sup>-1</sup> ga ,  $\beta = 8375$  K teng, shu namunalar sekin sovitilganda  $\alpha = -3.6$  K<sup>-1</sup> ga ,  $\beta = 7615$  K teng, Si<Cu> namunalar asosida tayyorlangan harorat datchiklarda  $\alpha = -3.2$  K<sup>-1</sup> ga ,  $\beta = 7262$  K teng, shu namunalar sekin sovitilganda  $\alpha = -2.3$  K<sup>-1</sup> ga ,  $\beta = 6249$  K teng bo'lganligini ko'rish mumkin. (5 va 6-rasmlar)

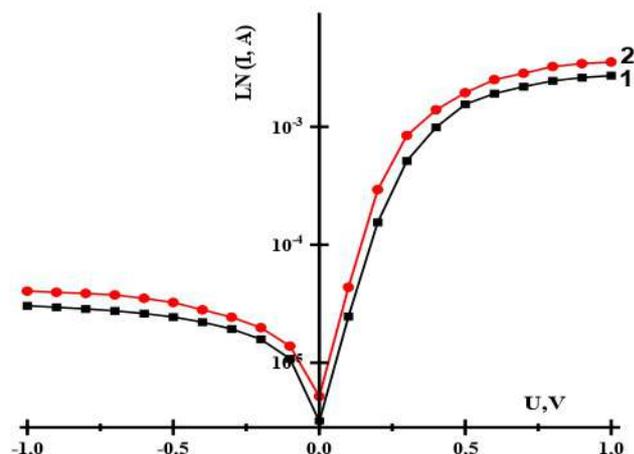
Yuqoridagilardan shuni xulosa qilish mumkinki, namunalarni diffuziya harorati va vaqti hamda sovitish vaqti qancha yuqori bo'lsa  $\alpha$ ,  $\beta$ , R va  $\rho$  larning qiymatlari yaxshilanganini ko'rishimiz mumkin.

Si<Ni>, Si<Cu> va Si<P,Ni> namunalarni termostat qurilmasiga navbati bilan joylashtirish bilan taqqoslash ishlari amalga oshirildi.

Yaratgan harorat datchiklarning VAXi o'lchashda ( $\pm 1$ ) volt oraliqdagi kuchlanish bilan o'lchash amalga oshirildi.



a



b

**7-rasm.** a) Si<Ni> b) p-Si<P,Ni> 1-kompensatsiz, 2-kompensatorli

Termorizistiv datchiklar chiqish kontaktlari olingan kompensatorlardan foydalangan va ustki qismi germetik berk bo'lgan xolda VAX ishchi holati yaxshilanib dastlabki holatdan quvvat 1,5 marta o'zgarganini ko'rishimiz mumkin (7(a) va 7(b)-rasmlar).

Termostat qurilmasida joylashgan spiralga tashqi manba yordamida kuchlanishni oshirish bilan undan ajralib chiqqan issiqlik hisobiga harorat ko'tarila boshlaydi.

Bizga ma'lumki, harorat ortishi bilan yarimo'tkazgich materiallarda qarshilik kamayadi va uning o'zgarishini Regol DM5830E raqamli multimetr yordamida o'lchab boriladi.

Graduirovka jarayonida har bir tayyorlangan harorat datchiklar aloxida o'lchandi. Graduirovka jarayoni hona haroratida amalga oshirildi.

#### 4-jadval

**Harorat datchiklarining graduirovka jadvali**

T, °C	Kompensatsiz			Kompensatorli		
	$R_{Si<Ni>}$ (Om)	$R_{Si<Cu>}$ (Om)	$R_{Si<P,Ni>}$ (Om)	$R_{Si<Ni>}$ (Om)	$R_{Si<Cu>}$ (Om)	$R_{Si<P,Ni>}$ (Om)
20	2008032,1	1677852,3	1290436,4	6329113,9	6738544,4	719424,46
21	1937984,4	1628664,4	1281469,2	6112469,4	6561679,8	683181,43
22	1872659,1	1587301,5	1272502,4	5917159,7	6353240,1	641848,52
23	1824817,5	1552795,1	1263534,8	5675368,8	6209637,3	601684,71
24	1754385,9	1506024,4	1254567,5	5500550,0	6045949,2	570125,42
25	1718213,0	1470588,2	1245600,3	5330490,4	5882352,9	567905,68
26	1672240,8	1428571,4	1236633,1	5144032,9	5747126,4	565685,94

Olingan natijalardan foydalangan holda C++, C# tilida EHM dasturlari yaratildi. Ishlab chiqilgan dasturni elektron qurilma xotirasiga yozildi va elektron qurilmaga datchiklarni ulagan vaqtimizda qurilma ekranida bizga real vaqtdagi haroratni ko'rsatib berish imkoniyati yaratildi.

Disertatsiyaning “**Suvni chuchuklantirish tizimi haroratini nazorat qiluvchi mikroelektron qurilmani ishlab chiqish**” deb nomlangan to'rtinchi

bobida, Si<Ni>li datchiklar asosida suvni chuchuklantirish tizimidagi haroratni 45÷60°S oraliqlarda, real vaqt davomida avtomatik nazorat qiluvchi mikroelektron qurilma va uning ishlash jarayoni bo'yicha ma'lumotlar keltirilgan.

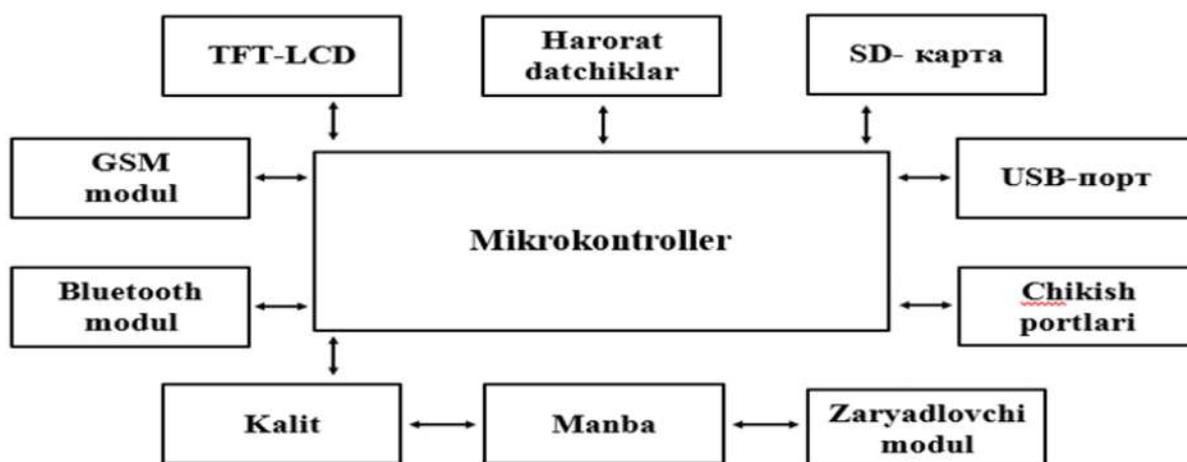
Shuningdek, n-Si<Ni> li harorat datchiklar asosida ishlaydigan zamonaviy mikroelektron o'lchov qurilmalarining dastlabki namunalari ishlab chiqilgan va undan foydalanish ketma-ketligi keltirilgan.

Suvni chuchuklantirish tizimi - tuzsizlantiruvchi moslamadan iborat bo'lib, uning vositasida tuzsizlantirilgan suv va namakob olinadi. Qurilma quvur orqali vodozabor qudug'ining nasosiga ulangan. Tuzsizlantirish qurilmasi ikkita vakuumli nasos bilan birlashtirilgan vakuumli bug'lantirish qurilmasi ko'rinishida bajarilgan bo'lib, bunda nasoslarning chiqishi tuzsizlantirilgan suv uchun to'plovchi sig'imga ulangan. Si<Ni> datchiklar asosidagi mikroelektron qurilma vakuumli nasoslar galma-galdan ishlashi hamda haroratni 45÷60 °C oraliqlarda real vaqt davomida avtomatik boshqarish imkoniyatini beradi.

Mikroelektron qurilma ko'p funksiyali kremniy monokristalli asosida ishlab chiqilgan harorat datchiklar asosida haroratni o'lchaydi va qo'yidagi asosiy bloklardan iborat: Atmega mikrokontroller asosidagi Arduino Mega 2560, mikrokontrollerga bog'lovchi qismlar (240x340 TFT-ekran, harorat datchigi, tugmalar, GSM model, bluetooth model, zaryadlovchi plata, doimiy kuchlanish manbasi, kalit, SD-cart, USB port va chiqish porti) (9-rasm).

Elektron qurilmaning tashkil etuvchilarining vazifalari quyidagilardan iborat.

1. Arduino Mega-5260 Atmega mikrokontrollerga yozilgan maxsus dasturiy ta'minot yordamida barcha datchiklarning bir-biri bilan bog'lash, bog'langan xar bir datchikni nazorat qilish, kelayotgan yoki uzatilayotgan ma'lumotni qayta ishlash, kayta ishlangan ma'lumotni kerakli joyga jo'natishni ta'minlaydi.
2. 240x340 TFT ekran – vazifasi datchiklardan kelayotgan ma'lumotlarni ko'rsatadi.
3. Si<Ni> yoki Si<Cu> asosida yaratilgan harorat datchiklar – bu datchiklarning asosiy vazifasi haroratni o'lchash uchun mo'ljallangan.
4. Tugmalar - qurilma uchun yozilgan dastur menyusiga qirish va kerakli sozlash ishlarini bajaradi.
5. GSM- modul ma'lumotlarni internetga uzatish uchun mo'ljallangan.
6. Bluetooth – elektron qurilmadan kelayotgan ma'lumotni telefon yordamida kuzatishga imkon beradi.
7. Zaryadlovchi – doimiy manbaani zaryadlash uchun ishlatiladi.
8. Doimiy kuchlanish manbai (9v) – akkumulyator bo'lib tarmoqdan mustaqil holda ishlash va barcha ulangan datchiklarni manbaa bilan ta'minlaydi.
9. Kalit – elektron qurilmani o'chirish va yoqish ishlatiladi.
10. SD - cart modeli olingan ma'lumotlarni saqlaydi.
11. USB port – Mikrokontrollerga dastur yozish va ma'lumotlarni kompyuterga uzatish uchun ishlatiladi.
12. Chiqish porti - elektron qurilmaga ulangan barcha kerakli datchiklarni nazorat qiladi va boshqa vazifalar uchun xizmat qiladi.



**8-rasm.** Elektron qurilmani blok sxemasi

Qurilmadan foydalanish.

Elektron qurilma dastlab kalit orqali yoqiladi va quyida keltirilgan rejimlar orkali sozlash ishlari amalga oshiriladi.

R0-rejimda. Elektron qurilmaning 240x340 TFT ekrani orqali kun, oy, yil ko‘rinishini, kerakli sozlash ishlarini amalga oshirish mumkin.

R1-rejimda. Elektron qurilma issiq yoki sovuq rejimida ishlatishni tanlash kerak bo‘ladi. S -sovuq rejimda, H -issiq rejimda ekanligini bildiradi.

R2-rejimda. Elektron kurilma ekranida ko‘rish mumkin bo‘lgan xarorat qiymatlari selsiy, Kelvin, Farengeyt shkalalaridada ko‘rish mumkin. Bunda A-Selsiy va Kelvin, V-Selsiy va Farengeyt, S- Kelvin va Farengeyt rejimida ko‘rinadi.

R3-rejimda. Kurilma issiq yoki sovuq rejimida ishlashda necha gradus farq oraliqda releni uzish yoki ulash kerak bo‘lsa shu son kiritiladi. Bunda maxsimal va minimal chegara ( 0.1÷30 °C )

R4-rejimda. Kurilma issiqlik rejimida ishlashida (+250 °C) maxsimal qiymatgacha kiritish mumkin bo‘ladi.

R5-rejimda. Qurilma sovuq rejimda ishlashida (-100 °C) minimal qiymatgacha kiritish mumkin bo‘ladi.

R6-rejimda. Elekon qurilmaga harorat datchikni boshqasi bilan almashtirish kerak bo‘lganda, xarorat necha gradusga farq qilayotgan bo‘lsa shu qo‘ymatni qo‘yish kerak bo‘ladi. Bunda chegara (±50 °C )

R7-rejimda. Elektron qurilma xarorat yoki soviqlikni nazorat qilayotgan holatda biror xatolik ruy bersa doimiy ravishda signal berib turadi. Bu rejimda ovoz kerak bo‘lsa X-xa, kerak bo‘lmasa Y-yo‘q tanlanadi.

R8-rejimda. Elektron qurilma ishchi xolatdagi ma‘lumatlar kerak bo‘lsa, doimiy xotiraga yozib olish mumkin bo‘ladi. Ma‘lumotlar kerak bo‘lsa X-xa, kerak bo‘lmasa Y-yo‘q tanlanadi.

R9-rejimda. Elektron qurilma ishchi xolatdagi ma‘lumatlar bluetooth orqali telefonga uzatish kerak bo‘lsa X-xa, kerak bo‘lmasa Y-yo‘q tanlanadi.

R10-rejimda. Elektron qurilma ekrani doimiy ravishda yonib turmasligi uchun uni ma‘lum bir vaqtdan so‘ng o‘chirib qo‘yish mumkin.

## XULOSA

1. Si monokristaliga Ni yoki Cu kirishma atomlarini  $T=1250\text{ }^{\circ}\text{C}$  da 2 soat davomida diffuziya usuli bilan legirlash orqali n-Si<Ni> va n-Si<Cu> namunalari tayyorlandi va bunda namunalarning optimal solishtirma qarshiligi Ni uchun  $\rho=8.8 \cdot 10^4\text{ Om}\cdot\text{sm}$ , Cu uchun esa  $\rho=4.7 \cdot 10^4\text{ Om}\cdot\text{sm}$  ga teng ekanligi aniqlandi;

2. n-Si<Ni> va n-Si<Cu> namunalarni kimyoviy kesish usuli bilan kristallarga ajratishda HF va  $\text{HNO}_3$  kislotalardan foydalanildi va germetizatsiyalashda ularni turli tashqi ta'sirlardan (suv, namlik, kontaktlar mustaxkamligi va turli mexanik ta'sirlar) himoya qilishda EKLB-10 va EM-3 kompondlaridan foydalanildi;

3. 240 mkm qalinlikdagi n-Si<Ni> va n-Si<Cu> namunalarda asosida  $25\div 70^{\circ}\text{C}$  harorat oralig'ida sezgirligi mos ravishda  $\beta_{\text{Cu}}=8200\text{K}$ ,  $\beta_{\text{Ni}}=8600\text{K}$  bo'lgan harorat datchiklari yaratildi;

4. Si asosidagi mavjud harorat datchiklarida qo'shimcha qatlam sifatida metall (nikel) kompensatordan foydalanildi. Shunda mavjud harorat datchiklarini sezgirligi  $8\div 10$  foizga oshirishga erishilgan;

5. Tajribalar natijasiga ko'ra harorati  $T=100^{\circ}\text{C}$  bo'lgan suv va havo muhitlarida, datchiklarini sezgirligi, suvda gaz muhitiga nisbatan 17 foizga yuqori bo'lishligi n-Si<Ni> va n-Si<Cu> datchiklarda aniqlangan;

6. n-Si<Ni> va n-Si<Cu> datchiklari asosida suvni chuchuklantirish qurilmasi haroratini  $45\div 60^{\circ}\text{C}$  oraliqlarda avtomatik nazorat qiluvchi mikroelektron qurilma ishlab chiqilgan.

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

---

**НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ФИЗИКИ  
ПОЛУПРОВОДНИКОВ И МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ ПРИ  
НАЦИОНАЛЬНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ УЗБЕКИСТАНА**

**МАННАНОВ МУЗАФФАР ИБРАГИМОВИЧ**

**РАЗРАБОТКА МИКРОЭЛЕКТРОННОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ  
КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ СИСТЕМ ОПРЕСНЕНИЯ ВОДЫ**

**01.04.10 – Физика полупроводников**

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

**Ташкент – 2025**

Тема диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за В2023.4.PhD/T1502.

Диссертация выполнена в научно-исследовательском институте Физики полупроводников и микроэлектроники Национального университета Узбекистана.

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

Научный руководитель:	Кулдашов Оббозжон Хокимович доктор технических наук, профессор
Официальные оппоненты:	Тагаев Марат Баймурадович доктор технических наук, профессор Рахмонов Анвар Тожибевич доктор технических наук, профессор
Ведущая организация:	Наманганский инженерно-строительный институт

Защита диссертации состоится «24» 03 2025 года в 10<sup>00</sup> часов на заседании Научного совета по присуждению ученых степеней DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 при Научно-исследовательском институте физики полупроводников и микроэлектроники Национального университета Узбекистана (Адрес: 100057, Узбекистан, г. Ташкент, ул. Янги Алмазар, дом 20. Тел.: (998 71) 248-76-94; Факс: (998 71) 248-79-92; e-mail: info@ispm.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре института (зарегистрирована за № 67) по адресу: 100057, Узбекистан, г. Ташкент, ул. Янги Алмазар, дом 20. Тел.: (998 71) 248-79-59; e-mail: info@ispm.uz.

Автореферат диссертации разослан «14» 03 2025 года.  
(реестр протокола рассылки № 67 от «14» 03 2025 г.).



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

**Ж. Ж. Хамдамов,**  
главный секретарь Научного совета  
по присуждению ученых степеней, PhD, с.н.с.

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

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

### **Актуальность и востребованность темы диссертации.**

Во всем мире уделяется большое внимание разработке принципиально новых типов датчиков температуры и оптимальных технологических способов их получения. В этой связи исследователи и разработчики в настоящее время сталкиваются следующими научными проблемами: повышение чувствительности и быстродействия датчиков температуры; увеличение срока службы датчиков температуры; упрощение способов эксплуатации датчиков температуры; обеспечение дистанционного измерения температуры.

Решение данной проблемы позволяет создать принципиально новый класс универсальных датчиков физических величин, обладающих улучшенными характеристиками деградации и стабильностью параметров, низким энергопотреблением и малыми габаритами, отсутствием дополнительных систем усиления сигнала, отличающихся простотой эксплуатации, поскольку они функционируют на основе физических явлений, весьма чувствительных к внешним воздействиям и отличаются весьма повышенной чувствительностью и быстротой отклика по сравнению с существующими датчиками.

В Республике Узбекистан в последние годы были проведены целый ряд научно-исследовательских работ по разработке технологий производства эффективных датчиков температуры со стабильными параметрами и высокой термостойкостью на основе полупроводниковых материалов. В частности, при разработке микроэлектронного устройства автоматического регулирования температуры в системе опреснения воды в режиме реального времени, использовались полупроводниковые датчики на основе кремния n- и p-типа, легированные Ni, Cu методом диффузии.

Представленное диссертационное исследование в определенной степени служит для решения задач, предусмотренных в указе президента республики узбекистан 28.01.2022 г. уп-60 «о стратегии развития нового Узбекистана на 2022-2026 годы», пункте 386 приложения №6 постановления Президента Республики Узбекистан от 6 июля 2022 года №ПП-307 «Об организационных мерах по реализации стратегии инновационного развития Республики Узбекистан на 2022-2026 годы», Постановлении Президента Республики Узбекистан № ПП-2772 от 13 февраля 2017 года «О мерах по дальнейшему совершенствованию управления, ускоренному развитию и диверсификации электротехнической промышленности на 2017-2021 гг.», в постановлении президента № ПП-2789 «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности» от 17 февраля 2017 года, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

**Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан.** Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий Республики: III. «Энергия, энергосбережение, транспорт,

машиностроение и приборостроение; развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники, электронного приборостроения».

**Степень изученности проблемы.** На сегодняшний день многие учёные введут научные исследования в области развития и применения теории термочувствительных полупроводниковых элементов. В частности:

Зарубежные ученые Кофи Макинва (Нидерланды), Дэвид Руфе (Швейцария), Пхенвон Парк (Сингапур), Гарри Маклай (США), Сью Юйси Лан (Китай), Тихиро Окутани (Япония) создают датчики температуры на основе полупроводниковых материалов. Основным минусом новых температурных датчиков является их работа в узком диапазоне температур (-40÷120 °С).

В Российской Федерации В.М. Глазов, В.А. Добровольский, Ю.В. Зайцев, Шефтель и Г. Виглеб обратили большое внимание на широкое использование датчиков температуры в электронных устройствах. Русским ученым, академиком Ю.В. Гуляевым и его учениками было предложено создание новых основ по изготовлению терморезисторов, работающих на основе поверхностных акустических волн и обладающих высокой чувствительностью по отношению к существующим терморезисторам.

Учёные профессора Узбекистана, такие как, М.К. Бахадирханов, С. Зайнабидинов, Б. Эгамбердиев, М. Тошметов руководили исследованиями по созданию компенсированных кремниевых датчиков температуры. Базовая часть этих датчиков температуры имела высокое сопротивление  $\rho = 10^4 \div 10^5$  Ом·см и работала при сравнительно высоких напряжениях (9÷12В). Также акад. Р.А. Муминов, профессора: К.П. Абдурахманов, А.В. Каримов, А.З. Рахматов и А.С. Рисбаев, вели научные работы и создали множество новых датчиков. Однако датчики температуры на основе полупроводниковых материалов рассчитаны на работу в узком температурном диапазоне и имеют ограниченные возможности работы в экстремальных условиях.

На сегодняшний день технология сбора данных относительно дешева, проста в управлении во всех промышленных процессах и стабильна в рабочих параметрах, созданы датчики температуры с широким диапазоном измерения температуры (-60÷180°С) и имеются возможности их использования в автоматизированных системах. Однако эти технологии еще не полностью изучены.

**Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного или научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация.**

Диссертационное исследование выполнено в рамках практического проекта шифр ФЗ-2019060723, по теме «Разработка технологии создания измерительного комплекса на основе сверхвысокочувствительных новых структур датчиков температуры» в НИИ физики полупроводников и микроэлектроники при Национальный университет Узбекистана (2020-2023 гг.).

**Целью исследования** является создание кремниевых монокристаллических датчиков температуры, легированных примесными атомами Ni или Cu, а также разработка микроэлектронного устройства с автоматическим контролем температуры в системе опреснения воды на основе датчиков n-Si<Ni> и n-Si<Cu>.

**Задачи исследования:**

усовершенствование технологии диффузии атомов Ni или Cu в монокристалл Si;

Изготовление датчиков температуры толщиной 240÷250 мкм на основе кремния, легированного Ni и Cu.

Повышение чувствительности датчиков температуры, изготовленных на основе образцов Si<Ni> и Si<Cu>.

разработка микроэлектронного устройства, автоматически контролирующего температуру в системе опреснения воды в диапазоне 45÷60°C в реальном времени на основе полученных датчиков и повышения эффективности опреснения воды.

**Объектом исследования** являются датчики температуры на основе монокристалла кремния, легированные примесными атомами Ni или Cu, и микроэлектронное устройство на их основе, регулирующее температуру системы опреснения воды.

**Предметом исследования** являются образцы Si<Ni> и Si<Cu> n- и p-типа, легированные атомами Ni или Cu.

**Методы исследований.** Для выполнения поставленных задач были использованы следующие современные приборы, в частности для измерения удельного сопротивления применялся четырехзондовый прибор Jandel MR3000 для определения удельного сопротивления образцов, установка Escoria HMS-7000 и прибор измерения методом Ван дер Пау Escoria (HMS-5000) для определения типа проводимости, концентрации и подвижности основных носителей заряда. Для изучения морфологии поверхности образцов был использован сканирующий электронный микроскоп SEM EVO MA10. Для исследования температурной зависимости сопротивления был использован прибор Keithley 2400.

**Научная новизна** исследования заключается в следующем:

впервые на основе образцов n-Si<Ni> и n-Si<Cu> толщиной 240 мкм созданы датчики температуры с чувствительностью  $\beta_{Cu}=8200K$ ,  $\beta_{Ni}=8600K$  в диапазоне температур 25÷70°C ;

впервые в существующих датчиках температуры на основе Si в качестве дополнительного слоя использован металлический (никелевый) компенсатор. Вследствие этого чувствительность существующих датчиков повысилась на 8÷10%;

Впервые по результатам экспериментов установлено, что чувствительность сенсоров в водной и воздушной средах с температурой  $T=100^\circ C$  в воде на 17 процентов выше, чем в газовых средах для сенсоров n-Si<Ni> и n-Si<Cu>;

На основе датчиков n-Si<Ni> и n-Si<Cu> разработано микроэлектронное устройство, автоматически контролирующее температуру устройства опреснения воды в диапазоне 45÷60°C.

**Практические результаты исследования** заключаются в следующем:

разработана оптимальная технологии легирования монокристалла кремния никелем и легирование монокристалла кремния медью, диффузионным методом;

созданы благоприятные технологические условия для создания высокочувствительных датчиков температуры на основе тонких образцов Si<Ni> или Si<Cu> толщиной 240 мкм;

для повышения эффективности извлечения опресненной воды разработано микроэлектронное устройство на основе кремниевых датчиков, легированных никелем и легированных медью, автоматически контролирующие температуру системы опреснения воды в режиме реального времени.

**Достоверность результатов исследования-** при исследованиях электрофизических свойств образцов монокристаллов кремния, легированных никелем и легированных медью, до и после диффузии использовались стандартные и широко применяемые методы исследования и современные измерительные приборы Jandel MR3000 и Escoria HMS-5000 для измерения электрофизических параметров образцов с помощью метода Ван-дер-Пау. Для исследования морфологических свойств кластеров примесных атомов, формирующихся в легированном монокристалле кремния, использовался сканирующий электронный микроскоп SEM EVO MA10.

**Научное и практическое значение исследования.**

Научная значимость результатов исследования заключается в том, что при изготовлении датчиков температуры на основе Si, технология легирования примесными атомами Ni или Cu образцов позволяет получить n-Si<Ni> и n-Si<Cu>-образцы, а также расширить понимание явлений, происходящих под воздействием температуры.

Практическая значимость исследования заключается в том, что она открывает возможность изготовления датчиков температуры на основе n-Si<Ni> и n-Si<Cu> малыми партиями в лабораторных условиях и предусмотреть их практическое применение для контроля температуры при опреснении соленой воды.

**Внедрение результатов исследования.**

На основе полученных научных результатов при разработке микроэлектронного устройства, контролирующего температуру системы опреснения воды:

Температурные датчики с чувствительностью  $\beta_{Cu}=8200K$ ,  $\beta_{Ni}=8600K$  на основе образцов Si<Ni> или Si<Cu> толщиной 240 мкм, с повышенным коэффициентом чувствительности относительно существующих датчиков температуры на 8-10%, увеличение которых было получено за счет

использования металлического (никелевого) компенсатора в качестве дополнительного слоя, было применено в АО «FOTON» (Справка АО «Узэлтехсаноат» от 25 марта 2024 года № 345) для измерения температуры дважды ионизированной воды в пределах  $70 \pm 0,5$  °C. Полученные результаты позволили повысить эффективность производства на 3 процента по сравнению с существующими датчиками температуры.

С помощью датчиков на основе образцов Si<Ni> удалось автоматически контролировать температуру в системах опреснения воды и повысить ее эффективность, а также получен патент на полезную модель в Агентстве по имуществу Республики Узбекистан на «Устройство опреснения подземных вод» (№FAP 02349 от 28.04.2023г.). Использование научных результатов повысило эффективность опреснения подземных вод и обеспечило население качественной питьевой водой.

**Апробация результатов исследования.** Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 7 международных и 9 республиканских научно-практических конференциях.

**Публикации результатов исследований.** Всего по теме диссертации были опубликованы 24 научных работ, из них 6 в научных журналах, рекомендованных ВАК Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертации, 2 статьи опубликованы в зарубежных международных журналах, получен 1 патент на полезную модель.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка из 90 использованной литературы, 3 приложений, 120 страниц текста, 43 рисунков и 33 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обосновывается актуальность, необходимость темы диссертации и её совместимость с приоритетными направлениями развития науки и техники Республики Узбекистан, раскрывается степень изученности проблемы, цели, задачи и объект исследования, описывается предмет и метод исследования, приводятся практические результаты и научная новизна исследования, внедрения результатов исследования в практику, апробация работы, список опубликованных работ, а также размер и структура диссертации.

Первая глава диссертации под названием «**Полупроводниковые терморезистивные датчики и их перспективы**» содержит информацию об основных физических параметрах, достоинствах и недостатках широко используемых терморезистивных датчиках, анализ данных о перспективах терморезистивных датчиков, созданных на основе полупроводниковых материалов для измерения и контроля температуры. Также приведён анализ литературных данных о влиянии примесных дефектов, возникших при легировании полупроводниковых материалов атомами никеля или меди, на электрофизические свойства кремния. На основе анализа экспериментальных и теоретических данных обозначены цели и задачи диссертационной работы.

Во второй главе диссертации «Технология подготовки образцов n-Si<Ni> и n-Si<Cu> и методы измерения», представлена описание технологии подготовки образцов монокристаллического кремния для создания температурных датчиков на их основе, механическая резка, механическая и химическая обработка поверхности, формирование металлического слоя, диффузия примесных атомов никеля или меди в монокристалл кремния, метод измерения удельного сопротивления четырехзондовым метод, измерения концентрации и подвижности носителей заряда с помощью эффекта Холла и метода Ван Дер Пау в процессе создания датчиков температуры на основе входных образцов и основные электрофизические параметры образцов n-Si<Ni> и n-Si<Cu>.

Также в этой главе представлены методы исследования морфологии и химического состава групп примесных атомов, образующихся на поверхности образцов n- и p-типа.

В результате анализа имеющихся в литературе данных по созданию терморезистивных датчиков на основе легированных образцов в качестве исходных материалов использовался монокристалл кремния выращенный по методу Чохральского с удельным сопротивлением  $\rho \sim 5 \div 130 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  n и p типа проводимости, концентрация кислорода в образцах  $N_0 \sim 10^{17} \div 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , плотность дислокаций  $2,6 \div 4,5 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-2}$ . Многократно подчеркивается важность технологии резки, механической и химической обработки поверхности монокристалла кремния для того, чтобы создаваемые терморезистивные датчики имели одни и те же рабочие параметры. Представлены результаты исследования следующих способов резки исходного слитка монокристаллического кремния на пластины:

1. резка с помощью проволоки;
2. резка с помощью диска с внешним режущим алмазным слоем;
3. резка с помощью диска с внутренней режущим алмазным слоем;

Установлено, что наиболее удобными для резки дисков являются диски с внутренней режущим алмазным слоем.

После резки измерялась толщина кремниевых пластин с помощью микрометра после чего производилась шлифовка поверхности. Шлифовка кремниевых пластин производилась на стеклянной подложке с помощью абразивных микропорошков зернистость которых варьировалась  $3 \div 28 \text{ мкм}$ .

процесс шлифовки осуществляется в несколько этапов, с уменьшением размера зернистости микропорошка и камней одинакового веса (весом 5 кг):

сначала кремниевые пластины смачивались дистиллированной водой и приклеивались к 6 резиновым подложкам диаметром  $d=45 \text{ мм}$ , закрепленным на железном листе;

затем резиновая подложка размещается на изготовленную по ней железной форму;

далее включается шлифовальная машина, обычно машина вращается по часовой стрелке;

подбор скорости вращения зависит от используемой марки порошка и толщины пластин;

на столешницу ставится железная форма с приклеенными к резине кремниевыми пластинами, и на нее устанавливаются дополнительные нагрузки, чтобы она стала гладкой;

к шлифовальному станку прикреплены три подшипника, и их задача вращать пластины, прикрепленные к резине на станке, против часовой стрелки.

предварительное шлифование проводится на стеклянной подложке с карбидом кремния марки M14 до чистоты 6-7. Толщина удаляемого слоя 25÷30 мкм, скорость удаления 1,5 мкм/мин;

основное шлифование проводится на стеклянной подложке с карбидом кремния марки M10 до чистоты 8÷9. При скорости 1 мкм/мин удаляется поверхность толщиной 15÷20 мкм;

окончательное шлифование проводится на стеклянной подложке с карбидом кремния марки M5 до степени 10.

поверхность толщиной 5÷10 мкм получали при скорости 0,17 мкм/мин. Шлифовальными работами достигнута поверхность кремния чистотой 6÷10 классов.

Толщина снимаемого слоя составляет 40÷50 мкм в зависимости от толщины пластины кремния. Кремниевые пластины были доведены до одинаковой толщины. Причина этого в том, что примесные атомы, введенные в процессе диффузии, достигают одной и той же глубины. После шлифовки кремниевые пластины помещались в смесь с деионизированную водой и 10 г перекиси водорода (60%) с 200 г воды. Причина в том, что микропорошки не прилипают к валику. После процесса полировки пластины были очищены от технологических примесей, а размер кремниевых пластин был изменен с помощью микрометра. То есть толщина пластины не должна отличаться более чем на ±3 мкм от требуемой толщины.

В технологии химической обработки образцов решались следующие вопросы: очистка поверхности монокристаллического кремния от различных технологических загрязнений; удаление механически поврежденных участков на поверхности кремния; контролируемое изменение характеристик поверхности кремния (стабилизация толщины поверхности); контролируемая эрозия материала для получения образцов необходимой толщины; химическая деградация р-п перехода при контроле параметров готовых устройств; получение поверхности нужной формы; разделение кремниевой пластины на кристаллы; обнаружение дефектов в кристаллической структуре; изменение свойств поверхности; удаление оксидных слоев на поверхности и т. д.

При очистке поверхности кремниевой пластины последовательно удалялись химически связанные и молекулярно-органические примеси на поверхности, остаточные примеси ионного и атомарного масштаба. Обезжиривание поверхности кремниевых пластин проводили органическими растворителями и спиртами.

Неионизированные примеси (вазелин, минеральные масла, парафин) и растворы удаляли бензолом, толуолом, четыреххлористым углеродом. Ионизированные примеси (белки, жиры, поверхностно-активные вещества) очищали ионизированными растворами трихлорэтилена, ацетона, метилового, этилового и изопропилового спиртов. Обезжиривание органическими растворителями и спиртами проводили в кипящем растворе методом осаждения. Целью использования этого процесса является предотвращение повторного загрязнения во время очистки поверхности. В табл. 1 приведены различные соотношения компонентов раствора HF:HNO<sub>3</sub> для кремния.

**Таблица 1**

Тип	Состав, мл	Цель использования	Время обработки
CP-8	HNO <sub>3</sub> - 2, HF - 1	Химическая полировка	1-2 мин.
CP-4A	HNO <sub>3</sub> - 5, HF - 3, CH <sub>3</sub> COOH - 3	Химическая полировка и определение границы p-n перехода	2-3 мин.
Уайт кислота	HNO <sub>3</sub> - 3, HF - 1	[111] химическая полировка плоских пластин	15-30 сек.
ДЭШ кислота	HNO <sub>3</sub> - 3, HF-1, CH <sub>3</sub> COOH - 8-12	Аккуратно отполируйте пластины на всех текселях	От 1 часа до 16 часов

В дополнение к вышперечисленному кремниевые пластины также очищались с помощью ультразвуковой ванны. Сначала в ультразвуковую ванну заливали 2 литра деионизированной воды. Затем подготавливали мыльную воду, растирая детское мыло в 1 л деионизированной воды, кремниевые пластины помещались в железную (400 г) емкость и заливались 200 г приготовленной мыльной воды. После этого включали ультразвуковую ванну, промывка в мыльном растворе и последовательная промывка в чистой деионизированной воде длилась в течение 20 минут. После процедуры пластины промывались 4-5 раза в деионизированной воде и сушились под инфракрасной лампой при T=80÷90°C в течение 30 минут. Целью очистки кремниевых пластин в этом процессе является удаление примесей, застрявших между пластинами.

Для создания терморезистивных датчиков на основе монокристалла кремния использовались элементы Ni или Cu чистотой 99,999 %. Напыление металлического слоя атомов Ni или Cu на поверхность кремниевых пластин производился в вакуумной установке ВУП-4 при вакууме 10<sup>-6</sup> мм.рт.ст., а толщина полученного слоя (d<sub>Ni</sub> =600 нм, d<sub>Cu</sub> =715 нм) измерялся с помощью интерферометра марки ММИ-4. Диффузия атомов никеля или меди подготовленных образцов производилась в откаченных кварцевых ампулах с (2·10<sup>-3</sup> мм.рт.ст.).

Диффузионный отжиг проводился в диффузионной печи типа СОУЛ-4 при T= 1000÷1250°C от t = 10 минут до t = 2 часов. Температура в печи

измерялась и контролировалась с помощью платинородиевой термопары, помещенной рядом с кварцевыми ампулами чтобы отклонение заданной температуры не превышало  $t = (\pm 4 \div 5)^\circ\text{C}$ . После диффузии ампулы охлаждали в двух различных режимах, медленном при комнатной температуре ( $V_{\text{sov}} \approx 1 \div 5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{сек}$ ) и с быстрой скоростью в трансформаторном масле ( $V_{\text{sov}} \approx 230 \div 250 \text{ }^\circ\text{C}/\text{сек}$ ).

Для создания терморезистивных датчиков с p-n переходом была использована двухэтапная технология. Сначала был приготовлен диффузانت для обогащения кремниевых пластин фосфором. 2 г фосфора (аммоний-фосфорной кислоты 2-зам((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>)) для диффузии растворяли в 20 г деионизированной воды при  $T=60^\circ\text{C}$ . Готовый диффузانت наносился с помощью перекального материала на образец, далее маркировался карандашом и высушивался под инфракрасной лампой при  $t=90^\circ\text{C}$ . Диффузия фосфора производилась в диффузионной печи при  $T=1250 \text{ }^\circ\text{C}$  в течение  $t=2$  часов, затем процесс медленно охлаждался ( $V_{\text{sov}} \approx 0,1 \div 1 \text{ }^\circ\text{C}/\text{сек}$ ) при комнатной температуре.

Для получения металлического слоя никеля химическим методом на поверхности образцов кремния, обогащенных примесными атомами фосфора, подготавливался электролит в специальной кварцевой ёмкости на электрической плите при температуре  $T=70 \div 75^\circ\text{C}$  содержащая следующие компоненты: 100 мл дионизированной воды, хлорит никеля (NiCl<sub>2</sub>) - 2,1 г, хлорид аммония (NH<sub>4</sub>Cl) - 4,9 г, лимонная кислота (C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>7</sub>) - 7,9 г, гипофосфит натрия (NaH<sub>2</sub>PO<sub>2</sub>) - 1,7 г, 25% раствор аммиачной воды - 1 г (аммиак добавляется до состояния индикаторной бумаги 7-8 ходов). На поверхность пластин с фосфором наносился слой лака и пластины опускались в электролит. Пластины выдерживались в растворе в течение одной минуты. При формировании слоев металлического никеля поверхность пластин покрывался светло-желтым слоем.

Слой чистого металлического никеля, полученного после выдержки пластин в электролите, составило  $d=0,8$  мкм. Диффузия образцов осуществлялась в откаченных кварцевых ампулах ( $10^{-4}$  мм.рт.ст.). Диффузия проводилась в диффузионной печи марки СОУЛ-04412-М2-У4.2 при  $T=1250 \text{ }^\circ\text{C}$  в течение  $t = 2$  часов. Диффузионный отжиг проводился в диффузионной печи типа СОУЛ-4 при  $T=1000 \div 1250^\circ\text{C}$  от  $t=10$  минут до  $t=2$  часов. Температура в печи измерялась и контролировалась с помощью платинородиевой термопары, помещенной рядом с кварцевыми ампулами, отклонение заданной температуры не превышало  $T=(\pm 4 \div 5)^\circ\text{C}$ . После диффузии ампулы охлаждали в двух различных режимах, медленном при комнатной температуре ( $V_{\text{sov}} \approx 1 \div 5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{сек}$ ) и быстром, в трансформаторном масле со скоростью ( $V_{\text{sov}} \approx 230 \div 250 \text{ }^\circ\text{C}/\text{сек}$ ).

Электрофизические параметры образцов Si<Ni> и Si<Cu>, в частности, удельное сопротивление, концентрация и подвижность основных носителей заряда измерялись с помощью эффекта Холла, методом Ван-дер-Пау на современном приборе HMS5000, проводимость измерялась термозондом, приведены в табл.2.

Таблица 2

	T(°C)	V <sub>сов</sub> ≈ 2 °C/сек					V <sub>сов</sub> ≈ 250 °C/сек				
		Тип	ρ, (Ом·см)	μ, (см <sup>2</sup> /В·с)	n, (см <sup>-3</sup> )	E <sub>F</sub> , эВ	Тип	ρ, (Ом·см)	μ, (см <sup>2</sup> /В·с)	n, (см <sup>-3</sup> )	E <sub>F</sub> , эВ
Si<Ni	Исх	n	129	1341	3,6·10 <sup>13</sup>	0,35	n	129	1341	3,6·10 <sup>13</sup>	0,35
	Кант	n	135	1284	3,6·10 <sup>13</sup>	0,35	n	140	1253	3,7·10 <sup>13</sup>	0,35
	1150	n	5359	1135	1,1·10 <sup>12</sup>	0,42	n	9359	1103	6,1·10 <sup>11</sup>	0,35
	1200	n	10513	1081	5,5·10 <sup>11</sup>	0,46	n	18644	945	3,6·10 <sup>11</sup>	0,45
	1225	n	24351	931	2,8·10 <sup>11</sup>	0,47	n	68531	867	1,1·10 <sup>11</sup>	0,49
	1250	p	52522	386	3,1·10 <sup>11</sup>	0,45	p	97274	313	2,1·10 <sup>11</sup>	0,46
Si<Cu>	Кант	n	134	1267	3,7·10 <sup>13</sup>	0,35	n	139	1281	3,5·10 <sup>13</sup>	0,35
	1150	n	4521	1114	1,2·10 <sup>12</sup>	0,45	n	6532	1157	8,3·10 <sup>11</sup>	0,46
	1200	n	11314	992	5,6·10 <sup>11</sup>	0,46	n	15540	992	4,1·10 <sup>11</sup>	0,46
	1225	n	19562	917	3,4·10 <sup>11</sup>	0,47	n	38357	819	2,0·10 <sup>11</sup>	0,48
	1250	p	35285	310	5,7·10 <sup>11</sup>	0,43	p	69249	327	2,8·10 <sup>11</sup>	0,45

Время диффузии t = 2 часа

Положение уровня Ферми в запрещенной области рассчитывалось по следующим формулам:

$$E_c - F = kT \ln e \mu_n \rho N_c \quad (1)$$

$$F - E_v = kT \ln e \mu_p \rho N_v \quad (2)$$

где:  $\mu_n$ ,  $\mu_p$  – подвижность электронов и дырок соответственно,  $\rho$  – удельное сопротивление материала,  $e$  – заряд электрона,  $N_c = 2,4 \cdot 10^{19}$  и  $N_v = 8,5 \cdot 10^{18}$  – плотность состояний в зоне проводимости и валентной зоне электронов и дырок соответственно,  $k$  – постоянная Больцмана.

При исследовании поверхности образцов изображение поверхности снималось вторичным (SE-детектор вторичных электронов) детектором, где на нить подавалось ускоряющее напряжение 10÷20 кВ. При исследовании поверхности образца рабочее расстояние (WD-working Distance) составило 8,5 мм. Для удаления оксидного слоя с поверхности образцов порошком M10 было отшлифовано 30 мкм. Согласно измерению с помощью СЭМ, основной состав образца, легированного медью, представляет собой кремний, 92 мас.%, примерно 5 мас.% меди, 1,4 мас.% олова и 1,3 мас.% кислорода. Образец, легированный никелем, имеет содержание кремния 94 мас.%, никеля около 3,5%, кислорода 1,7%, углерода 0,7% и алюминия 0,6%. После диффузионной термообработки на поверхности образцов образовывались кластеры атомов меди и никеля, а количество кремния уменьшилось. Данные результаты указывают на достоверность наших измерений электрических параметров легированных образцов.

Примесный слой с фосфором был удален с поверхности образца с помощью шлифовки порошками M5 до 3 мкм. Основной состав образца состоял из кремния 98,6 % по массе, а процентное содержание фосфора составило 1,4 % по массе. Полученные данные указывают, что на поверхности образца сформировались кластеры атомов Si<P>. На одной стороне образца,

легированного фосфором, концентрация фосфора увеличилась, и в результате измерений на участке толщиной 6 мкм образовалась область  $n^{++}$ , что свидетельствует о том, что концентрация выше, чем  $n=10^{19}\text{см}^{-2}$ . Область  $n^{++}$  позволила получить структуры  $p$ - $n$ -перехода путем легирования другой стороны полученного образца никелем.

В третьей главе диссертации «Разработка датчиков температуры на основе образцов  $n\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$  и  $n\text{-Si}\langle\text{Cu}\rangle$ », представлены описание получение омического контакта на образцах и разделения их на кристаллы с помощью химического метода, пайка и герметизация датчиков, также результаты экспериментальных исследований, полученных с использованием современных методов, закономерности температурной зависимости сопротивления датчиков температуры, созданных датчиков температуры на основе образцов  $n\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$  и  $n\text{-Si}\langle\text{Cu}\rangle$ .

Приведены значения коэффициента температурной чувствительности датчиков температуры на основе образцов  $n\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$  и  $n\text{-Si}\langle\text{Cu}\rangle$  при низких и высоких температурах и ВАХ датчиков на основе омического контакта и  $p$ - $n$  перехода.

Также приведены результаты работ и исследований по калибровке датчиков температуры.

Создание омического контакта для приборов, выполненных на основе полупроводниковых материалов, является одним из основных процессов технологического процесса и оказывает большое влияние на качество создаваемых устройств и рабочие параметры. Выбор металлов для омического контакта терморезистивных датчиков осуществляется с учётом работы выхода используемого материала. Процесс создания омического контакта осуществлялся с учетом следующих условий: то есть при создании омического контакта для монокристалла кремния  $n$ -типа в литературе упоминается, что работа выхода полупроводникового материала должна быть больше или равно работе выхода металла. При условии  $\phi_{\text{я}} < \phi_{\text{м}}$  можно получить Барьера Шоттки. Для монокристалла кремния  $p$ -типа омического контакта получается, если работа выхода полупроводникового материала  $\phi_{\text{я}}$  меньше работы выхода металла  $\phi_{\text{м}}$  то есть  $\phi_{\text{я}} < \phi_{\text{м}}$ , если же равенство имеет такой вид  $\phi_{\text{я}} > \phi_{\text{м}}$ , то можно получить Барера Шоттки.

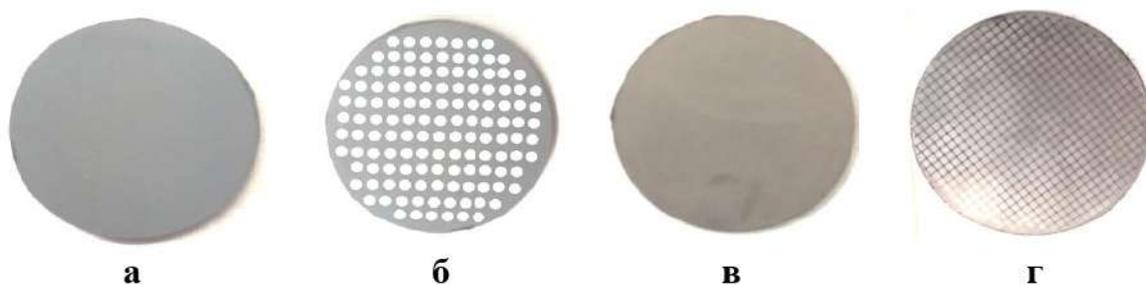
Омические контакты представленные на (рис. 1(б) и 1(в)), для терморезистивных датчиков на основе образцов  $\text{Si}\langle\text{Ni}\rangle$ ,  $\text{Si}\langle\text{Cu}\rangle$  и  $\text{Si}\langle\text{P},\text{Ni}\rangle$  были получены с помощью вакуумного поста ВУП-4. Металл серебра (Ag) и никеля (Ni) размещался в тигель из термостойкой вольфрамовой спирали и далее на эту спираль подавалось напряжение, атомы серебра или никеля напылялись на поверхность образцов. Техническое описание получения металлического слоя на пластинах полупроводникового монокристалла кремния приведено в таблице 3.

**Таблица 3**

Тип устройства	Метод напыления	Пыльный материал	Значение вакуума, Па	Диаметр пластин, мм	Количество во пластин

ВУП-4	резистивный	Металл	$5,5 \cdot 10^{-5}$	20 ÷ 42	5
-------	-------------	--------	---------------------	---------	---

При осуществлении омического контакта химическим методом его также осуществляют на основе переноса слоев металлического никеля на поверхность кремния. Перед получением омических контактов химическим методом поверхность кремниевых пластин полировалась микропорошком М-7 и удалялся оксидный слой с поверхности пластин с помощью HF-кислоты. Электролит, используемый при формировании слоя металлического никеля имел следующий состав: 100 мл деионизированной воды, 2.1 г хлорид никеля ( $\text{NiCl}_2$ ), 4.9 г хлорид аммония ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ), 7.9 г лимонная кислота ( $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ ), 1.7 г гипофосфит натрия ( $\text{NaH}_2\text{PO}_2$ ), 1 г 25% водного раствора аммиака (аммиак добавляется до тех пор, пока индикаторная бумага покажет 7-8 pH). Пластины выдерживались в растворе  $45 \pm 5$  секунд при температуре  $T = 85 \pm 5^\circ\text{C}$ . При формировании слоев металлического никеля поверхность пластин покрывалась светло-желтым слоем (рис. 1(в)). Химический процесс контролировался для того, чтобы слой металлического никеля не имел различных пустот и слоев с плохой адгезией.

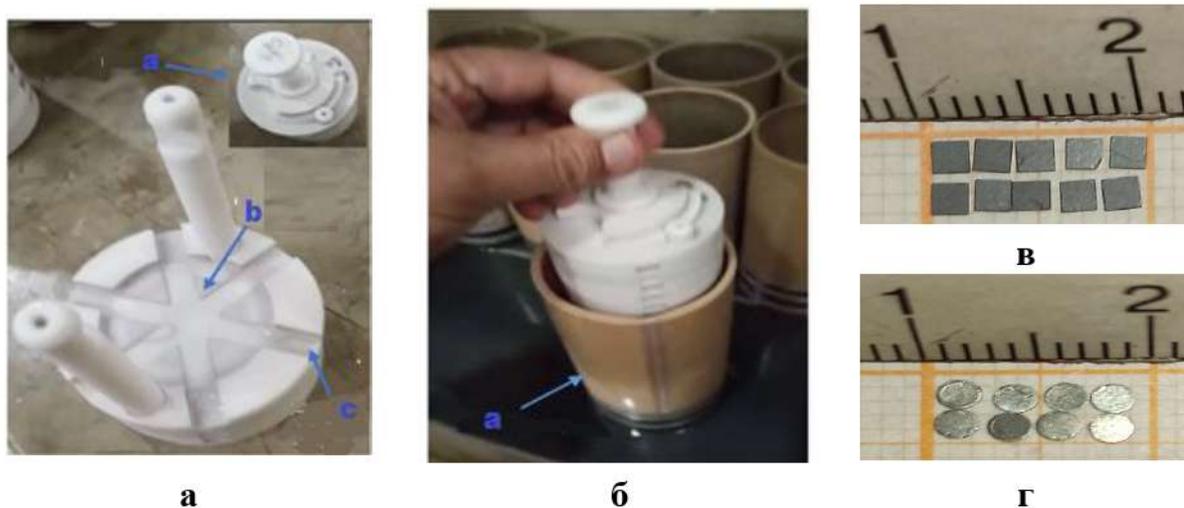


**Рис.1.** Исходный образец Si<Cu>; б) омический контакт, полученный в вакууме; в) омический контакт, полученный химическим методом; г) образец с фоторезистом

Сначала на поверхность пластин для образцов с омическим контактом наносим фоторезист. Фоторезист – светочувствительная полимерная пленка, с помощью которой мы можем маркировать образцы необходимого размера. Поверхность пластин с фоторезистом становится устойчивым к химическому и механическому воздействию. В экспериментах был использован позитивный фоторезист марки ФП-2550. Нанесение фоторезиста производилось поэтапно: фоторезист марки ФП-2550 пропускался через фильтровальную бумагу; на одну сторону образца с помощью пипетки наносили каплю фоторезиста; пластина с фоторезистом вращалась в центрифуге в течение 20 секунд для того, чтобы полностью покрыть поверхность образца; образцы фоторезиста прогревались в печи с температурой  $T = 100^\circ\text{C}$  в течение 30 минут; также подготавливался шаблон необходимого размера, очищался и протирался спиртом, проверялся на целостность под микроскопом; на поверхность пластин размещался шаблон и выдерживался в специальном приборе под инфракрасным светом в течение 30 секунд; затем выдерживался в ёмкости с щёлочью калия в течении 3 секунд; промывался в деионизированной воде и

сушился в печи при  $T=100\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение одного часа. Результат полученного фоторезистора приведен на (рис. 1(г).)

После нанесения фоторезиста на пластины подготовливался кислота для разделения пластин на кристаллы. Подготовка чистоты производилась поэтапно: в полиэтиленовой емкости смешивался один объем кислоты HF и восемь объемов азотной кислоты  $\text{HNO}_3$  ( $\text{HF}:\text{HNO}_3=1:8$ ). Эта смесь заливается в емкость специального вращающегося устройства. Чаша устройства вращается под углом 45 градусов, механизм и устройство для осуществления процесса приведены на (рис.2(а) и 2(б)).



**Рис.2.** а) помещение образцов в контейнер; б) процесс кристаллизации; в) внешний вид образцов; г) никелевые компенсаторы

Образцы кремния помещались в контейнер и опускались в чашу с кислотой. Чаша устройства вращается 3600 раз в час под углом 25 градусов. Разделенные кристаллы выпадают из емкости через специальную прорезь (рис.2(в).) После 14 минут контейнер вытаскивался из чаши с кислотой. Кристаллы промывались в деионизированной воде.

На поверхность кристаллов припаивались никелевые компенсаторы с залуженными сторонами толщиной 130 мкм. Компенсаторы были вырезаны из никелевого листа диаметром 2 мм на специальных станках (рис.2(г).).

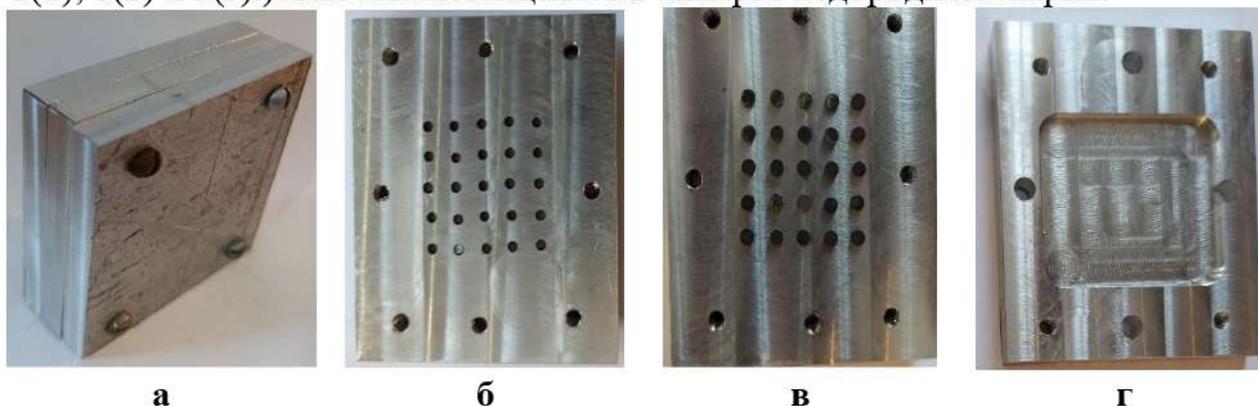
Затем готовые компенсаторы кипятили в растворе толуола в течение 15 минут, промывали деионизированной водой и сушили при комнатной температуре. Образцы были помещены в контейнер, показанный на рисунке (рис.3(а).)

Компенсатор, затем кристалл (образец), затем компенсатор после образца помещали в лунки контейнера и закрывали крышку кассеты. (рис. 3(б), 3(в) и 3(г).).

До пайки компенсаторы кипятились в растворе толуола в течение 15 минут, промывались в деионизированной воде и сушились при комнатной температуре. Образцы помещались в кассету, показанную на (рис.3(а).)

Сначала в отверстия кассеты, предназначенной для размещения кристалла, помещались компенсаторы, затем кристаллы (образец), после

кристаллов помещались компенсаторы и закрывалась крышка кассеты (рис. 3(б), 3(в) и 3(г)). Кассета помещалась в аппарат водородной сварки.



**Рис.3.** а) обзор емкости для сварки; б) место для размещения кристалла; в) мешки, прессующие кристалл; г) место для сдачи багажа.

Пайка производилась в специальных печах с электрообогревом в газовой среде, для снижения процесса окисления металлов. Доставка собранных деталей для пайки к рабочему месту наиболее используемых камерных электропечей с регулируемой атмосферой осуществлялась с помощью ленточного конвейера, роликовой системы или специальных толкателей.

В процессе пайки детали проходят через три камеры: камера предварительного нагрева, камера нагрева и камеру охлаждения. Во всех трех камерах создавалась защитная газовая среда под небольшим избыточным давлением. Защитные газы применялись не только для защиты припаиваемого металла от окисления при нагреве, но и для удаления с их поверхности имеющихся оксидов.

Способ не требует применения флюса, что является его существенным техническим преимуществом, удешевляет пайку и снижает трудоемкость процесса, так как не требует операции нанесения флюса и удаления остатков флюса в конце пайки. Процесс пайки представлен на (рис. 4(а)).

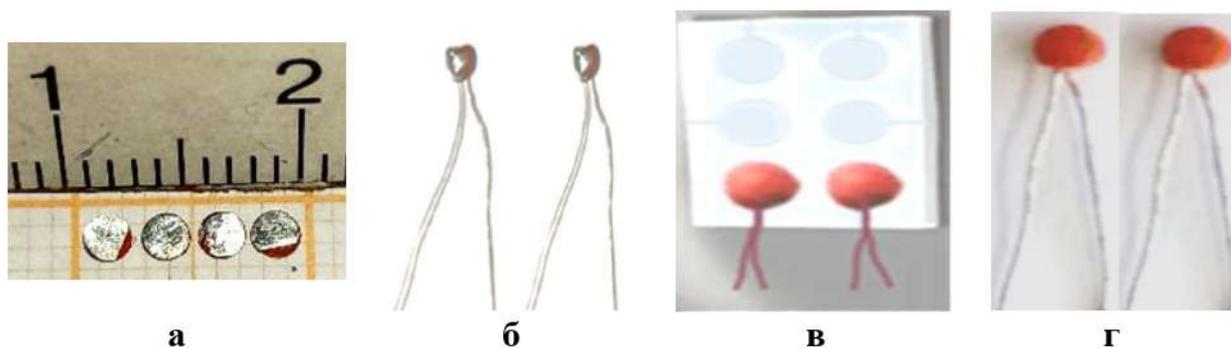
Выходные электроды (контакты) изготавливались из металлических проволок с низкой теплопроводностью. При этом, если теплопроводность электродов велика, точность и быстрдействие датчиков температуры снизятся.

Электроды длиной 4 см были изготовлены из мягкой медной проволоки диаметром  $d = 0,3$  мм. Медные провода промывались в спирте, погружались в специальный флюс, далее опускались в емкость с оплавленным оловом, а затем с помощью паяльника припаивались к датчикам (рис.4(б)).

Герметизация терморезистивных датчиков осуществляется с целью защиты их от различных внешних воздействий (воды, влажности, нарушения целостности контактов и различных механических воздействий), защищенные от внешних воздействий терморезистивные датчики повышают точность и надежность измерения температуры.

Теплопроводность материала используемого для герметизации также должна быть высокой. Это улучшает взаимодействие терморезистивных датчиков с измеряемой средой, увеличивает скорость работы и одновременно

снижает выделение тепла за счет тока, проходящего через терморезистивные датчики.



**Рис.4.** а) подготовленный датчик температуры; б) датчик, от которого взяты выходные контакты; в) герметичный датчик; г) готовый датчик

Для процесса герметизации была изготовлена силиконовая форма с заданными размерами терморезистивных датчиков.

Внутри подготовленной формы помещались терморезистивные датчики и заливались эпоксидным компаундом, типа ЭКЛБ-10. Терморезистивные датчики после покрытия компаундом сушились при температуре  $85 \div 90^\circ\text{C}$  в течение 1 часа.

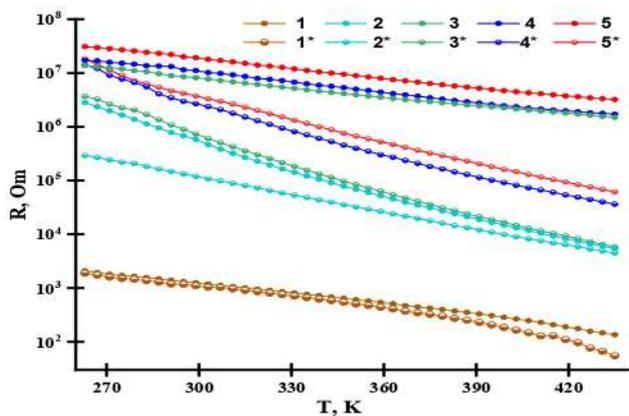
Для защиты терморезистивных датчиков от различных механических воздействий использовался компаунд ЭМ-3. Сушка и полимеризация компаунда проводилась при температуре  $T=80^\circ\text{C}$  в течение  $t=4$  часов, при  $T=120^\circ\text{C}$  в течение  $t=12$  часов, и при  $T=140^\circ\text{C}$  в течение  $t=24$  часов, то есть при высоких температурах. Фотографии силиконовой формы и образцов, до и после герметизации представлены на (рис.4(в) и 4(г).)

Также были исследованы и рассчитаны температурные зависимости сопротивления подготовленных терморезистивных датчиков на основе кремния с помощью ниже приведенных формул:

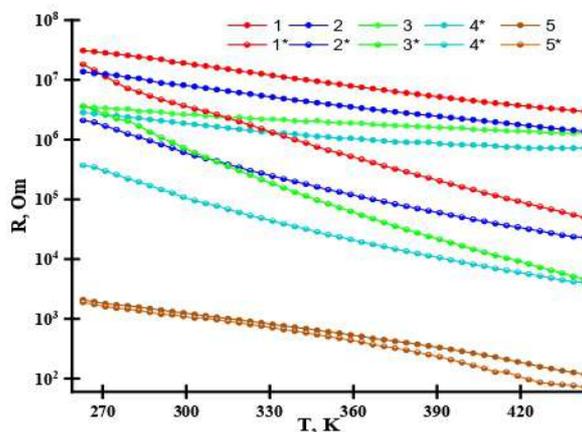
$$\alpha = \frac{1}{\rho_0} \frac{\Delta\rho}{\Delta T} \quad (3) \quad \beta = \frac{\ln \rho_0 / \rho}{\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}} \quad (4)$$

где  $\beta$  – коэффициент чувствительности и  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления.

Для исследования температурной зависимости сопротивления образцы нагревались с  $T=-10^\circ\text{C}$  с шагом  $1^\circ\text{C}$  до достижения температуры  $170^\circ\text{C}$  а для низких температур в термостат заливался жидкий азот. Измерения производились с помощью универсального прецизионного мультиметра Keithley 2400.



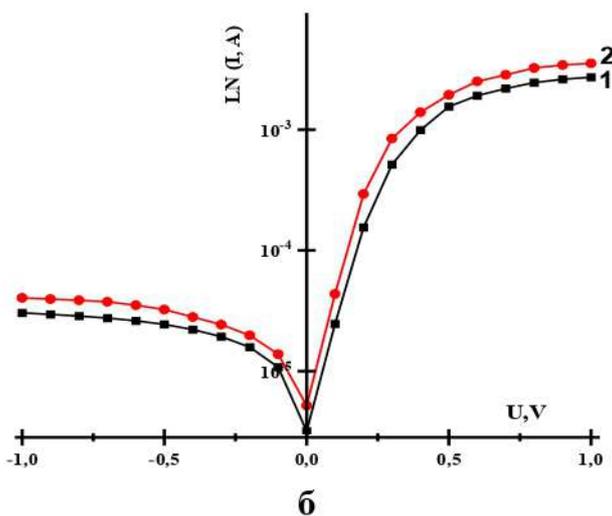
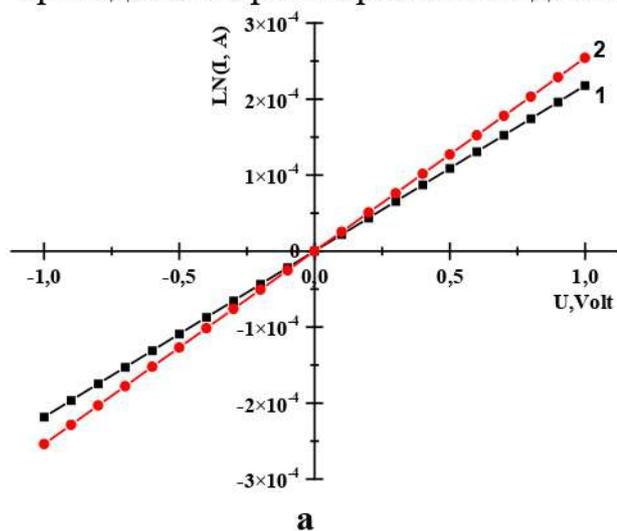
**Рис. 5.** Si<Ni> быстро и (\*)медленно охлажденные образцы  
 1;1\* -  $T_H=1250^{\circ}C$ ; 2;2\* -  $T=1150^{\circ}C$ ; 3;3\* -  $T=1200^{\circ}C$ ; 4;4\* -  $T=1225^{\circ}C$ ;  
 5;5\* -  $T=1250^{\circ}C$ ;



**Рис. 6.** Si<Cu> быстро и (\*)медленно охлажденные образцы  
 1;1\* -  $T_H=1250^{\circ}C$ ; 2;2\* -  $T=1150^{\circ}C$ ; 3;3\* -  $T=1200^{\circ}C$ ; 4;4\* -  $T=1225^{\circ}C$ ;  
 5;5\* -  $T=1250^{\circ}C$ ;

Коэффициент  $\alpha$  и  $\beta$  для терморезистивных датчиков изготовленных на основе Si<Ni>, Si<Cu>, Si<P,Ni> рассчитанных по формуле 3 и 4 имели следующие значения: при комнатной температуре  $T=30^{\circ}C$   $\alpha = -4,3 K^{-1}$ ,  $\beta = 8375 K$ , при медленном охлаждении этих образцов  $\alpha = -3,6 K^{-1}$  га,  $\beta = 7615 K$ , изготовленные на основе образцов Si<Cu>  $\alpha = -3,2 K^{-1}$ ,  $\beta = 7262 K$ , при медленном охлаждении этих образцов  $\alpha = -2,3 K^{-1}$  га,  $\beta = 6249 K$ . Результаты измерений представлены на рис. 5 и 6. Из вышеизложенного можно сделать вывод что, чем выше температура и время диффузии образцов и время охлаждения, тем лучше значения  $\alpha$ ,  $\beta$ , R и  $\rho$ .

При измерении ВАХ генерируемых датчиков температуры измерение проводилось при напряжении в диапазоне ( $\pm 1$ ) вольт.



**Рис.7.** а) n-Si<Ni> б) n-Si<P,Ni> без 1-компенсатора, с 2-компенсатором

Как видно на рис. 7(а) и 7(б) ВАХ датчиков созданных с использованием компенсаторов, относительно без компенсаторных датчиков, улучшилась, а их мощность увеличилась в 1,5 раза.

Как известно, сопротивление полупроводниковых материалов уменьшается с повышением температуры. Для сравнения основных рабочих параметров образцы Si<Ni>, Si<Cu> и Si<P,Ni> помещали в термостат

отдельно и измерялось сопротивления цифровым мультиметром Rego1 DM5830E.

**Таблица 4**

T, °C	Без компенсатора			С компенсатором		
	$R_{Si<Ni>}$	$R_{Si<Cu>}$	$R_{Si<P,Ni>}$	$R_{Si<Ni>}$	$R_{Si<Cu>}$	$R_{Si<P,Ni>}$
20	2008032,1	1677852,3	1290436,4	6329113,9	6738544,4	719424,46
21	1937984,4	1628664,4	1281469,2	6112469,4	6561679,8	683181,43
22	1872659,1	1587301,5	1272502,4	5917159,7	6353240,1	641848,52
23	1824817,5	1552795,1	1263534,8	5675368,8	6209637,3	601684,71
24	1754385,9	1506024,4	1254567,5	5500550,0	6045949,2	570125,42
25	1718213,0	1470588,2	1245600,3	5330490,4	5882352,9	567905,68
26	1672240,8	1428571,4	1236633,1	5144032,9	5747126,4	565685,94

При анализе результатов были обнаружено, что ВАХ терморезисторных датчиков с компенсатором и при герметизации поверхности, при быстром охлаждении после диффузии улучшена в 1,5 раза. График ВАХ представлена на (рис. 7(а) и 7(б)).

Четвертая глава диссертации под названием «**Разработка микроэлектронного устройства контроля температуры системы опреснения воды**» содержит сведения о ВАХ датчиков температуры из Si<Ni> материала на основе p-n перехода, условия опреснения воды при температуре 45÷60°C и технологическом процессе в режиме реального времени, об автоматическом контроле микроэлектронного потока и измерении температуры.

Также разработаны первые образцы современных микроэлектронных измерительных приборов на основе датчиков температуры Si<Ni> и представлена последовательность их использования.

Система очистки воды состоит из опреснительного устройства, с помощью которого получают опресненную воду и соли. Устройство соединено трубой с насосом скважины "водозабор". Опреснительное устройство выполнено в виде вакуумно-испарительного устройства, соединенного с двумя вакуумными насосами, в котором выход насосов соединен с коллекторной емкостью для опресненной воды. Вакуумные насосы на базе микроэлектронных устройств с датчиками Si<Ni> попеременно обеспечивают непрерывную работу устройства, а также автоматический контроль температуры с интервалами 45÷60°C в режиме реального времени.

Задачи компонентов электронного устройства заключаются в следующем: Электронная часть, измеряющая температуру на основе датчиков температуры, разработанные на основе монокристалла кремния, состоит из основных блоков: Arduino Mega 2560 на базе микроконтроллера Atmega, соединительных частей к 328-микроконтроллеру (TFT-экран 240x340, датчик температуры, кнопки, плата GSM, Bluetooth, зарядного устройства, источник постоянного тока, переключатель, SD-разъём, USB-порт и выходной порт) (рис.8.)



**Рис.8.** Блок-схема электронного устройства

Задачи организаторов электронного устройства заключаются в следующем.

1. С помощью специального программного обеспечения, написанного на микроконтроллере Arduino Mega-5260 Atmega, можно соединить все датчики между собой, управлять каждым подключенным датчиком, обрабатывать входящие или передаваемые данные, а также отправлять обработанные данные в нужное место.

2. TFT-экран 240 x 340 — его функция — отображение данных, поступающих с датчиков.

3. Датчики температуры на основе Si<Ni> или Si<Cu> — основная функция этих датчиков — измерение температуры.

4. Кнопки — написанная для устройства программа осуществляет необходимую настройку и доступ к меню.

5. GSM-модуль предназначен для передачи данных в Интернет.

6. Bluetooth — позволяет отслеживать информацию, поступающую с электронного устройства, с помощью телефона.

7. Зарядное устройство — используется для зарядки диодного источника.

8. Источник постоянного напряжения (9в) представляет собой аккумулятор, работающий независимо от сети и питающий источником все подключенные датчики.

9. Переключатель — используется для выключения и включения электронного устройства.

10. Модель SD-card сохраняет полученные данные.

11. Порт USB — используется для записи программы в микроконтроллер и передачи данных на компьютер.

12. Выходной порт — контролирует все необходимые датчики, подключенные к электронному устройству, и служит для других задач. Интерфейс регулятора температуры.

Использование устройства.

Электронное устройство в начале включается выключателем и производится настройка в следующих режимах:

В режиме R0. Позволяет просматривать день, месяц и год на экране 240 x 340 TFT электронного устройства и позволяет внести необходимые настройки.

В режиме R1. Позволяет выбрать режим измерения в двух видах, первое в горячем или второе в холодном режиме. S означает холодный режим, H означает горячий режим.

В режиме R2. Позволяет просматривать значение температуры на экране электронного устройства, значение температуры можно просматривать в градусах Цельсия, Кельвина, Фаренгейта. (A-Цельсия и Кельвина, B-Цельсия и Фаренгейта, S-Кельвина и Фаренгейта).

В режиме R3. Позволяет ввести максимальный и минимальный предел (0,1-30 °C) измерения температуры, когда устройство работает в горячем или холодном режиме.

В режиме R4. Можно ввести максимальное значение температуры, когда устройство работает в режиме обогрева. В этом случае максимальный предел (+250 °C)

В режиме R5. Минимальное значение температуры можно ввести, когда устройство работает в холодном режиме. В этом случае минимальный предел (-100°C)

В режиме R6. Если необходимо заменить датчик температуры в электронном устройстве на другой, а температура отличается на несколько градусов, то необходимо установить это значение. В этом случае предел ( $\pm 50$  °C)

В режиме R7. при возникновении ошибок электронное устройство включает сигнализацию. В этом режиме, если нужен звук, выбирается X-да, если звук не нужен, выбирается Y-нет.

В режиме R8. При необходимости устройство позволяет запись информации в постоянную память, при этом выбирается X-да, если данные нужны, а если они не нужны выбирается Y-нет.

В режиме R9. Позволяет передавать через Bluetooth с рабочего устройства на телефон информацию о работе устройства и данные проведенных измерений.

В режиме R10. Контролирует активность дисплея для того, чтобы экран электронного устройства оставался включенным постоянно или мог быть выключенным через определенное время.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Приготовлены образцы n-Si<Ni> и n-Si<Cu> путем легирования примесными атомами Ni или Cu монокристалла Si при  $T=1250^{\circ}\text{C}$  в течение 2 часов методом диффузии, и установлено, что оптимальные удельные сопротивления для образцов Ni и Cu составили  $\rho=8.8 \cdot 10^4$  Ом·см и  $\rho=4.7 \cdot 10^4$  Ом·см, соответственно.

2. Использованы кислоты HF и HNO<sub>3</sub> для разделения образцов n-Si<Ni> и n-Si<Cu> на кристаллы посредством химического травления и использованы

для защиты их от различных внешних воздействий (воды, влажности, различных механических воздействий, а также обеспечения надежности контактов) компаунды ЭКЛБ-10 и ЭМ-3.

3. На основе образцов  $n\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$  и  $n\text{-Si}\langle\text{Cu}\rangle$  толщиной 240 мкм созданы датчики температуры с чувствительностью  $\beta_{\text{Cu}}=8200\text{K}$ ,  $\beta_{\text{Ni}}=8600\text{K}$  в диапазоне температур  $25\div 70^\circ\text{C}$ .

4. В существующих датчиках температуры на основе Si в качестве дополнительного слоя использован металлический (никелевый) компенсатор. Вследствие этого чувствительность существующих датчиков повысилась на  $8\div 10\%$ ;

5. По результатам экспериментов установлено, что чувствительность сенсоров в водной и воздушной средах с температурой  $T=100^\circ\text{C}$  в воде на 17 процентов выше, чем в газовых средах для сенсоров  $n\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$  и  $n\text{-Si}\langle\text{Cu}\rangle$ ;

6. На основе датчиков  $n\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$  и  $n\text{-Si}\langle\text{Cu}\rangle$  разработано микроэлектронное устройство, автоматически контролирующее температуру устройства опреснения воды в диапазоне  $45\div 60^\circ\text{C}$ .

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

---

**INSTITUTE OF SEMICONDUCTORS PHYSICS AND  
MICROELECTRONICS OF THE NATIONAL UNIVERSITY OF  
UZBEKISTAN**

**MANNANOV MUZAFFAR IBRAGIMOVICH**

**DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR CREATING SUPER-  
SENSITIVE THERMORESISTIVE SILICON**

**01.04.10 - Physics of semiconductors**

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

**Tashkent – 2025**

The theme of the dissertation of the doctor of philosophy (PhD) on technical sciences was registered by the Supreme Attestation Commission under the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2023.4.PhD/T1502.

The dissertation was carried out at the Research Institute of Physics of Semiconductors and Microelectronics of the National University of Uzbekistan

The abstract of the dissertation was posted in three (Uzbek, Russian, English (resume)) languages on the website of the Scientific Council at [www.ispm.uz](http://www.ispm.uz) and on the website of "ZiyoNet" Information and Educational Portal at [www.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz).

**Scientific supervisor:** **Kodashov Obbozjon Khokimovich**  
Doctor of technical sciences, professor

**Official opponents:** **Tagaev Marat Baimuradovich**  
Doctor of technical sciences, professor

**Rakhmanov Anvar Tajibevich**  
Doctor of technical sciences, professor

**Leading organization:** **Namangan Institute of Engineering and Construction**

The defense of the doctoral dissertation will be held on "27" 03 2025, at 10<sup>00</sup> at the meeting of the Scientific Council No. DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 at the Scientific Research Institute of Physics of Semiconductors and Microelectronics of the National University of Uzbekistan (Address: 20 Yangi Olmazor str., 100057 Tashkent city, Uzbekistan. Tel. (+99871) 248-79-94, fax: (+99871) 248-79-92, e-mail: [info@ispm.uz](mailto:info@ispm.uz))

The doctoral dissertation can be looked through in the ICT Implementation Unit (registered under No 67). Address: 20 Yangi Olmazor str., 100057 Tashkent city, Uzbekistan. Tel.: (+99871) 248-79-59, e-mail: [info@ispm.uz](mailto:info@ispm.uz).

The abstract of the dissertation was distributed on "14" 03 2025.  
(Registry record No. 67 dated "14" 03 2025)



**Sh.B.Utamuradova**  
Chairwoman of the Scientific Council for the award of scientific degrees, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

**J.J.Khamdamov**  
Scientific Secretary of the Scientific Council for the award of scientific degrees, PhD

**N.A.Turgunov**  
Chairman of the Scientific Seminar at the Scientific Council for the Awarding of Academic Degrees, Doctor of Physical and Mathematical sciences, associate professor

## INTRODUCTION (abstract of the PhD dissertation)

**The aim of the study** the aim of the study is to create silicon single-crystal temperature sensors doped with Ni or Cu impurity atoms, as well as to develop a microelectronic device with automatic temperature control in a water desalination system based on n-Si<Ni> and n-Si<Cu> sensors.

### **The objectives of the research:**

improvement of the technology of diffusion of Ni or Cu atoms into single crystalline Si;

Design of temperature sensors with a thickness of 240-250  $\mu\text{m}$  based on silicon doped with Ni and Cu.

Increasing the sensitivity of temperature sensors produced on the basis of Si<Ni> and Si<Cu> samples.

development of a microelectronic device for the automatic control of temperature in a water desalination system in the range of 45÷60°C in real time based on the designed sensors and increasing the efficiency of water desalination process.

**The object of the study** qualitatively, Ni or Cu are atoms of doped monocrystalline silicon with a temperature sensor and a souvenir based on microelectronic temperature control.

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

for the first time, temperature sensors with a sensitivity of  $\beta_{\text{Cu}}=8200\text{K}$ ,  $\beta_{\text{Ni}}=8600\text{K}$  in the temperature range of 25÷70°C were received based on n-Si<Ni> and n-Si<Cu> samples with a thickness of 240  $\mu\text{m}$ ;

For the first time, an additional nickel layer was used as an additional layer for Si-based sensors. As a result, the sensitivity of existing sensors had increased by 8÷10%;

According to the first results of the experiments, it was established that the sensitivity of the sensors in water and air medium with a temperature of  $T=100^\circ\text{C}$  and liquid is higher than 17 percent, and in gas medium for sensors n-Si<Ni> and n-Si<Cu>;

Based on n-Si<Ni> and n-Si<Cu> sensors, a microelectronic device has been developed that automatically controls the temperature of a water desalination device in the range of 45÷60°C.

### **Implementation of results of the research**

Based on the scientific results received in the course of designing of the microelectronics device which controls the temperature of the water desalination system:

Temperature sensors with sensitivity of  $\beta_{\text{Cu}}=8200\text{K}$ ,  $\beta_{\text{Ni}}=8600\text{K}$  based on Si<Ni> and Si<Cu> samples with a thickness of 240  $\mu\text{m}$ , with an increased sensitivity coefficient relative to existing temperature sensors by 8-10%, the increase of which was obtained due to applying metal (nickel) compensator as an additional layer, were implemented in JSC "FOTON" (Reference Letter of JSC "O'zeltexsanoat" on March 25, 2024, № 345) for measurement of temperature of double-ionized water within the range of 70±0.5 °C. The obtained results allowed to

increase production efficiency by 3 percent compared to when using the existing temperature sensors.

By using the sensors based on the Si<Ni> samples, there appeared the possibility to control the temperature in the water desalination system and thus increase its efficiency and also a Patent for Useful Model was received in the Agency of Property of the Republic of Uzbekistan for “The device for desalination of underground waters” (№FAP 02349 on 28.04.2023). The use of scientific results allowed to increase the efficiency of desalination process of underground waters and provided clean drinking water for the population.

**The structure and volume of the dissertation.** The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion, and a list of 90 titles of used literature, 3 appendices, 120 pages of text, 43 illustrations, and 33 tables.

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

**I бўлим (1 часть; part 1)**

1. X.S. Daliyev, O.X. Qo‘ldashov, Y.S. Shangin, M.I. Mannanov, G.S. Mirzayeva. Yerosti suvlarini tuzsizlantirish qurilmasi // O‘zbekiston Respublikasi Adliya vazirligi foydali model patenti. FAP 02349. Toshkent. 23.10.2023.

2. O.X. Kuldashov, M.I. Mannanov. Исследования влияния условий отжига и параметров исходного материала для разработки технологии получения с заданными параметрами // Физика полупроводников и микроэлектроника. 2022, №6, стр.9-15. (01.00.00; №16)

3. O.X. Kuldashov, M.I. Mannanov., Физико-технологические возможности создания терморезистивных датчиков на основе монокристалла кремния, легированного атомами меди // Физика полупроводников и микроэлектроника. 2022, №9, стр.13-18. (01.00.00; №16)

4. A.N. Kuldashev, Y.A. Saidimov, M.I. Mannanov. The effect of accelerated protons on the electrophysical parameters of thermistors based on n-Si and n-Si // Web of Scientist: International Scientific Research Journal. 2023, Vol.4, Issue.9, pp.14-18. [№14, ResearchBib, IF:8.53]

5. M.I. Mannanov. Электрофизические свойства кремния, легированного примесью никеля методом диффузии // «Приборы». (Россия) 2022, №11(269), стр.37-43. [IF: 0,19] (05.00.00; №63)

6. M.I. Mannanov. Получение перекомпенсированного кремния путем диффузии никеля // Научно-технический журнал ФерПИ. 2023, Том27, №6, стр.14-19. (05.00.00; №20)

7. M.I. Mannanov. Термоанеметрический датчик на основе Si<Ni>. // Research Focus International Scientific Journal. 2023, Vol.2, Issue 9, pp. 40-44. [№14, ResearchBib, IF:2.32]

**II бўлим (2 часть; part 2)**

8. O.X. Qo‘ldashov, M.I. Mannanov. n-Si<Ni> va n-Si<Cu> monokristallari asosida termorezistiv datchiklar yaratish // “Yarimo‘tkazgichlar fizikasi, mikrova nanelektronikaning fundamental va amaliy muammolari” II halqaro konferensiyasi. Toshkent, 2023 yil, 27-28 oktyabr, 137-139-b.

9. O.X. Qo‘ldashov, M.I. Mannanov, Si<Ni> namunalarning elektrofizik xossalari o‘rganish // “Fan va innovatsiya” Yosh olimlar xalqaro ilmiy anjumani. Tashkent, 2023 yil, 19 oktyabr, 217-218-b.

10. O.X. Kuldashov, M.I. Mannanov, Оптимальная технология получения структур Si <P-N> переходом методом диффузии // “Оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро - и наноструктура” международной конференция. Фергана, 2023, 28-30 сентября, стр. 176-177

11.O.X.Qo'ldashov, M.I.Mannanov. Kremniy monokristalli asosida ishlab chiqilgan harorat datchiklar asosida haroratni nazorat qiluvchi elektron qurilma // Yosh olimlar va fizik talabalarning IV Respublika ilmiy anjumani (YOOFTRIA-IV). Toshkent, 2024 yil, 25 may, 110-111-b.

12. M.I.Mannanov. Termorezistiv datchiklar yaratish uchun yangi materiallar olish // "Yarimo'tkazgichlar fizikasi va ular asosidagi qurilmalarning zamonaviy muammolari" mavzusidagi Respublika ilmiy-amaliy anjumani. Namangan, 2023, 12-aprel, 57-58-b.

13. M.I.Mannanov. Possibilities of creating thermoresistive sensors based on n-Si<Ni> samples // Yosh olimlar va fizik talabalarning III Respublika ilmiy anjumani (YoOFTRIA- III). Toshkent, 2023yil, 15 iyun, 98-100-b.

14.M.I.Mannanov. Monokristall kremniy asosida yaratilgan harorat datchiklarni gradirovka qilish // Yosh olimlar va fizik talabalarning IV Respublika ilmiy anjumani (YOOFTRIA- IV). Toshkent, 2024 yil, 25 may, 136-137-b.

15.M.I.Mannanov. Creation of thermoresistive sensors based on n-Si<Ni> monocrystals // Fizik yechimlar, metrologik o'lchashlar hamda elektronika va asbobsozlik muammolari. Qarshi, 2023yil, 19-20 may, 261-262-b

16.M.I.Mannanov. Si<Cu> Namunalarning elektrofizik xossalarini o'rganish uchun namunalar tayyorlash // " Yarimo'tkazgich mikro va nanostrukturalarda optik va fotoelektrik hodisalar " VI- Xalqaro konferensiya. Farg'ona, 2023yil, 28-30 sentyabr, 179-181-b

17.М.И.Маннанов. Исследование параметров кремния, легированного никелем методом диффузии // «Наноструктурные полупроводниковые материалы в фотоэнергетике» Международной научной конференции. Ташкент, 2022, 24-25 ноября, стр.176-177

18.M.I.Mannanov. Termorezistorlarni germetizatsiyalash // "Yangi turdagi muqobil energiya manbalaridan foydalanishning innovatsion yechimlari va ulardan foydalanishda energiya tejankor qurilmalarni qo'llash" Respublika miqyosdagi ilmiy va ilmiy-texnik anjumani. Andijon, 2022 yil, 29-Aprel, 434-435-b.

19.М.И.Маннанов. Терморезисторы на основе монокристаллического кремния // II Международная научная конференция «Современные тенденции развития физики полупроводников: достижения, проблемы и перспективы». Ташкент, 2022, 27-28 декабрь, стр.99-100

20.M.I.Mannanov, X.T.Sayfullaev. n-Si<Ni> monokristallari asosida termorezistiv datchiklar yaratish // Fizika fanining rivojida iste'dodli yoshlarning o'rni. Respublika ilmiy-amaliy konferensiyasi RIAK-XVI-2023. Toshkent, 2023yil, 28-29 aprel, 271-274-b

21.М.И.Маннанов, Я.А.Сайдимов, А.Р.Тураев, Ф.Б.Умаров, Ф.А.Сапаров. Исследование влияние термической обработки на электрофизические свойства монокристаллов n-Si<Ni> // Республиканской научно-практической конференции Проблемы фотоники и перспективы развития. Ургенч, 2022, 27-28мая, стр. 222-223

22.M.I.Mannanov, Ya.A.Saydimov, A.R.Turaev, F.B.Umarov. Monokristall kremniydagi radiatsion nuksonlar. // "Fizikaning rivojida fundamental-innovatsion

tadqiqotlar va uning istiqbollari” Respublika ilmiy-amaliy konferensiyasi. Tashkent, 2022 yil, 14-oktyabr, 113-115-b

23. M.I. Mannanov, Y.A. Saydimov, F.A. Saparov, F.B. Umarov. Change in the properties of a semiconductor under the action of radiation // Yosh olimlar va fizik talabalarning II Respublika ilmiy anjumani (YOOFTRIA-II) Toshkent, 2022 yil, 21 may, 218-219-b.

24. Y.A. Saydimov, A.R. Turayev, M.I. Mannanov, F.B. Umarov. Yarimo'tkazgichli Si<Ni> va Si<Cu> namunalari asosida yaratilgan termorezistiv datchiklar yordamida haroratni o'lchovchi qurilma uchun dastur // EHM uchun yaratilgan dasturning rasmiy ro'yxatdan o'tkazilganligi to'g'risidagi guvohnoma № DGU 26501, 07.08.2023 y.







Avtoreferat “Til va adabiyot ta’limi” jurnali taxririya-tida taxrirdan o‘tkazildi va o‘zbek, rus va ingliz tillaridagi matnlarini mosligi tekshirildi (11.03.2025 yil)

Bichim 60x841/16. Raqamli bosma usuli. Times garniturasini.

Shartli bosma tabog‘i: 3,5. Adadi 70. Buyurtma №61.

Guvohnoma reestr № 10-4434

Yarimo‘tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti  
bosmaxonasida chop etilgan.

Bosmaxona manzili: 100057, Toshkent sh., Yangi Olmazor ko‘chasi, 20-uy.

