

**O‘ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI HUZURIDAGI
YARIMO‘TKAZGICHLAR FIZIKASI VA MIKROELEKTRONIKA
ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR
BERUVCHI DSc.03/2025.27.12.FM/T.01.06 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

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

TURMANOVA RAYMASH MAXMUTOVNA

**3d-METALLAR ATOMLARI KIRISHMA TO‘PLAMLARINING
KREMNIY ELEKTROFIZIK XUSUSIYATLARIGA TA’SIRI**

01.04.10 – Yarimo‘tkazgichlar fizikasi

**FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

Toshkent - 2026

**Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)
dissertatsiyasi avtoreferati mundarijasi**

**Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD) по
физико-математическим наукам**

**Contents of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD) on
physical-mathematical sciences**

Turmanova Raymash Maxmutovna

3d-metallar atomlari kirishma to'plamlarining kremniy elektrofizik
xususiyatlariga ta'siri 3

Турманова Раймаш Махмутовна

Влияние примесных скоплений атомов 3d-металлов на
электрофизические свойства кремния 23

Turmanova Raymash Maxmutovna

Influence of impurity clusters of 3d-transition metal atoms on the
electrophysical properties of silicon 45

E'lon qilingan ishlar ro'yxati

Список опубликованных работ
List of published works 50

**O‘ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI HUZURIDAGI
YARIMO‘TKAZGICHLAR FIZIKASI VA MIKROELEKTRONIKA
ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR
BERUVCHI DSc.03/2025.27.12.FM/T.01.06 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

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

TURMANOVA RAYMASH MAXMUTOVNA

**3d-METALLAR ATOMLARI KIRISHMA TO‘PLAMLARINING
KREMNIY ELEKTROFIZIK XUSUSIYATLARIGA TA’SIRI**

01.04.10 – Yarimo‘tkazgichlar fizikasi

**FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

Toshkent - 2026

Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi huzuridagi Oliy Attestatsiya komissiyasida B2021.1.PhD/FM584 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:

Turgunov Nozimjon Abdumannopovich
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Rasmiy opponentlar:

Ayupov Kutub Sautovich
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Boboyev Akramjon Yo'ldashboyevich
fizika-matematika fanlari doktori, dotsent

Yetakchi tashkilot:

Namangan davlat universiteti

Dissertatsiya himoyasi O'zbekiston Milliy universiteti huzuridagi Yarimo'tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti huzuridagi ilmiy darajalar beruvchi DSc.03/2025.27.12.FM/T.01.06 raqamli Ilmiy kengashning 2026 yil «17» 09 soat 14⁰⁰ 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)

Dissertatsiya bilan Axborot resurs markazida tanishish mumkin («18» 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 avtoreferati 2026 yil «03» 09 kuni tarqatildi.
(2026 yil «03» 09 dagi 78 raqamli reestr bayonnomasi).



Sh. B. Utamuradova
Ilmiy darajalar beruvchi
Ilmiy kengash raisi, t.f.d., professor

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

O. X. Qo'ldashov
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash
qoshidagi ilmiy seminar raisi, t.f.d., professor

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Hozirgi vaqtda butun dunyoda mikroelektronika qurilmalarini ishlab chiqarishda turli xil kirishmalar bilan legirlangan kremniy, germaniy, galliy arsenid, galliy fosfid kabi va boshqa yarimo'tkazgich materiallar keng qo'llanilmoqda. Yarimo'tkazgich hajmida kirishmalarning mavjudligi uning kristall tuzilishida nuqsonlarning paydo bo'lishiga olib keladi, bu esa yarimo'tkazgich xususiyatlariga ta'sir qiladi. Mazkur jihatdan 3d-o'tuvchi metallari kirishmalari bilan legirlangan monokristall kremniyning xususiyatlariga kirishma nuqsonlarining ta'sirini o'rganishga alohida e'tibor qaratilmoqdi. Chunki ushbu kirishmalar bilan legirlangan kremniy, uning asosida yaratiladigan yarimo'tkazgich asboblarning elektrofizik xususiyatlarini boshqarishda katta imkoniyatlar yaratadi. Shu bilan bog'liq holda kirishma to'plamlarining o'ziga xos xossalari va ularning yarimo'tkazgich kremniy xususiyatlariga ta'sirini o'rganishga alohida e'tibor qaratilmoqda.

Jahon miqyosida yarimo'tkazgichlar fizikasi sohasida turli usullar bilan legirlash jarayonida yarimo'tkazgichli materiallarning yuzasida va hajmida hosil bo'lgan kirishma to'plamlarining morfologik parametrlarini aniqlash bo'yicha ilmiy tadqiqotlar jadal o'tkazilmoqda. Shu jumladan, kremniyni turli xil kirishmalar bilan diffuziyaviy legirlash texnologik jarayonlarini optimallashtirishga oid tadqiqotlar, chunki hozirgi kunga qadar kremniy turli yarimo'tkazgichli asboblarni ishlab chiqarishda asosiy materiallardan biri hisoblanadi. Shu sababli, songi vaqtlarda 3d-o'tish metallari bilan legirlangan, hajmida har xil morfologik parametrlarga ega ko'p komponentli kirishma to'plamlari hosil bo'lgan kremniy xususiyatlarini o'rganish bo'yicha qator tadqiqotlar o'tkazilmoqda.

Respublikamizda turli kirishmalar bilan legirlangan kremniy xususiyatlarini va ular asosida yaratilgan qurilmalar parametrlarini boshqarish sohasida tadqiqotlar olib borilmoqda. Bunda kremniy hajmida 3d-o'tuvchi metallar atomlari kirishma to'plamlarining shakllanish va parchalanish jarayonlarini o'rganishga alohida e'tibor qaratilmoqda. O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 19-mart 2021-yildagi "Fizika sohasidagi ta'lim sifatini oshirish va ilmiy tadqiqotlarni rivojlantirish chora-tadbirlari to'g'risida" gi PQ-5032 son qarorida "fizika sohasida ilmiy tadqiqotlarning ishlab chiqish bilan uzviy bog'liqligini ta'minlash, iqtisod tarmoqdagi muommolar yechimiga qaratilgan ilmiy ishlar ko'lamini kengaytirish; ilmiy tadqiqotlarning va innovatsiya ishlarining natijadorligi va amaliy ahamiyatini oshirish..."¹ masalalari qo'yilgan. Bu yo'nalishda tashqi omillarga (harorat, bosim, nurlanish) sezgir yangi yarimo'tkazgich materiallarini va ularning asosida ko'p qatlamli strukturalarni yaratish sohasida olib borilayotgan ishlar muhim ilmiy va amaliy ahamiyat kasb etadi.

Mazkur dissertatsiya ishi O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-son "2022-2026-yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to'g'risida"gi² Farmoni, O'zbekiston

¹ O'zbekiston Respublikasi Prezidentining qarori, "Fizika sohasidagi ta'lim sifatini oshirish va ilmiy tadqiqotlarni rivojlantirish chora-tadbirlari to'g'risida", 19.03.2021 yildagi PQ-5032-son

² O'zbekiston Respublikasi Prezidentining Farmoni "2022 — 2026-yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to'g'risida", 28.01.2022 yildagi PF-60-son

Respublikasi Prezidentining 2021-yil 3-martdagi PQ-5011-son “Elektrotexnika sanoatini yanada rivojlantirish va mahalliy mahsulotlarning raqobatbardoshligini oshirishga doir qo‘shimcha chora-tadbirlar to‘g‘risida”³, 2023-yil 16-fevraldagi PQ-57-son “2023-yilda qayta tiklanuvchi energiya manbalarini va energiya tejovchi texnologiyalarni joriy etishni jadallashtirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”⁴ Qarorolari, shuningdek ushbu sohada qabul qilingan boshqa me‘yoriy-huquqiy hujjatlarda nazarda tutilgan vazifalarni amalga oshirishda muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning O‘zbekiston Respublikasida fan va texnologiyani rivojlanishning ustuvor yo‘nalishlariga mosligi. Mazkur tadqiqot Respublika fan va texnologiyalar rivojlanishining: III. «Energiya, energiya resurslarini tejash, transport, mashinasozlik va asbobsozlik; zamonaviy elektronika, mikroelektronika, fotonika, elektron asbobsozlikni rivojlantirish» ustuvor yo‘nalishlariga muvofiq bajarilgan.

Muammoning o‘rganilganlik darajasi. Hozirga qadar kremniyda 3d-o‘tuvchi metallar diffuziya mexanizmlari, kirishma atomlarning turli xil nuqsonlarini hosil bo‘lish jarayonlari, shuningdek, ularning kremniy elektrofizik, fotoelektrik xususiyatlari ta‘siri ko‘plab chet el olimlari tomonidan o‘rganilgan. Jumladan, A. Milns, K. Graff, H. Mehrer, H. Kitagawa, S. K. Estreicher, M. Yoshida, H. Aalberts, J. Lindroos, S. Tanaka, D. Neamen, D. Tobnaghi va boshqa olimlar tomonidan ham bu sohada turli ilmiy-amaliy tadqiqotlar olib borilgan va yuqori natijalarga erishilgan.

Kremniyda turli nuqsonlar va kirishma komplekslarining shakllanishi, ularning fizik xususiyatlari, shuningdek, harorat va nurlanishning legirlangan kremniy va uning asosidagi qurilmalarining elektrofizik parametrlariga ta‘siri A. Istratov, V. Orlov, A. P. Dolgolenko, N. Yarikin, G. P. Gaydar, M. I. Timoshin va boshqa olimlar tomonidan tadqiq qilingan.

O‘zbekistonda akademiklar M. Bahadixonov, S. Zaynabiddinov, R. Muminov, A. Mamadalimov, professorlar K. Abdurahmonov, X. Daliev, Sh. Utamuradova va ularning shogirdlari tomonidan turli kirishma atomlarining radiatsiyaviy va termik nuqsonlar bilan o‘zaro ta‘siri hamda ularning kremniyda kechadigan rekombinatsiya jarayonlariga, shuningdek, tashqi omillarning kirishma nuqsonlari holatiga ta‘siri o‘rganilgan.

Biroq, hozirgacha yuqori haroratli diffuziya usulida nikel va mis bilan legirlangan kremniyda hosil bo‘lgan kirishma to‘plamlarining strukturaviy tuzilishi, element tarkibi va kirishma to‘plamlarining parchalanish jarayonlari yetarli darajada o‘rganilmagan.

Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan oliy ta‘lim yoki ilmiy-tadqiqot muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog‘liqligi. Dissertatsiya tadqiqoti O‘zbekiston Milliy universiteti huzuridagi Yarim-

³ O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining Qarori “Elektrotexnika sanoatini yanada rivojlantirish va mahalliy mahsulotlarning raqobatbardoshligini oshirishga doir qo‘shimcha chora-tadbirlar to‘g‘risida”, 03.03.2021 yildagi PQ-5011-son

⁴ O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining qarori, “2023-yilda qayta tiklanuvchi energiya manbalarini va energiya tejovchi texnologiyalarni joriy etishni jadallashtirish chora-tadbirlari to‘g‘risida” 16.02.2023 yildagi PQ-57-son

o'tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti ilmiy-tadqiqot ishlari rejasining IL-652205571 «Turli chuqur sathga ega yarimo'tkazgichlarning optik, sig'imli va rezonans xususiyatlarini tahlil qilish asosida barqaror parametrlarga ega yuqori samarali kremniy tuzilmalarini yaratish» (2023-2024 yy.) mavzusidagi ilmiy loyihasi doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi kremniyning elektrofizik xususiyatlariga nikel va mis atomlari kirishma to'plamlarining ta'sirini, shuningdek, tashqi omillar (harorat, γ -nurlanish) ta'sirida kirishma to'plamlarining shakllanish va parchalanish jarayonlarini o'rganishdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

n-Si<Ni>, n-Si<Cu> va n-Si<Ni,Cu> namunalarning elektrofizik parametrlari va strukturaviy xususiyatlarini o'rganish;

n-Si<Cu> va n-Si<Ni,Cu> namunalarda kirishma atomlari xatti-harakatlari va o'zaro ta'sirini rentgenostrukturaviy tahlil yordamida o'rganish;

alohida (n-Si<Ni> va n-Si<Cu>) va kombinatsiyaviy (n-Si<Ni,Cu>) diffuziya asosida olingan namunalarning hajmida shakllangan kirishma to'plamlarining morfologiyasini o'rganish va parametrlarini aniqlash;

nikel va mis bilan alohida va kombinatsiyaviy diffuziya usulida legirlangan kremniyning elektrofizik hamda strukturaviy xususiyatlariga tashqi omillarning (termik tavlash va nurlanish) ta'sirini o'rganish.

Tadqiqotning ob'yekti nikel va mis bilan alohida (n-Si<Ni> va n-Si<Cu>) va kombinatsiyaviy (n-Si<Ni,Cu>) diffuziya usulida legirlangan monokristall kremniy namunalari.

Tadqiqotning predmeti kremniy monokristalida nikel va mis kirishma atomlari mikro- va nanoto'plamlarining shakllanish jarayonlari, shuningdek, ularning termik tavlash va radiatsiya ta'sirida parchalanish jarayonlaridan iborat.

Tadqiqotning usullari. Qo'yilgan vazifalarni bajarishda quyidagi usullardan foydalanildi: kremniy monokristallaridagi nikel va mis kirishma to'plamlarining strukturaviy tuzilishi va element tarkibini aniqlash uchun yuqori aniqlikdagi zamonaviy elektron mikroskopiya usullari, xususan, Superprobe JXA-8800R (JEOL) elektron-zondli mikroskop va JSM-IT200 skanerlovchi elektron mikroskopidan foydalanildi, nikel va mis bilan legirlangan namunalarning strukturaviy tuzilishi tahlili rentgen strukturaviy tahlil usuli bilan XRD-6100 difraktometri yordamida amalga oshirildi, namunalar hajmidagi optik faol uglerod va kislorod konsentratsiyasini aniqlash IQ spektrometriyasi usuli bilan FSM-2201 markali Fure-IQ spektrometri yordamida amalga oshirildi.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quydagilardan iborat:

kremniyni Ni va Cu kirishmalari bilan bir vaqtda yuqori haroratli ($t = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$) diffuziyaviy legirlashda namunalar hajmida turli geometrik shakllarga ega kirishma atom to'plamlari shakllanishi va ularning o'lchamlari 10 nm dan 3 mkm gacha yetishi aniqlangan;

kremniyni $t = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ haroratda nikel va mis kirishmalari bilan bir vaqtda diffuziyaviy legirlash jarayonida namunalar hajmida optik faol kislorod konsentratsiyasi $\sim 30\%$ ga, optik faol uglerod konsentratsiyasi esa $\sim 20\%$ ga kamayishi aniqlangan;

γ -nurlanish ta'sirida n-Si<Ni,Cu> namunalari hajmida SiCu_3 , CuO , Si_2Ni va SiNi kabi kirishmalar birikmasining parchalanishi va kislorod, nikel va mis kirishma atomlari ishtirokidagi Cu_4O_3 , Ni_3Si , $\text{Cu}_{15}\text{Si}_4$ kabi yangi birikmalar shakllanishi aniqlangan;

ilk bor $t = 1000^\circ\text{C}$ haroratda 15 daqiqa davomida, $t = 1200^\circ\text{C}$ haroratda esa 10 daqiqa davomida termik ishlov berish ta'sirida Ni va Cu bilan bir vaqtda legirlangan Si namunalari hajmida kirishma nanoto'plamlarining parchalanishi aniqlangan.

γ -nurlanishning 10^8 rad dozasi ta'sirida n-Si<Ni>, n-Si<Cu> va n-Si<Ni,Cu> namunalarning solishtirma qarshilik qiymati mos ravishda 82, 18 va 1,5 marta ortishi aniqlangan, bu esa Ni va Cu bilan bir vaqtda legirlangan kremniy namunalarning nurlanishga chidamli ekanligini ko'rsatilgan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

oldindan belgilangan elektrofizik parametrlarga ega bo'lgan yarimo'tkazgich materiallarni olishni ta'minlaydigan kremniy monokristalini Cu va Ni kirishmalari bilan diffuziya qilishning texnologik sharoitlari ishlab chiqildi;

nikel va mis bilan legirlangan kremniyda kirishma to'plamlarining morfologik parametrlarini maqsadli boshqarishni ta'minlovchi, namunalarni diffuziyadan keyingi termik ishlov berish va sovutish tezligining rejimlari aniqlandi;

nikel va mis atomlari ishtirokidagi yangi kirishma birikmalarining shakllanish jarayonlarini diffuziyadan keyin radiatsiyaviy ishlov berish sharoitlarini tanlash orqali boshqarish imkoniyati aniqlandi;

nikel va mis bilan legirlangan kremniyning elektrofizik xususiyatlarini termik va radiatsiyaviy barqarorligini oshirish usullari ishlab chiqildi.

Tadqiqot natijalarining ishonchliliği nikel va mis bilan legirlangan kremniy monokristallarining elektrofizik xususiyatlarini, ularda diffuziya jarayonida va undan keyin turli xil tashqi omillar ta'sirida sodir bo'ladigan fizik jarayonlarni tadqiq qilishda umumiy qabul qilingan standart va keng qo'llaniladigan usullaridan foydalanish bilan asoslanadi. Elektrofizik parametrlarni aniqlash uchun Xoll effektiga asoslangan, o'lchash xatoligi 0,0001% bo'lgan zamonaviy Ecopia HMS-7000 qurilmasi foydalanildi. Nikel va mis bilan legirlangan monokristall kremniyda hosil bo'lgan kirishma atomlari to'plamlarining strukturaviy xususiyatlari va morfologik o'ziga xosligi o'lchash xatoliklari $0,001 \div 0,004\%$ oralig'ida bo'lgan XRD-6100 rentgen difraktometri va JSM-IT 200 markali skanerlovchi elektron mikroskop bilan aniqlandi. Namuna hajmida optik faol uglerod va kislorod konsentratsiyasi aniqlash o'lchov xatoligi $0,01 \div 0,02\%$ oralig'ida bo'lgan zamonaviy Fure-IQ spektrometrida amalga oshirildi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.

Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati kirishma atom to'plamlarining shakllanish va parchalanish qonuniyatlari, γ -nurlanish va yuqori harorat ta'sirida n-Si<Ni>, n-Si<Cu> va n-Si<Ni,Cu> namunalarning elektrofizik xususiyatlarining o'zgarishi, radiatsiya ta'sirida yuzaga kelgan radiatsion-induksiyaviy jarayonlar, fazaviy o'zgarishlar va legirlangan namunalarda optik faol kislorod va uglerod konsentratsiyasining o'zgarishi haqidagi fizik tasavvurlarni kengaytirishdan iborat.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati olingan bog'liqliklar va aniqlangan mexanizmlardan foydalanib, ma'lum elektrofizik xususiyatlarga ega materiallarni

olish maqsadida kremniyga termik ishlov berish va legirlashning texnologik rejimlarini optimallashtirishdan iborat. Natijalar mikro va optoelektronika, kosmik texnikalar va yadro energetikasi uchun radiatsiyaviy barqaror yarimo'tkazgichli strukturalarni ishlab chiqishda qo'llanilishi mumkin.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi.

3d-metall atomlari kirishma to'plamlariga ega kremniy monokristalining elektrofizik xususiyatlarini tashqi ta'sirlar vositasida boshqarish bo'yicha olingan ilmiy natijalar asosida:

$t=1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ haroratda $\langle\text{Ni,Cu}\rangle$ va $\langle\text{Ni,Fe}\rangle$ kirishmalari bilan kremniyni bir vaqtda diffuziyaviy legirlashda, namunalar hajmida turli geometrik shaklga va 10 nm dan 3 mkm gacha bo'lgan o'lchamga ega kirishma to'plamlarining shakllanishi aniqlangan, shuningdek, ularning kimyoviy tarkibida matritsa va asosiy kirishma elementi nikel va mis atomlaridan tashqari texnologik kirishmalar hisoblangan kislorod va uglerod atomlarining $0,01\div0,001\%$ foiz ulushida mavjudligi; $-153\div47\text{ }^{\circ}\text{C}$ harorat oralig'ida $n\text{-Si}\langle\text{Cu}\rangle$ namunalaridagi zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi deyarli 8 baravar ortishi va zaryad tashuvchilarning harakatchanligi bir darajadan ko'proq kamaygan. Olingan ilmiy natijalardan Belorusiya FAning materialshunoslik bo'yicha ilmiy-amaliy markazida 1.3.1 "Kremniyli asboblarda strukturalarida radiatsiyaviy-induktsiyalangan markazlarining nuqson-kirishma muhandisligi" mavzusidagi loyihasining "Kondensirlangan holat fizikasi va yangi funktsional materiallarni yaratish hamda ularni olish texnologiyalari" kichik dasturini amalga oshirish jarayonida foydalanilgan (Belorusiya FAning materialshunoslik bo'yicha ilmiy-amaliy markazining 2024 yil 12 noyabrdagi ma'lumotnomasi). Ilmiy natijalardan foydalanish Ni va Cu bilan legirlangan kremniy asosida olingan diodlar va MDYa-strukturalarning funktsional imkoniyatlarini oshirishga imkon bergan.

kremniydagi nikel va temir kirishma atomlari to'plamlari strukturaviy tuzilishlarining diffuziya harorati va diffuziyadan keyingi namunalarni sovutish tezligiga bog'liqligi aniqlangan: $t = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ diffuziya haroratida tez sovutilgan ($\geq 200\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{sek}$) namunalarda o'lchami bir necha yuz nanometrgacha bo'lgan turli xil geometrik shakllarga ega kirishma nanobirikmalarining hosil bo'lishi kuzatildi. $t = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ haroratda 20 daqiqa davomida termik tavlash ta'sirida o'lchami 400 nm gacha bo'lgan kirishma to'plamlari parchalanishi aniqlandi. Olingan ilmiy natijalar "FOTON" aksiyadorlik jamiyatida kremniy asosidagi yarimo'tkazgichli elektron qurilmalar ishlab chiqarishda foydalanilgan («O'zeltexsanoat» aktsionerlik jamiyatining 2024 yil 11 iyuldagi №04-3/1124-sonli ma'lumotnomasi). Ilmiy natijalardan foydalanish nikel va mis bilan legirlangan kremniy eksperimental namunalarning elektrofizik parametrlarini termik tavlash ta'sirida boshqarish imkonini bergan.

Tadqiqot natijalarining aprobatyasi. Dissertatsiya ishining natijalari 11 ta xalqaro va 2 ta respublika miqyosida o'tkazilgan ilmiy-amaliy konferentsiyalarda ma'ruza bilan qatnashilgan va muhokama qilingan.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi. Dissertatsiya mavzusi bo'yicha asosiy natijalar 17 ta ilmiy ishda, shulardan 4 tasi dissertatsiya ishlarining asosiy ilmiy natijalarini nashr etish uchun O'zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya

komissiyasi tomonidan tavsiya etilgan ilmiy jurnallarda, jumladan 3 ta maqola xorijiy xalqaro jurnallarda chop etilgan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya kirish, to'rtta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati va ilovalardan iborat. Dissertatsiyaning hajmi 35 ta rasm, 7 ta jadvalni o'z ichiga olgan holda, 123 betni tashkil etadi.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Kirish qismida dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati asoslangan, tadqiqotning respublikada fan va texnologiyalarni rivojlantirishning ustuvor yo'nalishlariga mosligi ko'rsatilgan, muammoning o'rganilganlik darajasi ochib berilgan, tadqiqotning maqsadi va vazifalari belgilangan, tadqiqot ob'yekti, predmeti va usullari aniqlangan, tadqiqotning ilmiy yangiligi va amaliy ahamiyati bayon qilingan, natijalarning ishonchliligi asoslangan, tadqiqot natijalarining joriy qilinishi, ishning aprobatsiyadan o'tganligi va nashr qilinishi, shuningdek dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi to'g'risida ma'lumotlar berilgan.

“Yarimo'tkazgichlardagi 3d-metall kirishma atomlarining to'plamlari” deb nomlangan birinchi bobda, o'tuvchi metall elementlari bilan legirlangan monokristall kremniy hajmida va yuzasida shakllangan nuqsonlarning tabiati, kirishma to'plamlarining hosil bo'lishi va turli tashqi omillar ta'sirida ularning parchalanishi haqida adabiyotlar sharhi keltirilgan. Shuningdek, O'zbekistonlik va chet el olimlari tomonidan yarimo'tkazgichlarda yuzaga keladigan turli xil effektlarni va kirishma atomlarining ushbu effektlarga ta'sirini o'rganish bo'yicha olib borilgan ilmiy tadqiqotlar to'g'risida ma'lumotlar berilgan. Bobning so'ngida adabiyotlar sharhi bo'yicha xulosalar berilgan.

“3d-o'tuvchi metall elementlari bilan legirlangan kremniyning elektrofizik, optik va strukturaviy xususiyatlarini tadqiq qilish usullari” deb nomlangan ikkinchi bobda yarimo'tkazgichlarida hosil bo'lgan kirishma atom to'plamlarining morfologik parametrlarini aniqlash, shuningdek, tayyorlangan namunalarning elektrofizik va strukturaviy parametrlarini o'lchash bo'yicha tadqiqot usullari haqida ma'lumotlar keltirilgan. Elektrofizik parametrlar Ecopia-7000 qurilmasi yordamida o'lchangani ko'rsatilgan.

Kremniy monokristallarida hosil bo'lgan kirishma atom to'plamlarining strukturaviy xususiyatlarini aniqlash uchun dastlabki va legirlangan kremniy namunalarning fazaviy va strukturaviy fragmenti rentgen difraksiya tahlili yordamida o'rganilgan. Bunda strukturaviy tadqiqotlar zamonaviy XRD 6100 rentgen difraktometrida, bosqichma-bosqich skanerlash rejimida, $\lambda = 0,15405$ nm to'liq uzunlikli CuK_α nurlanishidan foydalangan holda amalga oshirilgan.

JSM-IT 200 kompakt skanerlovchi elektron mikroskop (SEM) kristallarda hosil bo'lgan kirishma to'plamlarining kattalashtirilgan tasvirlarini olish va ularning alohida nuqtalari tarkibini elementar tahlil qilish qobiliyatiga ega. Mikroskopni boshqarishning zamonaviy kompyuter tizimi ancha sodda bo'lib, boshqarishning barcha funksiyalari avtomatlashtirilgan.

Kremniy monokristallarida hosil bo'lgan Cu va Ni kirishma to'plamlarining tarkibini va ular orasida hosil bo'lgan bog'lanishlarning xususiyatlarini batafsilroq o'rganish maqsadida IK spektroskopiya usullaridan foydalanildi.

“Kirishma to'plamlarining morfologiyasi va ularning kremniyning elektrofizikaviy, strukturaviy va optik xususiyatlariga ta'siri” deb nomlangan uchinchi bobda nikel va mis bilan legirlangan kremniy namunalarining elektrofizik parametrlari va strukturaviy xususiyatlarini o'rganish bo'yicha eksperimental tadqiqotlar natijalari, shuningdek, optik faol kislorod va uglerod konsentratsiyasini aniqlash natijalari keltirilgan.

Kremniy monokristallari hajmidagi kirishma atomlari to'plamlarining strukturaviy xususiyatlarini aniqlash rentgen-strukturaviy tahlil uslubida amalga oshirildi, bunda dastlabki namunalar hamda nikel va mis bilan legirlangan kremniy namunalarining fazaviy va strukturaviy xossalari tadqiq qilindi.

1-rasmda n-Si namunalarining difraktogrammasi keltirilgan. Difraktogramma tahlili intensivligi turlicha bo'lgan ikkita alohida difraksiya refleksi mavjudligini ko'rsatadi. Eng katta intensivlikka ega bo'lgan refleks $2\theta = 28 \div 29^\circ$ burchak oralig'ida kuzatiladi va monokristall kremniyning (Si(111)) kristallografik tekisligidan aks etishiga to'g'ri keladi. Ikkinchi refleks sezilarli darajada past intensivlikka ega bo'lib, $2\theta = 25 \div 26^\circ$ burchaklar oralig'ida qayd etilgan. Bu signal amorf yoki oksid fazasi – kremniy dioksidi (SiO_2) dan akslangan refleks sifatida aniqlanadi, uning hosil bo'lishi namunalarni tayyorlash yoki qayta ishlash paytida namuna yuzasining tabiiy yoki texnologik oksidlanishi bilan bog'liq holda tushuntiriladi.

Olingan natijalardan foydalanib, kristalldagi tekisliklar orasidagi masofani Vulff-Bregg tenglamasi yordamida aniqlash mumkin:

$$n\lambda = 2d\sin\theta, \quad (1)$$

bu yerda: d – tekisliklararo masofa, θ – Vulf-Bregg burchagi, n – difraksiya maksimumining tartibi, $\lambda = 0,15405 \text{ nm}$ – CuK_α nurlanishining to'lqin uzunligi.

Hisoblash natijalari shuni ko'rsatadiki, SiO_2 birikmasiga mos keladigan $2\theta = 25,61^\circ$ burchak ostida kuzatilgan difraksiya refleksi uchun tekisliklararo masofa $d = 0,347 \text{ nm}$ ga teng. Xuddi shunday, $2\theta = 28,39^\circ$ burchakda kuzatilgan monokristall kremniyga mos keluvchi (Si) refleks uchun hisoblangan tekisliklararo masofa $d = 0,628 \text{ nm}$ ga teng.

Nanokristallitlarning o'rtacha o'lchami ikki usul bilan hisoblab chiqiladi: birinchisi SEM usuli bilan WXM dasturi yordamida to'g'ridan-to'g'ri hisoblash orqali, ikkinchisi esa rentgenografiya usuli bilan Scherrer formulasi yordamida amalga oshiriladi:

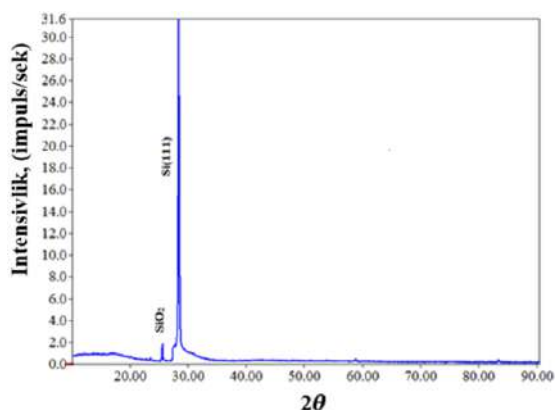
$$L = \frac{K\lambda}{\beta\cos\theta} \quad (2)$$

bu yerda L – kristallitning o'rtacha o'lchami, λ – rentgen nurlanishining to'lqin uzunligi, β – radianlarda olingan yarim maksimum (FWHM), θ – Breg burchagi va $K = 0.95$ Sherrer doimiysi.

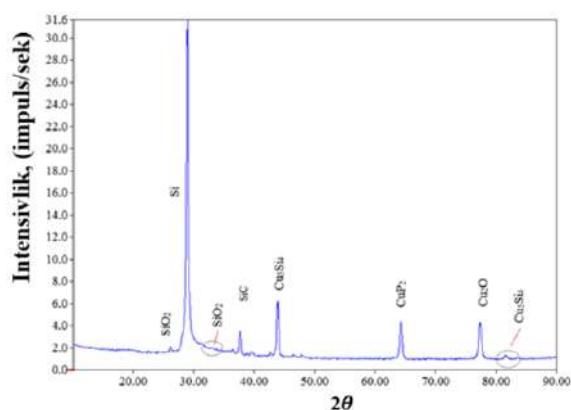
2-rasmda n-Si<Cu> namunasiining difraktogrammasi keltirilgan. 2-rasmdan ko'rinib turibdiki, difraktogrammada turli intensivlikdagi bir nechta reflekslar kuzatiladi. Eng katta intensivlikka ega bo'lgan refleks kristallografik yo'nalishi

(111) bo'lgan monokristall kremniy (Si) ga to'g'ri keladi. Ushbu refleksda L va d qiymatlari mos ravishda 0,75 nm va 0,61 nm ga teng. Bu refleks $2\theta = 28,97^\circ$ burchakda ko'rinadi. Dastlabki namunaning ushbu refleksiga nisbatan bu refleks katta qiymatli burchaklar tomon biroz siljigan, burchak farqi $\Delta\theta = 0,57^\circ$ ga teng va bu diffuziyadan keyin matritsa elementi Si kristall tuzilishining deformatsiyaga uchraganligini ko'rsatadi.

Hisoblashlar shuni ko'rsatadiki, SiO_2 ga mos keladigan $2\theta = 25,61^\circ$ burchakda kuzatilgan kristallitning o'rtacha o'lchami $L = 2,82$ nm. Si ga mos keladigan va refleksi $2\theta = 28,39^\circ$ burchak ostida kuzatilgan kristallitning o'rtacha o'lchami 2,84 nm ni tashkil etadi. $2\theta = 26,15^\circ$ burchak ostida kuzatilgan refleks SiO_2 birikmasiga to'g'ri keladi va uning uchun L va d qiymatlari mos ravishda 0,743 nm va 0,34 nm ga teng. Keyingi refleks $37,65^\circ$ burchak ostida zaif intensivlikda aks etadi va SiC birikmasiga to'g'ri keladi. Ushbu refleksga mos keladigan kristallitning o'rtacha o'lchami L va tekisliklararo masofasi d mos ravishda 1,02 nm va 0,955 nm ga teng.



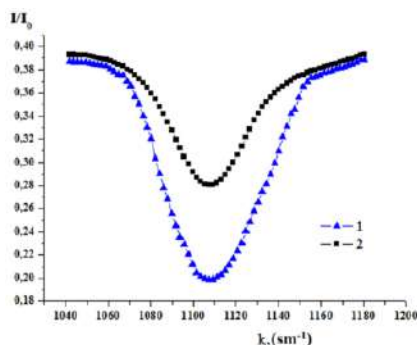
1-rasm. Dastlabki n-Si namunasining rentgenogrammasi.



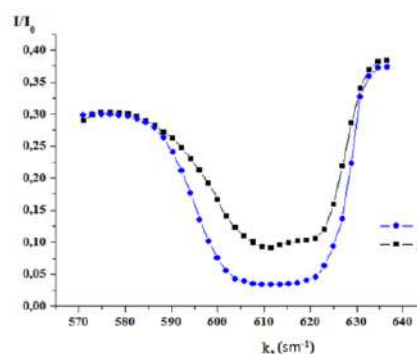
2-rasm. Mis bilan legirlangan n-Si<Cu> namunasining rentgenogrammasi.

Ushbu difraktogrammada mis kirishmasi atomlari bog'lariga mos keladigan yana bir nechta reflekslar ko'rinadi. Masalan, Cu_5Si_4 birikmasi refleksi ikkita har xil burchaklarda ko'ringan. Ularning birinchisi ikkinchisiga nisbatan kuchliroq intensivlikka ega. U $2\theta = 43,9^\circ$ burchak ostida akslanadi va unga mos keluvchi kristallitning o'rtacha o'lchami L va tekisliklararo masofa d mos ravishda 0,624 nm va 0,824 nm ga teng. Cu_5Si_4 birikmasiga to'g'ri keladigan ikkinchi refleks $80\div 85^\circ$ burchak oralig'ida nisbatan zaif intensivlikda kuzatiladi. Yana $2\theta = 64,25^\circ$ burchak ostida kuzatilgan boshqa bir refleks, CuP_2 birikmasiga tegishli bo'lib, unga tegishli kristallitning o'rtacha o'lchami $L = 0,68$ nm, tekisliklararo masofa esa $d = 0,72$ nm ni tashkil etadi. Undan keyin Cu_2O birikmasi ga mos keladigan yana bir refleks kuzatilgan. U $2\theta = 77,38^\circ$ burchak ostida akslanadi va uning uchun L va d qiymatlari mos ravishda 0,618 nm va 0,739 nm ga teng.

Optik faol kirishma atomlarning fon konsentratsiyasini aniqlash IQ-Fure spektroskopiyasi usulida FSM 2201 qurilmasi yordamida amalga oshirildi. 3-rasmida dastlabki namuna n-Si va n-Si<Cu> namunalardagi optik faol kislorod konsentratsiyasi o'zgarishining Fure-IQ spektrogrammasi fragmenti keltirilgan.



3-rasm. O'tkazish ko'effitsientining to'liqin vektoriga bog'liqlik grafigi. 1-dastlabki namuna, 2- n-Si<Cu> namunasi.



4-rasm. O'tkazish ko'effitsientining to'liqin vektoriga bog'liqlik grafigi. 1-dastlabki namuna, 2-n-Si<Cu> namunasi.

Optik faol kislorod konsentratsiyasi quyidagi formula bo'yicha hisoblanadi:

$$N_O^{\text{opt}} = 3.3 \cdot 10^{17} \cdot \frac{1}{d} \ln \frac{I}{I_0}, \quad (3)$$

bu yerda: I va I_0 – mos ravishda, tushayotgan va o'tayotgan nurning intensivliklari, d – namunaning qalinligi.

Hisoblashlar shuni ko'rsatadiki, n-Si<Cu> namunalarida optik faol kislorod konsentratsiyasi dastlabki namunaga nisbatan 49% ga kamayadi, bu esa barqaror oksid birikmalarining, masalan, SiO_2 , Cu_2O ning hosil bo'lishi bilan izohlanadi.

4-rasmda dastlabki va n-Si<Cu> namunalaridagi optik faol uglerod konsentratsiyasi o'zgarishi IK-Fure spektrogrammasining fragmenti keltirilgan. Optik faol uglerod konsentratsiyasi (4) formula yordamida hisoblanadi:

$$N_C^{\text{opt}} = 1.1 \cdot 10^{17} \cdot \frac{1}{d} \ln \frac{I}{I_0}, \quad (4)$$

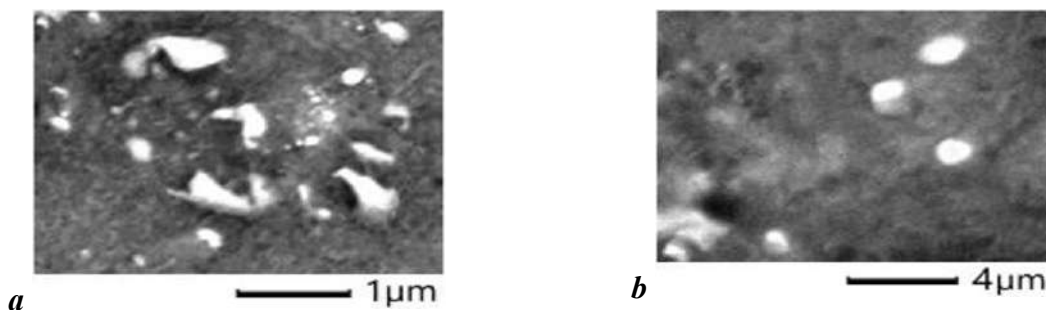
bu yerda: I va I_0 – mos ravishda, tushayotgan va o'tayotgan nurning intensivliklari, d namunaning qalinligi.

Hisoblashlar shuni ko'rsatadiki, n-Si<Cu> namunalaridagi optik faol uglerod konsentratsiyasi dastlabki namunaga nisbatan 28% ga kamaygan.

Shunday qilib, rentgenostrukturaviy tahlil uslubi bilan n-Si<Cu> namunalari hajmida turli elementli tarkibga ega bir nechta birikmalar, masalan, kremniy dioksid (SiO_2), kremniy karbid (SiC), mis silitsid birikmalari (Cu_5Si_4), mis oksidi (Cu_2O) va mis fosfidi (CuP_2) kabi birikmalari hosil bo'lganligi aniqlandi. Ushbu fazalarning mavjudligi legirlovchi kirishmalar va matritsa atomlari orasida murakkab kimyoviy reaksiyalar sodir bo'lganini tasdiqlaydi, bu esa materialning tuzilish va elektrofizik xususiyatlariga sezilarli ta'sir qiladi. Shuningdek, spektroskopik tajribalardan olingan natijalar shuni ko'rsatadiki, n-Si<Cu> namunalarda optik faol kislorod va uglerod konsentratsiyasi dastlabki namunalarga nisbatan sezilarli darajada kamaygan. Bu kristal hajmida SiO_2 , SiC va CuO_2 kabi bir qator ikkilamchi fazalarning hosil bo'lishi bilan bog'liq bo'lib, ularning mavjudligi rentgen strukturaviy tahlili natijalari bilan tasdiqlangan.

Shuningdek, n-Si<Ni> va n-Si<Cu> namunalaridagi kirishma to'plamlarning strukturaviy tuzilishi va kimyoviy tarkibi JSM-IT200 skanerlovchi elektron mikroskop yordamida o'rganildi.

Eksperimental tadqiqotlar natijalari shuni ko'rsatdiki, diffuziyadan keyingi sovutish tezligiga qarab, Si<Ni> namunalari hajmida turli shakl va o'lchamdagi kirishma to'plamlari kuzatiladi (5-rasm). Yuqori sovutish tezligida ($v_{\text{sov}} = 200 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{sek}$) asosan ignasimon, disksimon, linzasimon va sferik shakllarga ega bo'lgan nisbatan kichik o'lchamli ($d < 10^{-6} \text{ m}$) pretsipitatlar hosil bo'ladi (5 a-rasm).



5-rasm. Kremniydagi nikel kirishma to'plamlari:

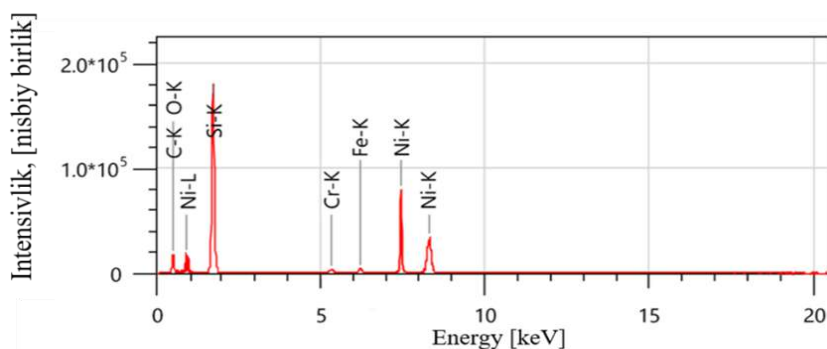
a – tez sovutilgan ($v_{\text{sov}}=200 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{sek}$) namunalarda; b – sekin sovutilgan ($v_{\text{sov}}=1 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{sek}$) namunalarda.

Sekin sovutilgan ($v_{\text{sov}} = 1 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{sek}$) namunalarda hajmida o'lchamlari bir necha mikrometrgacha etadigan kirishma atom pretsipitatlari hosil bo'lishi kuzatilgan bo'lib, ularning aksariyati sfera shakliga ega (5 b-rasm).

6-rasmda diffuziyadan so'ng tez sovutilgan n-Si<Ni> namunasi hajmida hosil bo'lgan $\sim 700 \text{ nm}$ o'lchamdagi linzasimon kirishma to'plamlarining kimyoviy tarkibini aniqlash natijalarini keltirilgan.

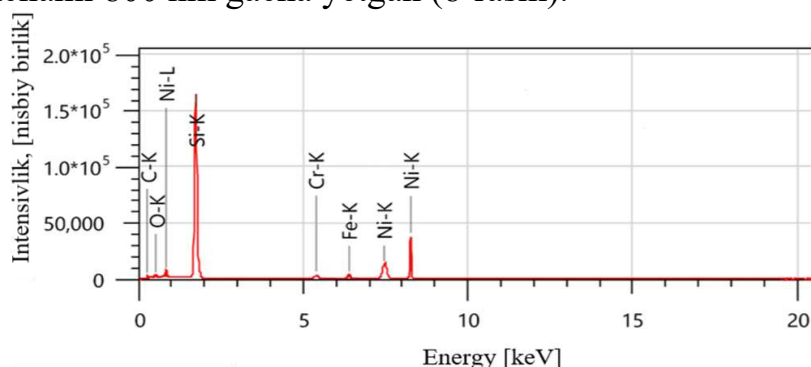
Ko'rinib turibdiki, nanobirikmalar hajmidagi Ni atomlarining ulushi 23,23%, Si atomlarining ulushi 75,42%, temir atomlarining ulushi 0,26%, xrom atomlarining ulushi 0,31%, kislorod atomlarining ulushi 0,43%, uglerod atomlarining ulushi 0,35%. Bu ko'rsatkichlar nanobirikmaning butun hajmi bo'ylab sezilarli darajada farq qilmaydi.

Sekin sovutilgan Si<Ni> namunalarda o'tkazilgan kimyoviy tarkib tahlillar natijalari, o'lchami $\sim 2 \text{ mkm}$ ga yetadigan sferik mikrobirikmalarning miqdoriy parametrlarini aniqlash imkonini berdi. Ma'lumki, mikrobirikmada Si va Ni atomlari bilan birga temir, xrom, kislorod va uglerod kabi texnologik kirishma atomlari ham mavjud (7-rasm). Ushbu mikrobirikmaning kimyoviy tarkibini tahlil qilish natijalari shuni ko'rsatdiki, uning markaziy qismida Ni atomlarining foiz ulushi 52,58%, Si atomlari – 45,38%, temir atomlari – 0,42%, xrom atomlari – 0,31%, kislorod atomlari – 0,73% va uglerod atomlari – 0,58% ni tashkil etadi. Mikrobirikmalar yuzasiga yaqin joylarda Ni atomlarining foiz ulushi 24,44%, kremniy atomlari – 74,14%, temir atomlari – 0,31%, xrom atomlari – 0,24%, kislorod atomlari – 0,55% va uglerod atomlari – 0,32% ni tashkil etadi. Bu natijalar mikrobirikmaning markaziy va yuzaga yaqin qismida asosiy va texnologik kirishma atomlari soni turlicha ekanligini ko'rsatadi. Ushbu qiymatlar mikrobirikmaning markazidan yuzasiga qarab kamayadi.

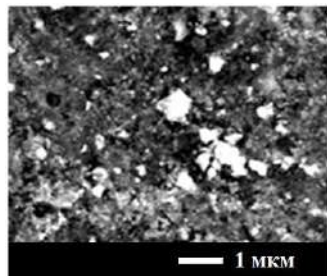


6-rasm. Tez sovutilgan n-Si<Ni> namunasidagi ~700 nm o'lchamdagi linzasimon nanobirikma element tarkibining to'liq spektri.

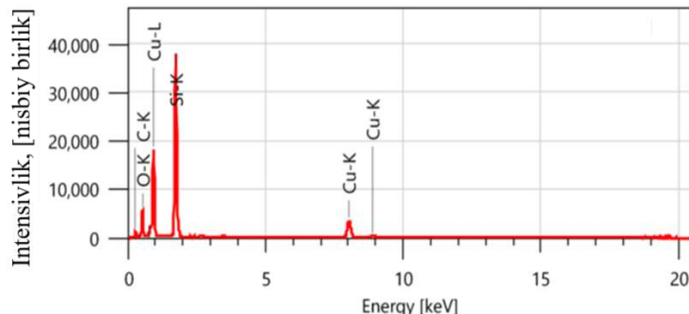
Shuningdek, mis bilan legirlangan kremniy namunalari kimyoviy tarkibini aniqlash maqsadida mikroskopik tadqiqot ham o'tkazildi. Natijalar shuni ko'rsatdiki, tez sovutilgan n-Si<Cu> namunalarda turli shakl va o'lchamdagi kirishma atomlari to'plamlari kuzatilgan. Kirishma atomlari to'plamlarining o'lchami 800 nm gacha yetgan (8-rasm).



7-rasm. Sekin sovutilgan n-Si<Ni> namunadagi ~2 mkm o'lchamli sferik kirishma mikrobirikmalari element tarkibining to'liq spektri.



8-rasm. Tez sovutilgan n-Si<Cu> namunalarida mis kirishma to'plamlari.

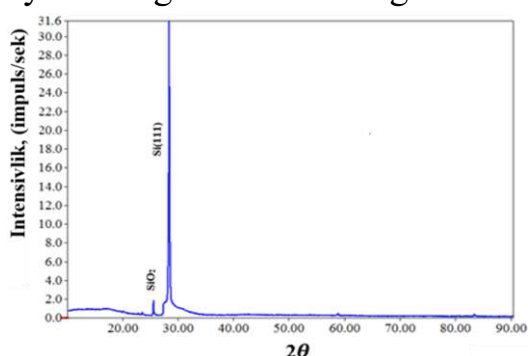


9-rasm. Tez sovutilgan n-Si<Cu> namunasidagi ~800 nm o'lchamdagi sferasimon to'plamlarning element tarkibining to'liq spektri.

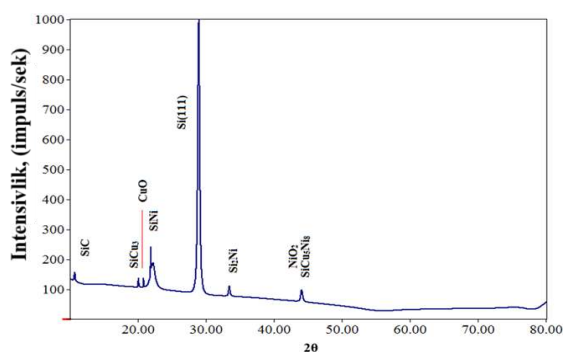
9-rasmda diffuziyadan so'ng tez sovutilgan n-Si<Cu> namuna hajmida hosil bo'lgan ~ 800 nm o'lchamdagi sfera shaklidagi kirishma to'plamlarining kimyoviy tarkibi keltirilgan. Ko'rinib turibdiki, nanobirikmalar hajmidagi Cu atomlari foiz ulushi 29,53%, Si atomlari foiz ulushi 69,76%, kislorod atomlari foiz ulushi 0,39%, uglerod atomlari foiz ulushi 0,32% ni tashkil etadi. Bu ko'rsatkichlar nanobirikmaning butun hajmida sezilarli darajada farq qilmaydi.

Nikel va mis atomlari bilan bir vaqtda legirlangan monokristall kremniyda hosil bo'ladigan kirishma to'plamlarining strukturaviy tuzilishi va optik xususiyatlarini aniqlash maqsadida quyidagi tajribalar o'tkazildi. Kimyoviy va mexanik ishlov berilgan kremniy namunalarning yuzasiga VUP-4 qurilmasida 10^{-4} Torr vakuumda purkash yo'li bilan 3d-metal elementlariga mansub bo'lgan Ni va Cu atomlari

yotqizildi. Kremniy namunalarining bir tomoniga Ni atomlari 0,4 mkm qalinlikda, ikkinchi tomoniga esa mis atomlari 0,4÷0,5 mkm qalinlikda yotqizildi. Nikel va mis atomlarining kremniyga bir vaqtdagi diffuziyasi jarayoni gorizontol SUOL-4 pechida $t = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ haroratda 5 soat davomida amalga oshirildi. Diffuziya harorati platina-platinarodiy termojuftlari yordamida nazorat qilindi. Diffuziya jarayoni tugagandan so'ng namunalar ikki xil tezlikda sovutildi. Tez sovutishda tezlik $v_{\text{sov}} > 200\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{sek}$ ni, sekin sovutish esa $v_{\text{sov}} > 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{sek}$ ni tashkil qildi. Dastlabki va n-Si<Ni,Cu> namunalarning hajmida hosil bo'ladigan kirishma to'plamlarining strukturaviy xususiyatlarini aniqlash maqsadida rentgenstrukturaviy tahlil o'tkazildi. Tadqiqot natijalari 10- va 11-rasmlarda keltirilgan. Rentgenostrukturaviy tahlil natijalari o'rganilgan n-Si<Cu,Ni> namunalarining kristal tuzilishi dastlabki namunalarga nisbatan sezilarli darajada o'zgarganligini ko'rsatdi. Rentgenogrammadagi eng intensiv refleks (111) kristallografik yo'nalishdagi Si ga to'g'ri keladi. Ushbu refleksda tekisliklararo masofa $d = 1,84\text{ nm}$ va kristallitning o'rtacha o'lchami $L = 0,474\text{ nm}$ bo'lib, dastlabki namuna ko'rsatkichlariga nisbatan L ning qiymati deyarli 6 baravar katta va d ning qiymati esa deyarli 3 baravar kichik. Ushbu o'zgarishlar Cu va Ni kirishma atomlari ta'siri ostida kristall panjarasining deformatsiyasi natijasida yuzaga kelgan deb talqin qilinadi. Ularning kristall panjarasiga kirib borishi atomlararo masofalarning buzilishiga olib keladi, bu esa difraksiya reflekslarining parametrlariga ta'sir qiladi. $2\theta = 10,77^{\circ}$ burchak ostidagi kuzatilayotgan refleks SiC birikmasiga tegishli ekanligi aniqlangan, bu esa termik ishlov berish jarayonida kremniy bilan uglerod o'rtasidagi o'zaro ta'sirni ko'rsatadi.



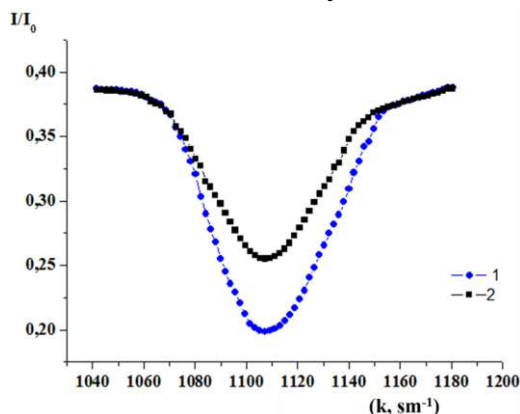
10-rasm. n-Si namunasi difraktogrammasi.



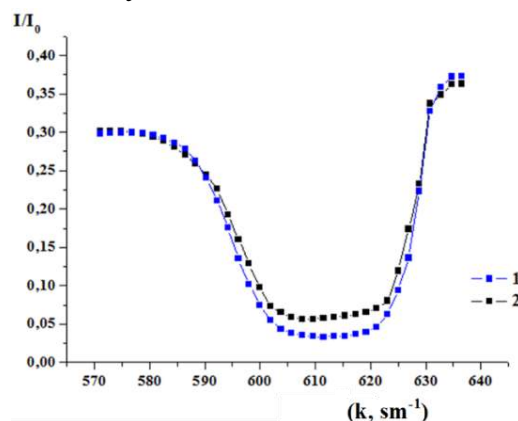
11-rasm. n-Si<Ni,Cu> namunasi difraktogrammasi.

Keyingi $2\theta = 20,88^{\circ}$ burchak ostida kuzatilgan xarakterli refleks mis oksidi (CuO) ga to'g'ri keladi. Hisoblashlarga ko'ra, bu refleks $L = 2,805\text{ nm}$ va $d = 1,27\text{ nm}$ parametrlariga mos keladi, bu esa namunalarda diffuziya jarayonida hosil bo'lgan ikkinchi darajali mis fazasining mavjudligini tasdiqlaydi. Xususan, $2\theta = 44,12^{\circ}$ burchak ostida kuzatiladigan refleks alohida qiziqish uyg'otadi, u boshqa namunalarning rentgenogrammasida kuzatilmagan va uch komponentli SiCu_5Ni_8 birikmasiga tegishli. Ushbu fazaning aniqlanishi kremniy, mis va nikel o'rtasidagi ko'p komponentli o'zaro ta'sir ehtimolini ko'rsatadi, bu esa kremniyning kristall matritsada barqaror murakkab birikmalar hosil bo'lishiga olib keladi. Bunday fazalarning paydo bo'lishi namunaning elektrofizik xususiyatlariga, hamda uning issiqlik barqarorligi va strukturaviy birxilligiga sezilarli darajada ta'sir qilishi mumkin. 12-rasmda dastlabki va n-Si<Ni,Cu> namunalardagi optik faol kislorod

konsentratsiyasi o'zgarishining IQ-Fure spektrogrammasi fragmenti keltirilgan. Hisoblashlar shuni ko'rsatadiki, n-Si<Ni,Cu> namunalarida optik faol kislorodning konsentratsiyasi 30% ga kamayadi. Bu shuni anglatadiki, yuqori haroratli diffuziyaviy legirlash jarayonida kislorod atomlari kirishma atomlari bilan bog' hosil qilib, metall oksidini hosil qiladi. Shu sababli, legirlangan namunalardagi optik faol kislorod konsentratsiyasi sezilarli darajada kamayadi.



12-rasm. O'tkazish koeffitsientining to'liq vektoriga bog'liqlik grafi: 1- dastlabki namuna, 2-n-Si<Ni,Cu> namunasi.



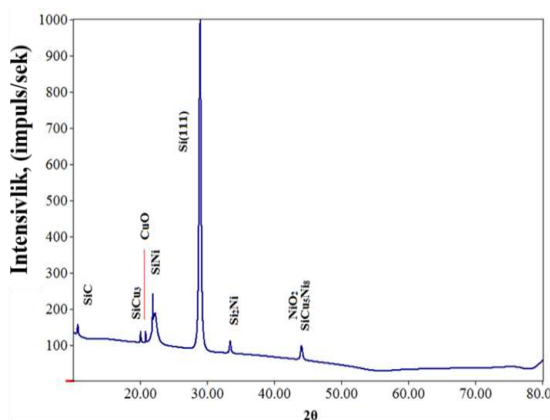
13-rasm. O'tkazish koeffitsientining to'liq vektoriga bog'liqlik grafi: 1- dastlabki namuna, 2-n-Si<Ni,Cu> namunasi.

13-rasmda dastlabki va n-Si<Ni,Cu> namunalardagi optik faol uglerod konsentratsiyasining o'zgarishi IQ-Fure spektrogrammasi fragmenti keltirilgan. Hisoblashlar n-Si<Ni,Cu> namunalarida optik faol uglerod konsentratsiyasi dastlabki namunaga nisbatan deyarli 20% ga kamayganini ko'rsatadi. Yuqori haroratli termik ishlov berish oqibatida kirishmalarning o'zaro ta'siri uglerodning panjarada qayta taqsimlanishiga va uning optik jihatdan nofol holatlarga o'tishiga sabab bo'lgan

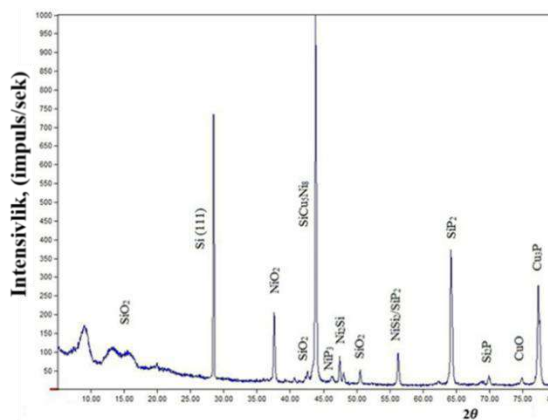
“Si<Cu,Ni> namunalarining xususiyatlariga tashqi omillarning ta'siri” deb nomlangan to'rtinchi bobda harorat va radiatsiyaviy nurlanishning Si<Cu,Ni> namunalarining elektrofizik xususiyatlariga ta'sirini o'rganish natijalari keltirilgan.

14-rasmda n-Si<Ni,Cu> namunasining $t = 1200^\circ\text{C}$ haroratda termik tavlashdan oldingi va keyingi rentgenogrammasi keltirilgan. Termik tavlashdan keyin n-Si<Ni,Cu> namunasining rentgenogrammasida turli birikmalarga xos bo'lgan yangi reflekslarning hosil bo'lishini va ba'zi mavjud reflekslarning yo'qolishi kuzatilgan.

Namunaning termik tavlashdan oldingi rentgenogrammasida SiC, SiCu₃, CuO va SiNi birikmalariga mos keladigan reflekslar $0^\circ \div 25^\circ$ burchak oralig'ida kuzatilgan bo'lib (14 a-rasm), termik tavlashdan keyin ular rentgenogrammada kuzatilmagan. Bu burchak oralig'ida kristall kremniyga xos tartibli tuzilishga ega bo'lmagan amorf zona namoyon bo'lgan. Bunday zonalar haroratning o'zgarishi va kristall tuzilishiga ta'sir qiluvchi boshqa omillar natijasida paydo bo'lishi mumkin, bu esa uning bir qismining amorf holatga o'tishiga olib keladi. Si ga mos keladigan refleksning intensivligi termik tavlashdan keyin pasayishi va bu refleksning kichik burchaklar tomon siljishi kuzatildi (14 b-rasm,).



a)



b)

14-rasm. n-Si<Ni,Cu> namunasining $t = 1200$ °C haroratli termik tavlashdan oldingi (a) va keyingi (b) rentgenogrammalari.

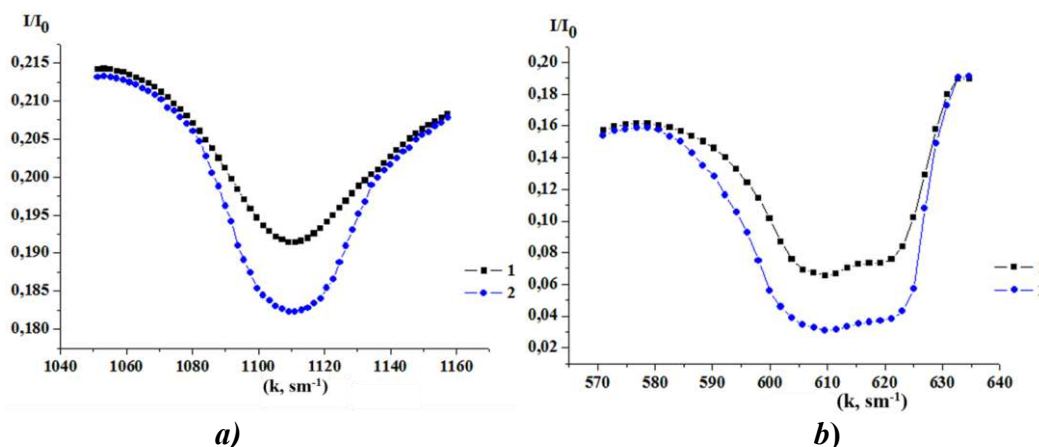
Termik tavlashdan oldin, $30^\circ \div 50^\circ$ burchak oralig'ida, SiO_2 va SiCu_5Ni_8 birikmalariga mos keladigan ikkita refleks kuzatilgan bo'lib, tavlashdan so'ng, xuddi shu burchak oralig'ida, NiO_2 , SiO_2 , NiP_3 , Ni_2Si birikmalariga mos keladigan bir nechta yangi reflekslar kuzatilgan va mavjud bo'gan reflekslarning intensivligi o'zgardi. Termik tavlashdan oldin namuna rentgenogrammasida $50^\circ \div 80^\circ$ burchak oralig'ida hech qanday reflekslar kuzatilmagan va tavlashdan so'ng esa xuddi shu burchaklar oralig'ida SiO_2 , NiSi_2 , SiP_2 , Si_2P , CuO va Cu_3P birikmalariga mos keladigan bir nechta turli xil strukturaviy chiziqlar kuzatildi.

Namunaning elektrofizik parametrlariga termik tavlashning ta'sirini o'rganish maqsadida harorat ta'siridan oldin va keyin ularning solishtirma qarshiliklari o'lchandi. Bunda tayyorlangan namunalarga $t = 1000$ °C haroratda 15 daqiqa va $t = 1200$ °C haroratda 10 daqiqa davomida termik ishlov berildi. 1000 °C haroratda termik tavlashdan so'ng n-Si<Ni,Cu> namunalar solishtirma qarshilikligining oldingi holatga nisbatan 27% ga keskin oshishi kuzatildi. Ushbu namunani 1200 °C haroratda yana 10 daqiqa tavlagandan so'ng, uning solishtirma qarshiligi 15% ga keskin pasayganligi kuzatildi.

Termik tavlashdan so'ng n-Si<Ni,Cu> namunalarida optik faol kislorod va uglerod atomlari konsentratsiyasining o'zgarishini aniqlash maqsadida bir qator optik o'lchashlar o'tkazildi. 15-rasmda $t = 1200$ °C haroratda $\tau = 10$ daqiqa davomida termik tavlashdan keyin n-Si<Ni,Cu> namunalarida nazorat namunalariga nisbatan optik faol kislorod (15 a-rasm) va uglerod (15 b-rasm) konsentratsiyasining o'zgarishini aks ettiruvchi IQ-Fure spektrlarining fragmentlari keltirilgan.

15 a-rasmda optik faol kislorod konsentratsiyasining o'zgarishini aks ettiruvchi IQ-Fure spektrlarining fragmenti keltirilgan. Optik faol kislorod konsentratsiyasi (3) formula yordamida hisoblanadi. Hisoblashlar shuni ko'rsatadiki, 1200 °C da termik tavlashdan keyin n-Si<Ni,Cu> namunalaridagi optik faol kislorod konsentratsiyasi nazorat namunasiga nisbatan 1,25 baravar ortgan (15 a-rasm). Bu esa yuqori haroratlarda (1200 °C) Ni va Cu atomlarining mavjudligida kislorodning kristall hajmidan sirt sohalariga faol tarqalishi, shuningdek, kislorodli komplekslarning (masalan, SiO_x , metall oksidi biriklamalari) parchalanishi natijasida uning qayta taqsimlanishi bilan bog'liq.

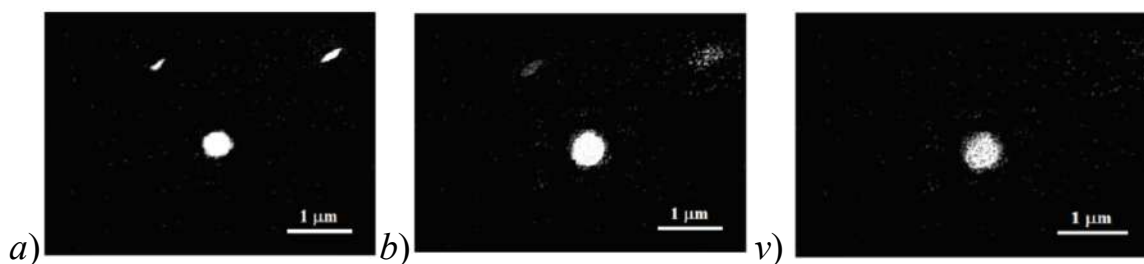
15 *b*-rasmda kremniydagi optik faol uglerod konsentratsiyasi o'zgarishining spektrogrammasi keltirilgan. Optik faol uglerodning konsentratsiyasi (4) formula yordamida hisoblanadi. Hisoblashlar shuni ko'rsatadiki, $n\text{-Si}\langle\text{Ni,Cu}\rangle$ namunalariidagi optik faol uglerodning konsentratsiyasi nazorat namunasiga nisbatan termik tavlashdan so'ng 1,81 baravar oshgan. Buning sababi shundaki, yuqori haroratlarda ilgari mavjud komplekslarda (Cu-C va Ni-C) bog'langan uglerod tugunlararo C_i atomlari ko'rinishida ajralib chiqadi. 1200 °C da uglerodning harakatchanligining ortishi, shuningdek, karbid fazalarining (SiC , Cu_xC_y) parchalanishi optik faol markazlar ulushining oshishiga olib keladi.



15-rasm. Optik o'tkazish koeffitsientining to'liqin vektoriga bog'liqlik grafi. 1- nazorat namunasi, 2 - $n\text{-Si}\langle\text{Ni,Cu}\rangle$ namunasi.

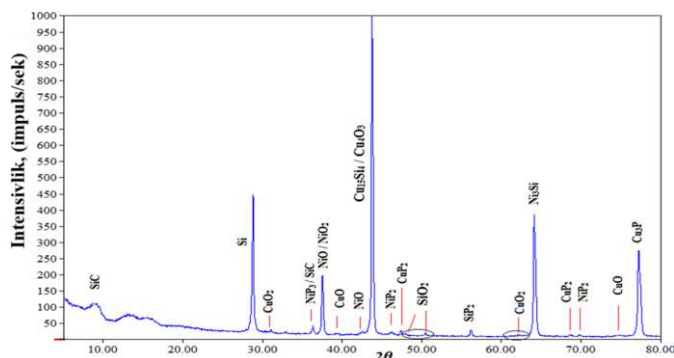
$n\text{-Si}\langle\text{Ni,Cu}\rangle$ namunasida hosil bo'lgan kirishma to'plamlarining morfologik xususiyatlariga haroratning ta'sirini o'rganish maqsadida skanerlovchi elektron mikroskop SEM yordamida mikroskopik tahlil o'tkazildi. 16-rasmdan ko'rinish turibdiki, yuqori haroratli diffuziyaviy legirlash paytida namuna yuzasida turli o'lcham va shakldagi kirishma to'plamlari hosil bo'lgan (16 *a*-rasm). Olingan natijalar 1000 °C da 15 daqiqa davomida termik tavlashdan so'ng namunadagi kirishma to'plamlarining zichligi kamayganini, kichik o'lchamdagi kirishma to'plamlarining esa qisman parchalanganini ko'rsatadi (16 *b*-rasm). Termik tavlash haroratini 1200 °C ga ko'tarish yirik kirishma to'plamlari zichligining yanada pasayishiga va kichik kirishma to'plamlarining butunlay parchalanishiga olib kelgan (16 *v*-rasm).

Gamma nurlanishining tashqi omil sifatida namualarga ta'sirini tadqiq qilish maqsadida tayyorlangan namunalar turli dozalarda gamma nurlari bilan nurlantirildi. Tajribalarda eng maqbul dozalar sifatida uchta doza tanlandi: 10^7 rad, $5 \cdot 10^7$ rad va 10^8 rad. Nurlanishdan oldin va keyin namunalar rentgenostrukturaviy tahlil yordamida o'rganildi va natijalar quyidagi rasmlarda keltirilgan. 17-rasmda 10^7 rad dozada nurlantirilgan $n\text{-Si}\langle\text{Ni,Cu}\rangle$ namunaning rentgenogrammasi keltirilgan. Rentgenogrammada yangi kirishma birikmalari NiP_2 va CuP_2 ga tegishli bo'lgan va mos ravishda $2\theta = 46,10^\circ$ va $2\theta = 47,44^\circ$ burchak ostida akslangan refleklar kuzatildi. Rentgenogrammada yana bitta yangi, SiO_2 birikmasiga mos keluvchi, ikki xil burchak $2\theta = 48,03^\circ$ va $2\theta = 50,37^\circ$ ostida akslanadigan refleks kuzatiladi.



16-rasm. n-Si<Ni,Cu> namunalarining $t = 1000$ °C haroratli termik tavlashdan oldin (a) va keyin (b) hamda $t = 1200$ °C haroratli termik tavlashdan keyingi (v) kirishma to'plamlari.

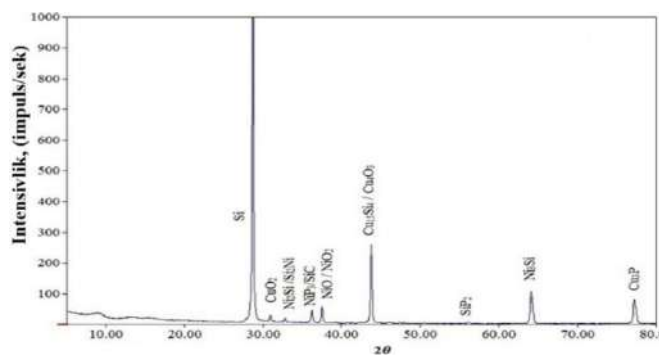
Shunday qilib, olingan natijalardan ko'rinib turibdiki, nurlanish ta'sirida turli xil yangi birikmalar hosil bo'lgan, shu bilan birga namunalar hajmida mavjud bo'lgan ba'zi birikmalar parchalangan. Masalan, radiatsiya ta'siridan so'ng SiCu_3 , CuO , Si_2Ni va SiNi birikmalarining yo'qolishi, shuningdek, CuO_2 , CuO , NiP_2 , CuP_2 , SiP_2 , Ni_3Si , Cu_3P , Ni_3P , $\text{Cu}_{15}\text{Si}_4$ va Cu_4O_3 birikmalarining hosil bo'lishi kuzatildi.



17-rasm. n-Si<Ni,Cu> namunasining $1 \cdot 10^7$ rad dozali nurlanishdan keyingi rentgenogrammasi.

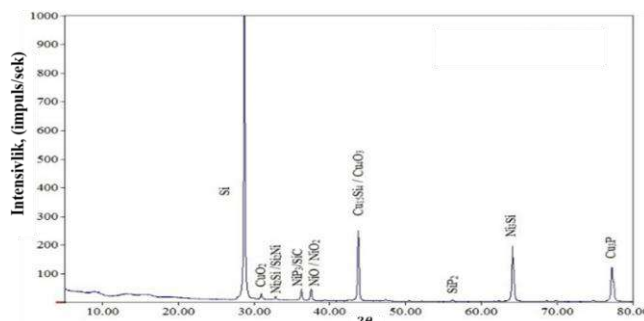
18-rasmda $5 \cdot 10^7$ rad dozada nurlantirilgan n-Si<Ni,Cu> namunalarning rentgenogrammasi keltirilgan. $1 \cdot 10^7$ rad dozada nurlantirishda aniqlangan reflekslarga aloqador bo'lgan birikmalar $5 \cdot 10^7$ rad dozada nurlantirishdan keyin parchalanib, yangi birikmalar hosil bo'lgan. Bunda $1 \cdot 10^7$ rad dozada nurlantirilgan namuna rentgenogrammasiga nisbatan,

$5 \cdot 10^7$ rad dozada nurlantirilgan namunada $2\theta = 0^\circ \div 10^\circ$ burchaklar oralig'ida yangi birikmalarning reflekslari kuzatilmagan bo'lib, oldin mavjud bo'lgan va Si ga tegishli bo'lgan reflekslarining intensivligi $6 \div 7$ marta ortishi kuzatildi. Bu esa kristalldagi Si miqdorining oshganligini ko'rsatadi. Shuningdek, ushbu refleksning akslanish burchagi kichik burchaklar tarafga $0,0958^\circ$ ga siljishi kuzatildi. $5 \cdot 10^7$ rad dozali nurlanishdan so'ng olingan rentgen tasvirida CuO_2 refleksining intensivligi $1 \cdot 10^7$ rad dozali nurlantirishdan keyin olingan rentgen tasviridagi shu refleksga nisbatan 2,5 barobar oshgani va kuzatuv burchagi kichik burchaklar tomon $0,11^\circ$ ga siljgani kuzatildi. Shuningdek, ushbu rentgen tasvirida ilgari kuzatilmagan yangi $\text{Ni}_2\text{Si}/\text{Si}_2\text{Ni}$ birikmalar refleksi kuzatildi. 18-rasmdagi rentgen tasvirida $2\theta = 36,23^\circ$ burchak ostida kuzatilgan refleksning intensivligi 17-rasmdagi rentgen tasvirida xuddi shu burchakda kuzatilgan refleks intensivligidan 3,5 barobarga ortgan. 18-rasmda ko'rsatilgan rentgenogrammada $2\theta = 37,5^\circ$ burchak ostida kuzatilgan va NiO_2/NiO birikmalarga mansub refleksning intensivligi, 17-rasmdagi rentgenogrammada kuzatilgan ushbu refleksga nisbatan 13% ga pasaygan. 10^7 rad dozali nurlanishdan so'ng olingan rentgen tasviridagi eng baland refleksning intensivligi $5 \cdot 10^7$ rad dozali nurlanishdan so'ng olingan refleksning intensivligiga nisbatan 20% ga kamaygan. $5 \cdot 10^7$ rad nurlanishdan so'ng $45 \div 50^\circ$ burchak oralig'ida

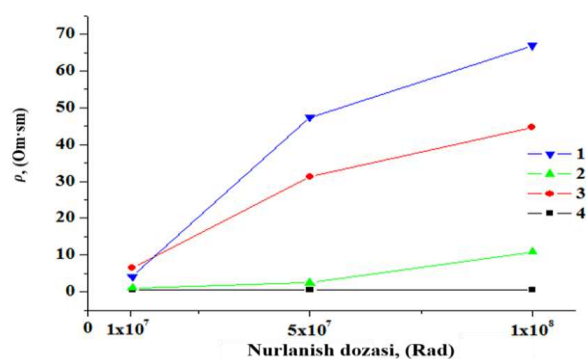


18-rasm. n-Si<Ni,Cu> namunasining $5 \cdot 10^7$ rad dozali nurlanishdan keyingi rentgenogrammasi.

rentgenogrammada kuzatilgan NiP_2 , CuP_2 va SiO_2 birikmalariga mos reflekslar intensivliklari, $5 \cdot 10^7$ rad dozali nurlanishdan so'ng olingan rentgenogrammaga nisbatan, mos ravishda 6%, 17% va 11% ga pasaygan. $5 \cdot 10^7$ rad dozali nurlanishdan so'ng olingan rentgenogrammada $65^\circ \div 77^\circ$ burchak oralig'ida hech qanday reflekslar kuzatilmadi.



19-rasm. n-Si<Ni,Cu> namunasining $1 \cdot 10^8$ rad dozali nurlanishdan keyingi rentgenogrammasi.



20-rasm. Namunalar solishtirma qarshiligining nurlanish dozasi bog'liqligi:

1- n-Si, 2- n-Si<Cu>, 3- n-Si<Ni> va 4- n-Si<Ni,Cu>.

Biroq 10^7 rad dozali nurlanishdan so'ng bu burchak oralig'ida CuP_2 , NiP_2 va CuO birikmalariga mos bir nechta reflekslar kuzatilgan. 19-rasmda n-Si<Ni,Cu> namunalarining 10^8 rad dozali nurlanishdan so'ng olingan rentgenogrammasi keltirilgan. 19-rasmdan ko'rinib turibdiki, 18-rasmdagi rentgenogramaga nisbatan olganda yangi birikmalarga mos reflekslar kuzatilmagan va faqat mavjud birikma reflekslarining intensivliklarida o'zgarishlar kuzatilgan.

Nikel va mis elementlari bilan bir vaqtda va alohida legirlangan namunalarning solishtirma qarshiliklarining qiymatlari har xil dozali nurlanishdan oldin va keyin to'rt zondli usul yordamida o'lchandi. Olingan natijalar 20-rasmda keltirilgan. Barcha nurlanish dozalarida n-Si<Ni,Cu> namunasining solishtirma qarshiligining (ρ) qiymatida deyarli o'zgarish kuzatilmadi (20-rasm, 4-egri chiziq).

10^7 rad doza bilan nurlantirilgan Si<Ni> namunaning solishtirma qarshiligi (ρ) nurlanmagan namunaga nisbatan 11,86 barobar oshgan. Nurlanish dozasi 10^8 rad gacha oshganda solishtirma qarshilik nurlanmagan namunaga nisbatan 82 baravar oshgan (20-rasm, 3-egri chiziq).

n-Si<Cu> namunani nurlantirilgandan so'ng, uning solishtirma qarshiligi sezilarli darajada oshadi. Dastlabki nurlanish dozasi nurlantirilgan n-Si<Cu>

namunasining solishtirma qarshiligi nurlantirilmagan namunaga nisbatan deyarli 3 baravar oshgan. Nurlanish dozasi $5 \cdot 10^7$ rad gacha oshganda, ushbu namunaning solishtirma qarshiligi nurlantirilmagan namuna solishtirma qarshiligiga nisbatan 4 baravar ortishi kuzatildi (20-rasm, 2-egri chiziq).

XULOSA

1. $t=1200$ °C haroratda kremniyni mis va nikel kirishma atomlari bilan bir vaqtda diffuziyaviy legirlash jarayonida namuna hajmida turli xil geometrik shaklga ega kirishma to'plamlari hosil bo'lishi, ularning o'lchamlari 10 nm dan 3 mkm gacha etishi aniqlandi.

2. Kremniyni nikel va mis kirishmalari bilan bir vaqtda yuqori haroratli ($t=1200$ °C) diffuziyaviy legirlashda namunalarda dastlabki namunalarga nisbatan optik faol kislorod konsentratsiyasi $\sim 30\%$ ga, optik faol uglerod konsentratsiyasi esa $\sim 23\%$ ga kamayishi, bu esa kislorod va uglerod kirishma atomlari ishtirokida turli xil birikmalar hosil bo'lishi bilan bog'liq ekanligi aniqlandi.

3. Nikel va mis bilan bir vaqtda legirlangan kremniy namunalari hajmida γ -nurlanish ta'sirida SiCu_3 , CuO , Si_2Ni , SiNi kabi kirishma birikmalarining parchalanishi va kislorod, nikel va mis kirishma atomlari ishtirokida Cu_4O_3 , Ni_3Si , $\text{Cu}_{15}\text{Si}_4$ kabi yangi birikmalarning hosil bo'lishi aniqlandi.

4. 10^8 rad dozali γ -nurlanish ta'sirida $n\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$ va $n\text{-Si}\langle\text{Cu}\rangle$ namunalarining solishtirma qarshilik qiymati mos ravishda 82 va 18 marta ortishi aniqlandi. Ulardan farqli ravishda, nurlanishning ushbu dozasi qiymatida $n\text{-Si}\langle\text{Ni,Cu}\rangle$ namunalarining solishtirma qarshilik qiymati $\sim 1,5$ marta ortdi, bu esa ushbu namunalarda radiatsiya ta'siriga chidamli ekanligini ko'rsatadi.

5. Birinchi marta $t=1000$ °C haroratda 15 daqiqa davomida, $t=1200$ °C haroratda esa 10 daqiqa davomida termik tavlash ta'sirida Ni va Cu bilan bir vaqtda legirlangan Si namunalari hajmida kirishma nanoto'plamlarining parchalanishi aniqlandi, bu namuna solishtirma qarshiligining deyarli ~ 2 tartibga ortishiga olib keladi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.03/2025.27.12.FM/T.01.06 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**

ТУРМАНОВА РАЙМАШ МАХМУТОВНА

**ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСНЫХ СКОПЛЕНИЙ АТОМОВ 3d-МЕТАЛЛОВ НА
ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРЕМНИЯ**

01.04.10 – Физика полупроводников

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD)
ПО ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИМ НАУКАМ**

Ташкент – 2026

Тема диссертации на соискание ученой степени доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Академии наук Республики Узбекистан под номером B2021.1.PhD/FM584.

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.ziynet.uz).

Научный руководитель:

Тургунов Нозимжон Абдуманнопович
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Аюпов Кутуб Саутович
доктор физико-математических наук, профессор

Бобоев Акромжон Йулдашбоевич
доктор физико-математических наук, доцент

Ведущая организация:

Наманганский государственный университет

Защита диссертации состоится «17» 09 2026 года в 14⁰⁰ часов на заседании Научного совета DSc.03/2025.27.12.FM/T.01.06 по присуждению ученых степеней при Научно-исследовательском институте Физики полупроводников и микроэлектроники при Национальном университете Узбекистана (Адрес: 100057, Узбекистан, г. Ташкент, ул. Янги Алмазар, дом 20. Тел: (+99871) 248-79-94, факс (+99871) 248-79-92, e-mail: info@ispm.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в информационно-ресурсном центре института (зарегистрирована за № 78) по адресу: 100057, Узбекистан, г. Ташкент, ул. Янги Алмазар, дом 20. Тел: (+99871) 248-79-59

Автореферат диссертации разослан «03» 09 2026 г.
(реестр протокола рассылки № 78 от 03 . 09 2026 г.).



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

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

О.Х. Кулданов
Председатель научного семинара
при Научном совете по присуждению
ученых степеней, д.т.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время во всем мире в производстве приборов микроэлектроники, широко применяются полупроводниковые материалы, такие как кремний, германий, арсенид галлия, фосфид галлия и другие, легированные различными примесями. Присутствие примесей в объеме полупроводника приводит к появлению дефектов в его кристаллической структуре, что может повлиять на их свойства. В данном аспекте особое внимание уделяется изучению влияния примесных дефектов на свойства монокристаллического кремния, легированного примесями 3d-переходных металлов. Потому что кремний, легированный этими примесями, создаёт большие возможности в управлении электрофизическими свойствами полупроводниковых приборов, создаваемых на его основе. В связи с этим особое внимание уделяется на изучение особенностей примесных скоплений, и их влияния на свойства полупроводникового кремния.

В мировом масштабе в области физики полупроводников интенсивно проводятся научные исследования по определению морфологических параметров примесных скоплений, образующихся на поверхности и в объеме полупроводниковых материалов в процессе легирования различными методами. В частности, оптимизации технологических процессов диффузионного легирования кремния, различными примесями, так как до настоящего времени кремний является одним из основных материалов для изготовления различных полупроводниковых приборов. Поэтому в последнее время проводятся ряд исследований по изучению свойств кремния, легированного 3d-переходными металлами, в объеме которых образуются многокомпонентные примесные скопления с различными морфологическими параметрами.

В нашей республике проводятся исследования в области управления свойствами кремния, легированного различными примесями и параметрами устройств, созданных на их основе. При этом особое внимание уделяется изучению процессов формирования и распада примесных скоплений атомов 3d-переходных металлов в объеме кремния. В Постановлении Президента Республики Узбекистан от 19 марта 2021 года № ПП-5032 «О мерах по повышению качества образования и совершенствованию научных исследований в области физики» отмечены задачи «...обеспечение неразрывной связи научных исследований в области физики с производством, расширение масштаба научных работ, направленных на решение проблем в отраслях экономики; повышение результативности и практического значения научных исследований и инновационной деятельности»¹. В этом направлении важное научное и практическое значение приобретают работы, проводимые в области создания новых полупроводниковых материалов и многослойных

¹ Постановление Президента Республики Узбекистан № ПП-5032 от 19 марта 2021 года «О мерах по повышению качества образования и развитию научных исследований в области физики».

структур на их основе, чувствительных к внешним факторам (температура, давление, облучение).

Данная диссертационная работа в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в Указе Президента Республики Узбекистан №УП-60 «О стратегии развития нового Узбекистана на 2022-2026 годы»² от 28 января 2022 года, в Постановлениях Президента Республики Узбекистан № ПП-5011 «О дополнительных мерах по дальнейшему развитию электротехнической промышленности и повышению конкурентоспособности отечественной продукции»³ от 3 февраля 2021 года, №ПП-57 «О мерах по ускорению внедрения возобновляемых источников энергии и энергосберегающих технологий в 2023 году»⁴ от 16 февраля 2023 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. До настоящего времени многими зарубежными учеными были изучены механизмы диффузии 3d-переходных металлов в кремнии, процессы образования различных дефектов примесных атомов, а также их влияние на электрофизические, фотоэлектрические свойства кремния. В частности, А. Милнс, К. Графф, Х. Мехрер, Х. Китагава, С.К. Эстрайхер, М. Йошида, Х. Албертс, Дж. Линдроос, С. Танака, Д. Нимен, Д. Тобнаги и другими учеными были проведены различные научно-практические исследования в этой области и достигнуты высокие результаты.

Образование в кремнии различных дефектов и примесных комплексов, их физические свойства, а также влияние температуры и излучения на электрофизические параметры легированного кремния и приборов на его основе исследованы учеными А. Истратовым, В. Орловым, А. П. Долголенко, Н. Ярикиным, Г. П. Гайдаром, М. И. Тимошиной и другими.

В Узбекистане академиками М. Бахадырхановым, С. Зайнабидиновым, Р. Муминовым, А. Мамадалимовым, профессорами К. Абдурахмановым, Х. Далиевым, Ш. Утамурадовой и их учениками изучены взаимодействия различных примесных атомов с радиационными и тепловыми дефектами и их влияния на протекающие в кремнии процессы рекомбинации, а также влияния внешних факторов на состояние примесных дефектов. Однако до сих пор структурное строение примесных скоплений, образующихся в кремнии, легированном никелем и медью диффузионным методом,

² Указ Президента Республики Узбекистан №УП-60 от 28 января 2022 года «О стратегии развития нового Узбекистана на 2022-2026 годы».

³ Постановление Президента Республики Узбекистан № ПП-5011 от 3 февраля 2021 года «О дополнительных мерах по дальнейшему развитию электротехнической промышленности и повышению конкурентоспособности отечественной продукции».

⁴ Постановление Президента Республики Узбекистан № ПП-57 от 16 февраля 2023 года «О мерах по ускорению внедрения возобновляемых источников энергии и энергосберегающих технологий в 2023 году».

элементный состав и процессы их разложения под действием внешних факторов.

Однако, до настоящего времени недостаточно изучены структурные строения, элементный состав и процессы распада примесных скоплений, образующихся в объеме кремния, легированного никелем и медью с помощью высокотемпературного диффузионного метода.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного или научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнена в рамках проекта научных исследований научно-исследовательского института физики полупроводников и микроэлектроники при Национальном университете Узбекистана по теме: IL-652205571 «Создание высокоэффективных кремниевых структур со стабильными параметрами на основе анализа оптических, емкостных и резонансных свойств полупроводников с различными глубокими уровнями» (2023-2024 гг.).

Целью исследования является изучение влияния примесных скоплений атомов никеля и меди на электрофизические свойства кремния, а также процессов формирования и распада примесных скоплений под воздействием внешних факторов (температура, γ -облучение).

Задачи исследования:

изучение электрофизических параметров и структурных свойств образцов $n\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$, $n\text{-Si}\langle\text{Cu}\rangle$ и $n\text{-Si}\langle\text{Ni,Cu}\rangle$;

изучение поведения и взаимного влияния примесных атомов в образцах $n\text{-Si}\langle\text{Cu}\rangle$ и $n\text{-Si}\langle\text{Ni,Cu}\rangle$ с помощью рентгеноструктурного анализа;

изучение морфологии и определение параметров примесных скоплений, сформированных в объеме образцов, полученных на основе раздельной ($n\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$ и $n\text{-Si}\langle\text{Cu}\rangle$) и комбинированной ($n\text{-Si}\langle\text{Ni,Cu}\rangle$) диффузии;

изучение влияния внешних факторов (термического отжига и облучения) на электрофизические и структурные параметры кремния, легированного никелем и медью методом раздельной и комбинированной диффузии.

Объектом исследования являются образцы монокристаллического кремния, легированные никелем и медью методом раздельной ($n\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$ и $n\text{-Si}\langle\text{Cu}\rangle$) и комбинированной ($n\text{-Si}\langle\text{Ni,Cu}\rangle$) диффузии.

Предметом исследования являются процессы формирования микро- и наноскоплений примесных атомов никеля и меди в монокристаллах кремния, а также процессы их распада под воздействием термического отжига и радиации.

Методы исследований. Для решения поставленных задач были использованы следующие методы: для определения структурного строения и элементного состава примесных скоплений никеля и меди в монокристалле кремния использовались современные методы электронной микроскопии с высокой точностью, в частности, электронно-зондовый микроскоп Superprobe JXA-8800R (JEOL) и сканирующий электронный микроскоп JSM-IT200, анализ структурного строения образцов, легированных никелем и медью

проводился методом рентгеноструктурного анализа на дифрактометре XRD-6100, определение концентрации оптически активных углерода и кислорода в объеме образца проводил ИК спектрометрия с использованием Фурье-ИК спектрометра марки ФСМ-2201.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

установлено, что при одновременном высокотемпературном ($t = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$) диффузионном легировании кремния, примесями Ni и Cu в объеме образцов формируются скопления примесных атомов, которые имеют различные геометрические формы и их размеры достигают от 10 нм до 3 мкм;

выявлено, что в процессе одновременного диффузионного легирования кремния, примесями никеля и меди при температуре $t = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ концентрация оптически активного кислорода в объеме образцов уменьшается на $\sim 30\%$, а атомы углерода уменьшаются на $\sim 20\%$;

установлено, что в объёме образцов $n\text{-Si}\langle\text{Ni,Cu}\rangle$ под воздействием γ -облучения происходит распад примесных соединений SiCu_3 , CuO , Si_2Ni , SiNi и образование новых соединений, с участием примесных атомов кислорода, никеля и меди такие как Cu_4O_3 , Ni_3Si , $\text{Cu}_{15}\text{Si}_4$;

впервые установлено, что под воздействием термического отжига при температуре $t = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 15 минут, а при температуре $t = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 10 минут, в объеме образцов Si, одновременно легированного Ni и Cu происходит распад примесных наноскоплений.

выявлено, что под воздействием γ -облучения дозой 10^8 рад значение удельного сопротивления образцов $n\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$, $n\text{-Si}\langle\text{Cu}\rangle$ и $n\text{-Si}\langle\text{Ni,Cu}\rangle$ возрастает на 82, 18 и 1,5 раза соответственно, которое показывает, что образцы кремния, одновременно легированные Ni и Cu являются радиационно устойчивыми.

Практическими результатами исследования являются:

разработаны технологические условия диффузии монокристалла кремния примесями Cu и Ni, которые обеспечивают получение полупроводниковых материалов с заранее заданными электрофизическими параметрами;

определены режимы последиффузионной термической обработки и скорости охлаждения образцов, обеспечивающие целенаправленное управление морфологических параметров примесных скоплений в кремнии, легированного никелем и медью;

выявлены возможности контролирования процессов формирования новых примесных соединений, с участием атомов никеля и меди в объеме кремния, путем выбора условий последиффузионной радиационной обработки;

разработаны методы повышения термической и радиационной устойчивости электрофизических свойств кремния, легированного никелем и медью.

Достоверность результатов исследования обоснована применением общепринятых стандартных и широко используемых методов исследования электрофизических свойств монокристаллов кремния, легированных никелем и медью, физических процессов, протекающих в них в процессе и после

диффузии, под различными внешними воздействиями. Для определения электрофизических параметров использовался современный прибор Escoria HMS-7000, основанный на эффекте Холла с погрешностью измерения 0,0001%. Структурные свойства и морфологические особенности скоплений примесных атомов, сформированных в монокристаллическом кремнии, легированном никелем и медью, определялись методом рентгеноструктурного анализа с помощью дифрактометра XRD-6100 с погрешностью измерения в пределах 0,001÷0,004%, и сканирующего электронного микроскопа марки JSM-IT 200. Определение концентрации оптически активных углерода и кислорода в объеме образца осуществлялась с помощью современного Фурье-ИК спектрометра с погрешностью измерения 0,01÷0,02%.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследования заключается в расширении физических представлений о закономерностях формирования скоплений примесных атомов и их распада, изменения электрофизических свойств образцов n-Si<Ni>, n-Si<Cu> и n-Si<Ni,Cu> под воздействием γ -облучения и высоких температур, о радиационно-индуцированных процессах, фазовых превращениях и изменении концентрации оптически активных кислорода и углерода в легированных образцах.

Практическая значимость результатов исследования заключается в использовании полученных зависимостей и выявленных механизмов для оптимизации технологических режимов термообработки и легирования кремния с целью получения материалов с заданными электрофизическими свойствами. Результаты могут быть применены при разработке радиационно-стойких полупроводниковых структур для микро- и оптоэлектроники, космической техники и ядерной энергетики и др.

Внедрение результатов исследования.

Научные результаты, полученные по управлению электрофизическими свойствами монокристаллического кремния, с примесными скоплениями атомов 3d-металлов, с помощью внешних воздействий:

данные о формировании скоплений примесных атомов в объеме образцов, имеющие разные геометрические формы и размеры, достигающие от 10 нм до 3 мкм и имеющие в составе кроме атомов кремниевого матричного элемента и основного легирующего никеля, также атомов технологических примесей как кислород и углерод с процентной долей атомов 0,01-0,001%, происходящих при высокотемпературном ($t = 1200$ °C) диффузионном легировании кремния одновременно примесями <Ni,Cu> <Ni,Fe>, присутствии в их составе кроме никеля и меди, считающихся основными элементами матрицы и примесями; увеличении концентрации носителей заряда в образцах n-Si<Cu> почти в 8 раз, уменьшении их подвижности более чем на один порядок при изменении температуры в интервале -153÷47 °C, были использованы при выполнении подпрограммы «Физика конденсированного состояния и создание новых функциональных материалов и технологий их получения» проекта 1.3.1 «Дефектно-примесная инженерия радиационно-индуцированных центров в кремниевых приборных структурах»

научно-практического центра по материаловедению АН Белорусии (Справка от 12 ноября 2024 года Научно-практического центра по материаловедению АН Белорусии). Использование научных результатов позволило расширить функциональные возможности диодов и МДП-структур, полученных на основе кремния, легированного примесными атомами Ni и Cu.

выявлены зависимости структурных строений скоплений примесных атомов никеля и железа в кремнии, от значений температуры диффузии и скорости охлаждения образцов после диффузии, то есть наблюдается образование примесных нановключений с размерами до нескольких сотен нанометров, имеющие различную геометрическую форму при температурах диффузии $t = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ в быстроохлаждаемых ($\geq 200\text{ }^{\circ}\text{C /с}$) образцах, а также распад примесных скоплений с размером до 400 нм под влиянием термического отжига при $t = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 20 минут. Полученные научные результаты были применены в Акционерном обществе «FOTON» при изготовлении полупроводниковых электронных приборов на основе кремния (Справка №04-3/1124 от 11 июля 2024 года АК Узэлтехсаноат). Использование научных результатов позволило контролировать электрофизические параметры экспериментальных образцов кремния, легированного никелем и медью, под воздействием термического отжига.

Апробация результатов исследования. Результаты диссертационной работы были представлены и обсуждены с докладами на 11 международных и в 2 республиканских научно-практических конференциях.

Публикация результатов исследования. Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 17 научных работах, из них 4 статей в научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных работ, в том числе 3 статьи в зарубежных международных журналах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объем диссертации составляет 123 страниц, включая 35 иллюстраций, 7 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность и востребованность темы диссертации, определена связь исследования с приоритетными направлениями развития науки и технологий республики, раскрыта степень изученности проблемы, определены цели и задачи, определены объекты, предметы и методы исследования, изложены научная новизна и практическая значимость исследования, обоснована достоверность результатов, приведены краткие сведения о внедрении результатов, апробации и публикациях работы, а также об объеме и структуре диссертации.

В первой главе, озаглавленной «Скопления примесных атомов 3d-металлов в полупроводниках», представлен обзор литературы о природе дефектов, образовавшихся в объеме и поверхности монокристаллического кремния, легированного элементами переходных металлов, образовании

примесных скоплений и их распада под воздействием различных внешних факторов. Также приведены данные о научных исследованиях, проведенных узбекскими и зарубежными учеными по изучению различных эффектов, возникающих в полупроводниках и влияния примесных атомов на эти эффекты. В конце главы представлены выводы по литературному обзору.

Во второй главе, озаглавленной «Методы исследования электрофизических, оптических и структурных свойств кремния, легированного элементами 3d-переходных металлов», представлены сведения о методах исследования по определению морфологических параметров скоплений примесных атомов, образующихся в полупроводниках, а также по измерению электрофизических и структурных параметров подготовленных образцов. Показано, что электрофизические параметры измерялись с помощью прибора Ecoria-7000.

Для выяснения структурных характеристик скоплений примесных атомов, сформированных в монокристаллах кремния, были исследованы фазовые и структурные фрагменты исходных образцов и образцов легированного кремния методом рентгеноструктурного анализа. При этом структурные исследования были выполнены на современном рентгеновском дифрактометре XRD 6100 в режиме пошагового сканирования с использованием CuK_α -излучения с длиной волны излучения $\lambda = 0,15405$ нм.

Компактный сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) JSM-IT200 обладает способностью получать увеличенные изображения примесных скоплений, образующихся в кристаллах, и проводить элементный анализ состава их отдельных точек. Современная компьютерная система управления микроскопом довольно проста, а все функции управления автоматизированы.

С целью более детального изучения состава примесных скоплений Cu и Ni, образующихся в монокристаллах кремния, и свойств образовавшихся между ними связей были использованы методы ИК-спектроскопии.

В третьей главе, озаглавленной «Морфология примесных скоплений и их влияние на электрофизические, структурные и оптические свойства кремния», представлены результаты экспериментальных исследований по изучению электрофизических параметров и структурных свойств образцов кремния, легированного никелем и медью, а также результаты определения оптически активных концентраций кислорода и углерода.

Определение структурных свойств скоплений примесных атомов в объеме монокристаллов кремния проводилось методом рентгеноструктурного анализа, при этом исследовались фазовые и структурные свойства исходных образцов, а также образцов кремния, легированного никелем и медью.

На рис. 1 представлена дифрактограмма образца n-Si. Анализ дифрактограммы показывает наличие двух отдельных дифракционных рефлексов с разной интенсивностью. Рефлекс наибольшей интенсивности наблюдается в интервале углов $2\theta = 28 \div 29^\circ$ и соответствует отражению от кристаллографической плоскости (Si(111) монокристаллического кремния. Второй рефлекс имеет значительно меньшую интенсивность и регистрируется в интервале углов $2\theta = 25 \div 26^\circ$. Этот сигнал определяется как рефлекс

отражения от аморфной или оксидной фазы – диоксида кремния (SiO_2), образование которого объясняется в связи с естественным или технологическим окислением поверхности образца при подготовке или обработке образцов.

Используя полученные результаты, можно определить расстояние между плоскостями в кристалле с помощью уравнения Вульфа-Брегга:

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (1)$$

где: d – межплоскостное расстояние, θ – угол Вульфа-Брегга, n – порядок дифракционного максимума, $\lambda = 0,15405$ нм – длина волны излучения CuK_α .

Результаты расчетов показывают, что для дифракционного рефлекса, наблюдаемого под углом $2\theta = 25,61^\circ$, соответствующего соединению SiO_2 , межплоскостное расстояние равно $d = 0,347$ нм. Точно так же межплоскостное расстояние, рассчитанное для рефлекса, наблюдаемому под углом $2\theta = 28,39^\circ$, соответствующего монокристаллическому кремнию (Si), равно $d = 0,628$ нм.

Размер нанокристаллита зависит от толщины осажденной пленки элемента и температуры отжига. Средний размер нанокристаллитов рассчитывается двумя методами: первый – методом СЭМ путем прямого расчета с использованием программы WXM, второй – методом рентгенографии с использованием формулы Шеррера:

$$L = \frac{K\lambda}{\beta\cos\theta} \quad (2)$$

где L – средний размер кристаллита, λ – длина волны рентгеновского излучения, β – полумаксимум (FWHM), полученный в радианах, θ – угол Брега и $K = 0,95$ постоянная Шеррера.

На рис. 2 представлены дифрактограммы образцов $\text{n-Si}\langle\text{Cu}\rangle$. Как видно из рис. 2, на дифрактограмме наблюдаются несколько рефлексов с разной интенсивностью. Самый высокий пик соответствует монокристаллическому кремнию (Si) с кристаллографической ориентацией (111). В этом рефлексе значения L и d составляют 0,75 нм и 0,61 нм, соответственно. Этот рефлекс отражается под углом $2\theta = 28,97^\circ$. Этот рефлекс несколько сместился в сторону больших значений угла по сравнению с тем же рефлексом исходного образца, где разница углов составила $\Delta\theta = 0,57^\circ$ и это показывает, что после диффузии происходит деформация кристаллической структуры матричного элемента Si .

Расчеты показывают, что рефлекс, наблюдаемый под углом $2\theta = 25,61^\circ$, соответствует SiO_2 , размер кристаллита которого имеет значение $L = 2,82$ нм. Средний размер кристаллита, рефлекс которого наблюдается под углом $2\theta = 28,39^\circ$, соответствующего Si , имеет значение 2,84 нм. Рефлекс, наблюдаемый под углом $2\theta = 26,15^\circ$ соответствует соединению SiO_2 и для него значения L и d равны 0,743 нм и 0,34 нм, соответственно. Следующий рефлекс отражается со слабой интенсивностью под углом $37,65^\circ$ и соответствует соединению SiC . Средний размер кристаллита L и межплоскостное расстояние d , соответствующие этому рефлексу, равны 1,02 нм и 0,955 нм, соответственно.

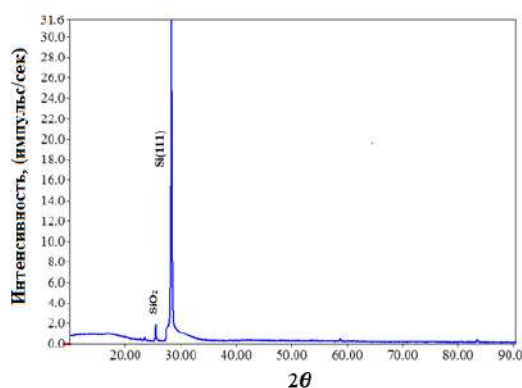


Рис. 1. Рентгенограмма исходного образца n-Si

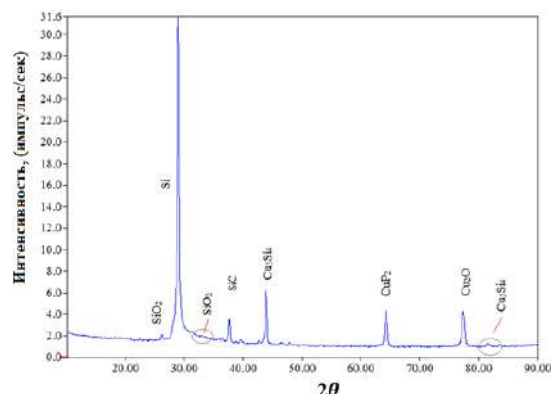


Рис. 2. Рентгенограмма образца, n-Si<Cu> легированного медью

На этой дифрактограмме видны еще несколько пиков, соответствующих связям примесных атомов меди. Например, рефлекс, соответствующий Cu_5Si_4 , отражается под двумя разными углами. Первый из них проявляется с большей интенсивностью чем второй. Он отражается под углом $2\theta = 43,9^\circ$ и для него средний размер кристаллитов L и межплоскостное расстояние d равны к 0,624 нм и 0,824 нм, соответственно. Второй рефлекс, который соответствует соединению Cu_5Si_4 , отражается относительно слабо в интервале углов $80 \div 85^\circ$. Другой рефлекс, отражающийся под углом $2\theta = 64,25^\circ$ соответствует соединению CuP_2 , средний размер кристаллитов которого составляет $L = 0,68$ нм, а межплоскостное расстояние $d = 0,72$ нм. За ним расположен еще один рефлекс, соответствующий соединению Cu_2O . Он отражается под углом $2\theta = 77,38^\circ$ и для него значения L и d равны 0,618 нм и 0,739 нм, соответственно.

Определение фоновой концентрации оптически активных атомов примесей проводилось методом ИК-Фурье спектроскопии, на установке ФСМ 2201. На рис. 3 показан фрагмент ИК спектрограммы изменения оптически активной концентрации кислорода в исходных образцах n-Si и n-Si<Cu>. Расчеты показывают, что концентрация оптически активного кислорода в образцах n-Si<Cu> уменьшается на 49% по сравнению с исходными образцами что связывается с образованием стабильных оксидных соединений, например, SiO_2 , Cu_2O .

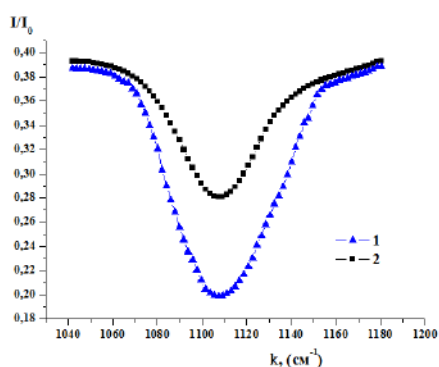


Рис. 3. График зависимости коэффициента пропускания от волнового вектора.

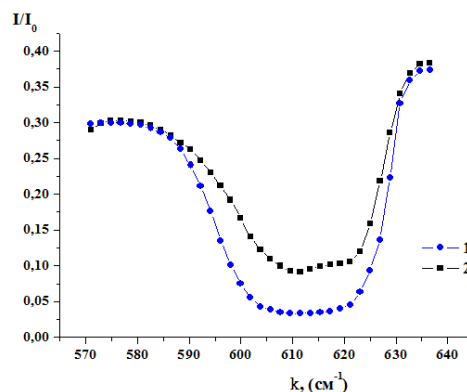


Рис. 4. График зависимости коэффициента пропускания от

1- исходный образец, 2- образец n-Si<Cu>

волнового вектора. 1- исходный образец, 2- образец n-Si<Cu>

Концентрация оптически активного кислорода рассчитывается по формуле:

$$N_O^{\text{опт}} = 3.3 \cdot 10^{17} \cdot \frac{1}{d} \ln \frac{I}{I_0} \quad (3)$$

где: I и I_0 – интенсивности падающего и проходящего света, d – толщина образца.

На рис.4 показан фрагмент ИК спектрограммы изменения концентрации оптически активного углерода в исходном образце и в образцах n-Si<Cu>. Концентрация оптически активного углерода рассчитывается по формуле (4):

$$N_C^{\text{опт}} = 1.1 \cdot 10^{17} \cdot \frac{1}{d} \ln \frac{I}{I_0} \quad (4)$$

где: I и I_0 – интенсивности падающего и проходящего света, d – толщина образца.

Расчеты показывают, что концентрация активного углерода в образцах n-Si<Cu> уменьшается на 28 % по сравнению с исходным образцом.

Таким образом, в методом рентгеноструктурного анализа установлено формирование в объёме образцов n-Si<Cu> нескольких соединений с различным элементным составом, например, таких как диоксид кремния (SiO_2), карбид кремния (SiC), медно-силицидные соединения (Cu_5Si_4), оксид меди (Cu_2O) и фосфид меди (CuP_2). Присутствие указанных фаз подтверждает протекание сложных химических реакций между легирующими примесями и атомами матрицы, что отражается на структурных и электрофизических свойствах материала. Также из полученных результатов спектроскопических экспериментов видно, что наблюдается значительное уменьшение концентрации оптически активного кислорода и углерода в образцах n-Si<Cu>, по сравнению с исходным образцом. Это связано с формированием в объёме кристалла ряда вторичных фаз, таких как SiO_2 , SiC и CuO_2 , наличие которых подтверждено данными рентгеноструктурного анализа.

Также изучались структурное строение, химический состав примесных скоплений атомов в образцах n-Si<Ni> и n-Si<Cu> с помощью сканирующего электронного микроскопа марки JSM-IT200.

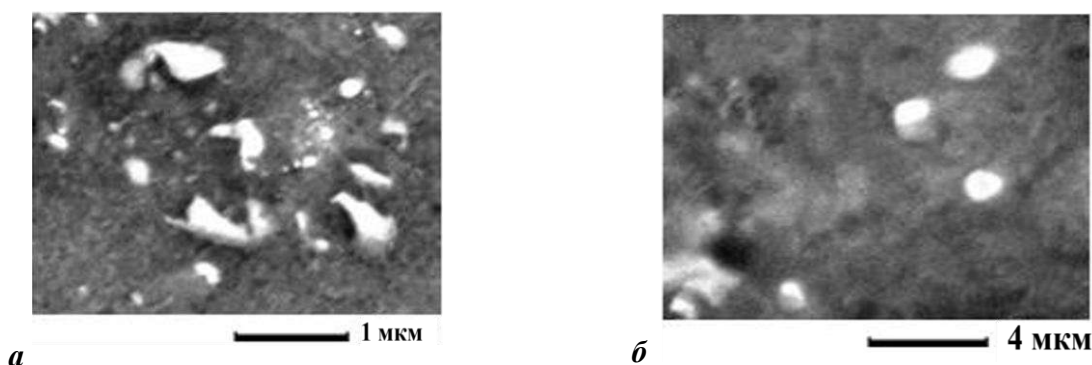


Рис. 5. Примесные скопления никеля в кремнии:

а – в быстро охлаждаемых ($v_{\text{охл}} = 200$ °C/сек) образцах; б – в медленно охлаждаемых ($v_{\text{охл}} = 1$ °C/сек) образцах

Результаты экспериментальных исследований показали, что в объеме образцов Si<Ni> наблюдаются примесные скопления различных форм и размеров в зависимости от скорости последиффузионного охлаждения (рис. 5). При больших значениях скорости охлаждения ($v_{\text{охл}} = 200$ °C/сек), в основном, образуются преципитаты с относительно мелкими размерами ($d < 10^{-6}$ м), имеющие иглообразную, дискообразную, линзообразную и сферическую форму (рис. 5 а). В объеме образцов, полученных с медленным охлаждением ($v_{\text{охл}} = 1$ °C/сек) наблюдаются примесные преципитаты с размерами, достигающими до нескольких микрометров, основная часть которых имеет сферическую форму (рис. 5 б).

На рис. 6. представлены результаты определения химического состава линзообразного примесного скопления размером ~ 700 нм, образовавшегося в объеме быстро охлажденного образца n-Si<Ni> после диффузии.

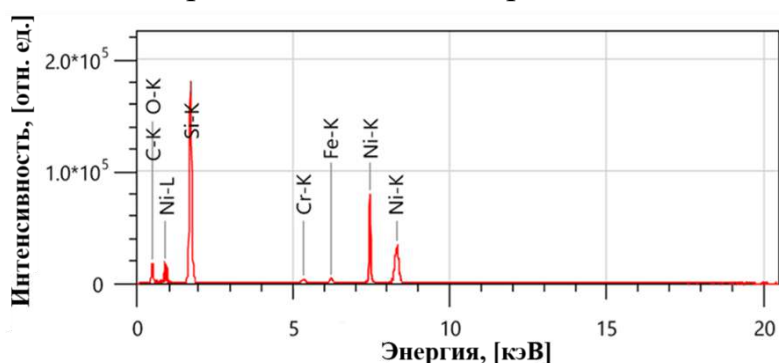


Рис. 6. Полный спектр элементного состава линзообразного наносоединения размером ~ 700 нм в быстро охлаждаемом образце n-Si<Ni>

Видно, что процентное содержание атомов Ni в объеме нановключений составляет 23,23%, атомов Si – 75,42%, атомов железа – 0,26%, атомов хрома – 0,31%, атомов кислорода – 0,43%, атомов углерода – 0,35%. Эти показатели отличаются по всему объему нановключения незначительно. Результаты анализов химического состава, проведенных в медленно охлаждаемых образцах Si<Ni>, позволяют определить количественные параметры сферических микровключения, размер которых достигает ~ 2 мкм.

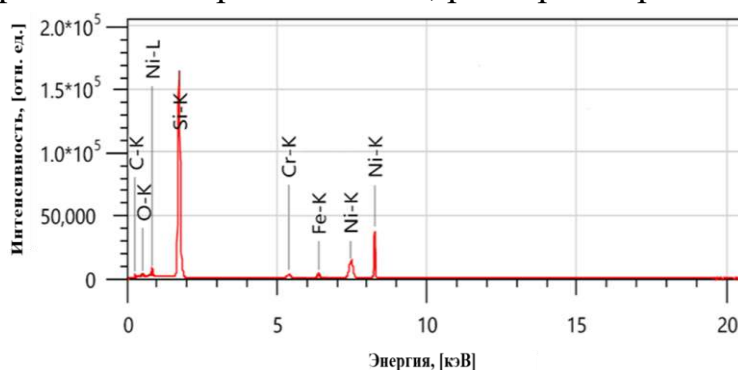


Рис. 7. Полный спектр элементного состава сферических входных микросоединений размером ~ 2 мкм в медленно охлаждаемом образце n-Si<Ni>

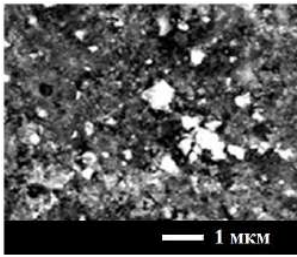


Рис. 8. Примесные скопления меди, в быстро охлажденном образце $n\text{-Si}\langle\text{Cu}\rangle$.

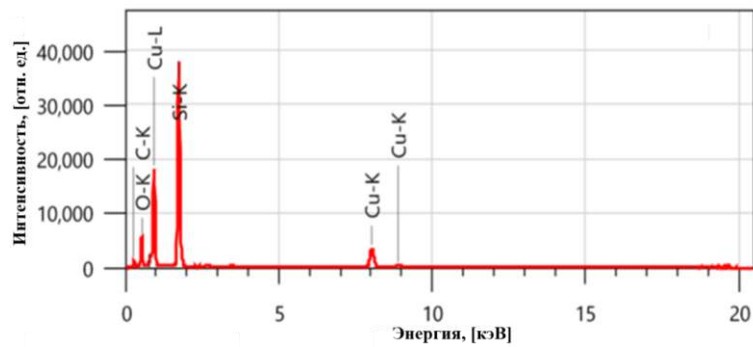


Рис. 9. Полный спектр элементного состава сферических примесных скоплений размером ~ 800 нм в быстро охлажденном образце $n\text{-Si}\langle\text{Cu}\rangle$.

Известно, что наряду с атомами Si и Ni в его объеме присутствуют такие атомы технологического ввода, как железо, хром, кислород и углерод (рис.7). Результаты анализа химического состава этого микровключения показали, что в его центральной части процентное содержание атомов Ni составляет 52,58%, атомов Si – 45,38%, атомов железа – 0,42%, атомов хрома – 0,31%, атомов кислорода – 0,73% и атомов углерода – 0,58%.

В области вблизи поверхности микровключений процентное содержание атомов Ni составляет 24,44%, атомов кремния – 74,14%, атомов железа – 0,31%, атомов хрома – 0,24%, атомов кислорода – 0,55%, атомов углерода – 0,32%. Эти данные свидетельствуют о том, что количество атомов основных и технологических примесей в центральной части и в приповерхностной области данного микровключения имеют разные значения. Эти значения уменьшаются в направлении от центра к поверхности микровключения.

Также с целью определения химического состава образцов кремния, легированного медью, были проведены микроскопические исследования. Результаты исследования показали, что в быстро охлаждённых образцах $n\text{-Si}\langle\text{Cu}\rangle$ наблюдаются примесные скопления различных форм и размеров. Размеры этих скоплений достигают до ~ 800 нм (рис. 8).

На рис. 9. представлены химический состав сферообразного примесного скопления размером ~ 800 нм, образовавшегося в объеме быстро охлажденного образца $n\text{-Si}\langle\text{Cu}\rangle$ после диффузии. Как видно, процентное содержание атомов Cu в объеме нановключений составляет 29,53%, атомов Si – 69,76%, атомов кислорода – 0,39%, атомов углерода – 0,32%. Эти показатели существенно не отличаются по всему объему данного нановключения.

Для определения структурного строения и оптических свойств примесных скоплений, образующихся в монокристаллическом кремнии, легированном одновременно атомами никеля и меди, были проведены следующие эксперименты. На поверхности химически и механически обработанных образцов кремния осаждались атомы Ni и Cu, относящиеся к элементам 3d-металлов, путем вакуумного напыления на устройстве ВУП-4 при вакууме 10^{-4} Торр. При этом на одну сторону кремниевого образца были нанесены атомы никеля толщиной 0,4 мкм, а на другую сторону атомы меди

толщиной $0,4 \div 0,5$ мкм. Одновременная диффузия атомов никеля и медью в кремнии проводилась в горизонтальной печи СУОЛ-4 при температуре $t = 1200$ °С в течение 5 часов. Температуру диффузии контролировали с помощью платина-платинародиевой термопары. После процесса диффузии образцы охлаждались с двумя скоростями. Быстрое охлаждение проводилось со скоростью $v_{\text{охл}} > 200$ °С/сек, а медленное со скоростью $v_{\text{охл}} > 0,05$ °С/сек.

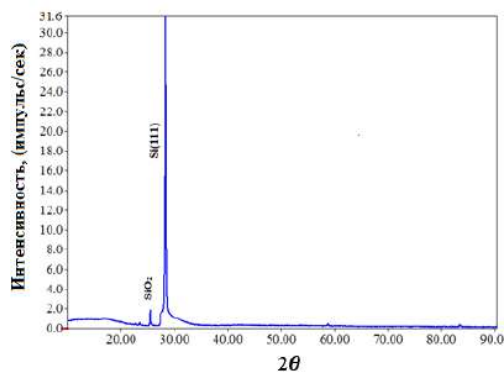


Рис. 10. Дифрактограмма образца n-Si.

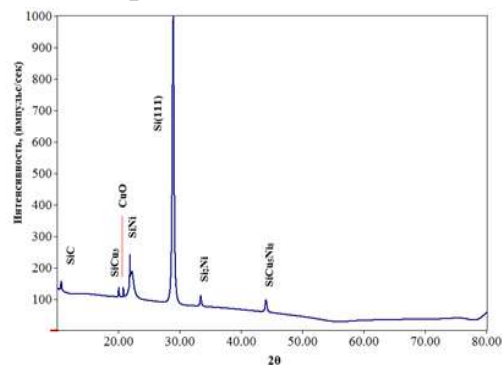


Рис. 11. Дифрактограмма образца n-Si<Ni, Cu>.

Для выяснения структурных характеристик сформированных соединений примесных атомов в монокристаллах кремния были исследованы структурные фрагменты исходных образцов и образцов n-Si<Ni,Cu> методом рентгеноструктурного анализа. Результаты исследований приведены на рис. 10 и 11. Рентгеноструктурный анализ выявил существенные изменения в кристаллической структуре образцов n-Si<Cu,Ni> по сравнению с исходным монокристаллическим кремнием. Наиболее интенсивный рефлекс на рентгенограмме соответствует Si с кристаллографической ориентацией (111). В этом рефлексе значения межплоскостного расстояния составляет $d = 1,84$ нм и средний размер кристаллитов $L = 0,474$ нм, что сравнимо со значениями, соответствующими в исходном образце – где L был почти в 6 раз больше, а значение d – в 3 раза меньше. Эти изменения интерпретируются как следствие деформации кристаллической решётки под действием внедрённых атомов примесей, таких как Cu и Ni. Их проникновение вызывает искажения межатомных расстояний, что отражается на параметрах дифракционных рефлексов.

Рефлекс, наблюдаемый под углом $2\theta = 10,77^\circ$ идентифицирован как принадлежащий соединению SiC, что указывает на взаимодействие кремния с примесным углеродом в процессе термообработки.

Следующий характерный рефлекс, наблюдаемый под углом $2\theta = 20,88^\circ$, соответствует окислу меди (CuO). Расчёты показали, что этому рефлексу соответствуют параметры $L = 2,805$ нм и $d = 1,27$ нм, соответственно, что подтверждает наличие в образце вторичной фазы меди, образованной в процессе диффузии. В частности, особый интерес представляет рефлекс под углом $2\theta = 44,12^\circ$, который в рентгенограммах других образцов отсутствует и был идентифицирован как принадлежащий трёхкомпонентному соединению SiCu_5Ni_8 .

На рис. 12 показан фрагмент ИК-Фурье спектрограммы изменения концентрации оптически активного кислорода в исходном образце и в образцах $n\text{-Si}\langle\text{Ni,Cu}\rangle$. Расчеты показывают, что концентрация оптически активного кислорода в образцов $n\text{-Si}\langle\text{Ni,Cu}\rangle$ уменьшается на 30%. Это означает, что в процессе высокотемпературного диффузионного отжига атомы кислорода создают связь с примесными атомами, образуя оксид металла. Из-за этого концентрация оптически активного кислорода в легированных образцах заметно уменьшается.

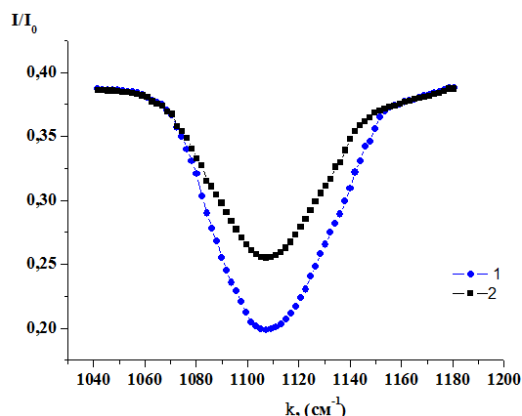


Рис. 12. График зависимости коэффициента пропускания от волнового вектора:
1-исходный образец, 2- образец $n\text{-Si}\langle\text{Ni,Cu}\rangle$.

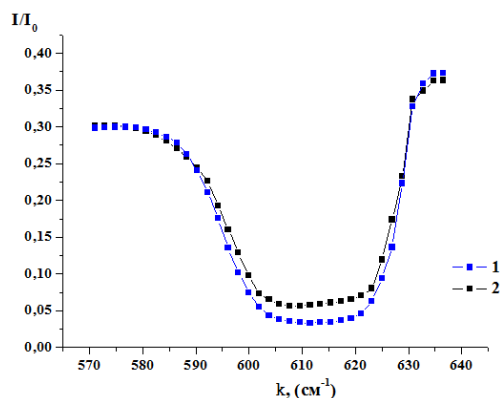


Рис.13. График зависимости коэффициента пропускания от волнового вектора:
1-исходный образец, 2- образец $n\text{-Si}\langle\text{Ni,Cu}\rangle$.

На рис. 13 показан фрагмент ИК-Фурье спектрограммы изменения концентрации оптически активного углерода в исходном образце и в $n\text{-Si}\langle\text{Ni,Cu}\rangle$ образцах. Расчеты показывают, что концентрация оптически активного углерода в образцах $n\text{-Si}\langle\text{Ni,Cu}\rangle$ уменьшает почти на 20%. Воздействие легирующих примесей, сопровождаемое высокотемпературной обработкой, приводит к перераспределению углерода в решётке и способствует его переходу в оптически неактивные состояния, что проявляется в ослаблении соответствующих полос поглощения на ИК-Фурье спектре. Таким образом, полученные результаты по определению концентрации оптически активных фоновых примесей в исходных образцах $n\text{-Si}$ и в образцах $n\text{-Si}\langle\text{Ni,Cu}\rangle$ показали, что при высокотемпературном диффузионном легировании кремния одновременно никелем и медью, концентрация оптически активного кислорода и углерода в объеме образцов существенно уменьшается.

В четвертой главе, озаглавленной «Влияние внешних факторов на свойства образцов $\text{Si}\langle\text{Cu,Ni}\rangle$ », представлены результаты исследования влияния температуры и радиации на электрофизические свойства образцов $\text{Si}\langle\text{Cu,Ni}\rangle$.

На рис. 14. приведены рентгенограммы образца $n\text{-Si}\langle\text{Ni,Cu}\rangle$ до и после термического отжига при $t = 1200^\circ\text{C}$. На рентгенограмме образца $n\text{-Si}\langle\text{Ni,Cu}\rangle$ после термического отжига наблюдалось образование новых рефлексов,

свойственных различным соединениям, и исчезновение некоторых существующих рефлексов.

На рентгенограмме образца $n\text{-Si}\langle\text{Ni,Cu}\rangle$ до отжига наблюдались рефлексы, соответствующие соединениям SiC , SiCu_3 , CuO и SiNi в интервале углов $0^\circ\div 25^\circ$ (рис. 14 а), тогда как, после отжига эти пики на рентгенограмме не наблюдались. В этом же интервале на рентгенограмме проявляется аморфная зона, в которой отсутствует упорядоченная структура, характерная для кристаллического кремния.

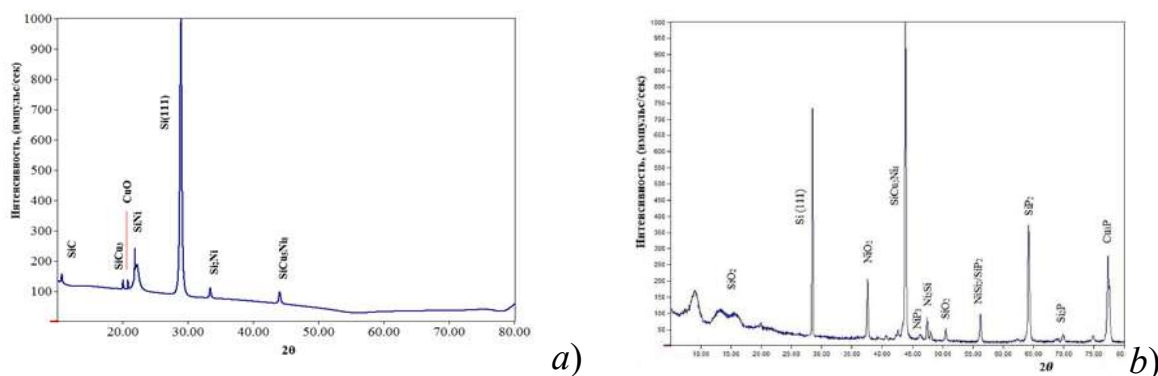


Рис. 14. Рентгенограммы образца $n\text{-Si}\langle\text{Ni,Cu}\rangle$ до (а) и после (б) термической обработки при $t = 1200^\circ\text{C}$.

Такие зоны могут возникать и в результате изменения температуры и других факторов, влияющих на структуру кристалла, что приводит к переходу части его в аморфное состояние. При этом интенсивность рефлекса, соответствующего Si , уменьшилась после отжига и наблюдались смещения этого рефлекса в сторону меньших значений углов (рис. 14 б). До отжига в интервале углов $30^\circ\div 50^\circ$ наблюдались два рефлекса, соответствующие соединениям SiO_2 и SiCu_5Ni_8 , а после отжига в этом же интервале углов появились несколько новые рефлексы, соответствующие соединениям NiO_2 , SiO_2 , NiP_3 , Ni_2Si и изменились интенсивности существующих рефлексов. До отжига на рентгенограмме в интервале углов $50^\circ\div 80^\circ$ никакие рефлексы не наблюдались, а после отжига в этом же интервале углов наблюдались несколько разные структурные линии, соответствующие соединениям SiO_2 , NiSi_2 , SiP_2 , Si_2P , CuO и Cu_3P .

С целью определения изменения концентраций оптически активных атомов кислорода и углерода после термической обработки образцов $n\text{-Si}\langle\text{Ni,Cu}\rangle$, был проведен ряд оптических измерений. На рис. 15 представлены фрагменты ИК-Фурье спектров, отражающие изменения концентрации оптически активного кислорода (рис. 15 а) и углерода (рис. 15 б) в образцах $n\text{-Si}\langle\text{Ni,Cu}\rangle$, после термической обработки при температуре $t = 1200^\circ\text{C}$ в течение $\tau = 10$ мин, в сравнении с контрольными образцами.

На рис. 15 а показан фрагмент ИК-Фурье спектров, отражающих изменения концентрации оптически активного кислорода. Концентрация оптически активного кислорода рассчитывается по формуле (3). Расчеты показывают, что концентрация оптически активного кислорода в образцах $n\text{-Si}\langle\text{Ni,Cu}\rangle$ после термической обработки при 1200°C увеличивается в 1,25 раз,

по сравнению с контрольным образцом (рис.15 а). Это связано с тем, что при высокой температуре (1200 °С) присутствии атомов Ni и Cu, происходит активная диффузия кислорода из объёма кристалла в приповерхностные области, а также его перераспределение за счёт распада кислородсодержащих комплексов (например, SiO_x , металлооксидных преципитатов).

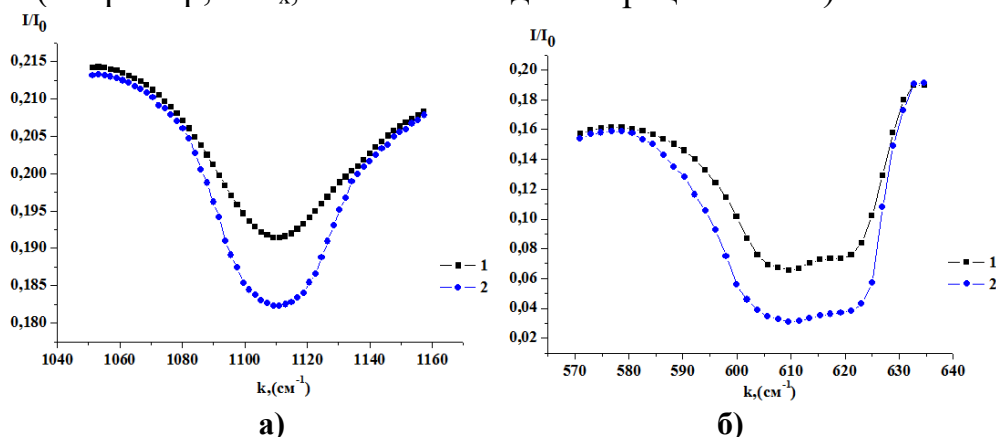


Рис. 15. График зависимости коэффициента оптического пропускания от волнового вектора. 1- контрольный образец, 2- образец $n\text{-Si}\langle\text{Ni,Cu}\rangle$.

На рис. 15 б представлена спектрограмма изменения концентрации оптически активного углерода в кремнии. Концентрация оптически активного углерода рассчитывается формулой (4). Расчеты показывают, что концентрация оптически активного углерода в образцах $n\text{-Si}\langle\text{Ni,Cu}\rangle$ увеличивается в 1,81 раз после термической обработки, по сравнению с контрольным образцом. Это обусловлено тем, что при высокой температуре углерод, ранее связанный в комплексах (Cu-C и Ni-C), высвобождается в виде межузельных атомов C_i . Повышенная подвижность углерода при 1200 °С, а также распад карбидных фаз (SiC , Cu_xC_y) приводит к увеличению доли оптически активных центров. Также для изучения влияния температурного отжига на морфологические свойства примесных скоплений, образующихся в образце $n\text{-Si}\langle\text{Ni,Cu}\rangle$, был проведен микроструктурный анализ, с помощью сканирующего электронного микроскопа СЭМ. Из рис.16 видно, что при высокотемпературном диффузионном легировании на поверхности образцов образуются примесные скопления с разными размерами и формами (рис. 16 а). Результаты показывают, что после термической обработки при температуре 1000 °С в течение 15 минут, плотность примесных скоплений, присутствующих в образце, снижается, в то время как, примесные скопления меньшего размера частично распадаются (рис. 16 б).

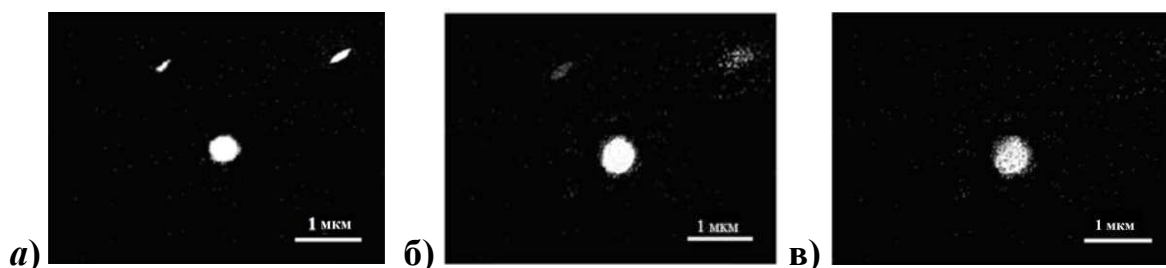


Рис. 16. Примесные скопления в образцах $n\text{-Si}\langle\text{Ni,Cu}\rangle$ до (а) и после термической обработки при $t = 1000$ °С (б) и $t = 1200$ °С (в)

Повышение температуры термической обработки до 1200 °С привело к еще большему снижению плотности крупных примесных скоплений и полному распаду примесные скопления меньшего размера (рис. 16 в).

С целью изучения влияния термического отжига на электрофизические параметры образцов, были измерены их удельные сопротивления до и после температурного воздействия. Для чего подготовленные образцы подвергались термической обработке при температурах $t = 1000$ °С в течение 15 минут и $t = 1200$ °С в течение 10 минут. После термической обработки при температуре 1000 °С наблюдалось резкое увеличение удельного сопротивления образцов n-Si<Ni,Cu> на 27% по сравнению с состоянием до термической обработки. После еще 10 мин отжига этого образца при температуре 1200 °С наблюдалось резкое снижение удельного сопротивления на 15 %.

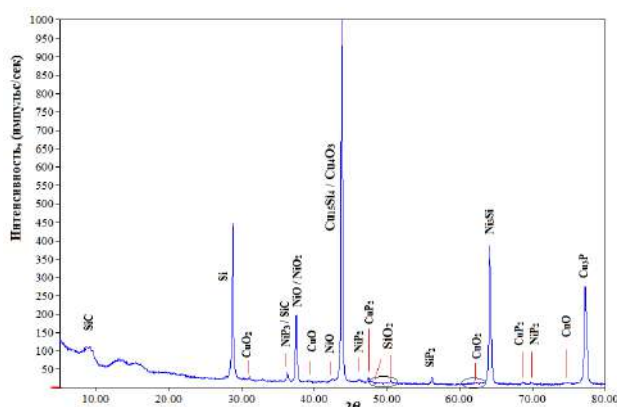


Рис. 17. Рентгенограмма образца n-Si<Ni,Cu> после облучения дозой $1 \cdot 10^7$ рад.

На рисунке 17 показана рентгенограмма образца n-Si<Ni,Cu>, облученного дозой 10^7 рад. В рентгенограмме видны рефлексы, относящиеся к новым примесным соединениям NiP_2 и CuP_2 и отражающиеся под углами $2\theta = 46,10$ и $2\theta = 47,44$. На рентгенограмме наблюдается еще один рефлекс, относящийся к новому соединению SiO_2 и отражающийся под двумя углами $2\theta = 48,03$ и $2\theta = 50,37$.

Таким образом, из полученных результатов видно, что под воздействием радиации образовывались разные новые соединения, в то же время некоторые соединения, имеющиеся в объеме образца, распадались. Например, после воздействия радиации наблюдалось исчезновение соединений SiCu_3 , CuO , Si_2Ni и SiNi и образование соединений CuO_2 , CuO , NiP_2 , CuP_2 , SiP_2 , Ni_3Si , Cu_3P , Ni_3P , $\text{Cu}_{15}\text{Si}_4$ и Cu_4O_3 .

На рис. 18 приведена рентгенограмма образца n-Si<Ni,Cu>, облученного дозой $5 \cdot 10^7$ рад. Рефлексы, обнаруженные после облучения дозой $1 \cdot 10^7$ рад, распадались после облучения дозой $5 \cdot 10^7$ рад и образовывались новые соединения. По сравнению с рентгенограммой образца, облученного дозой $1 \cdot 10^7$ рад, в образце, облученном дозой $5 \cdot 10^7$ рад, не наблюдались рефлексы новых соединений в интервале углов $2\theta = 0^\circ \div 10^\circ$. На этом рентгеновском снимке рефлексы, ранее наблюдавшиеся и относящиеся к Si, проявились с большей интенсивностью, увеличение которых составляло в 6-7 раз.

С целью исследования влияния гамма-излучения на образцы как внешнего фактора, подготовленные образцы облучались гамма-лучами в различных дозах. При экспериментах были выбраны три дозы, как оптимальные: 10^7 рад, $5 \cdot 10^7$ рад и 10^8 рад. До и после облучения образцы изучались методом рентгеноструктурного анализа, результаты которых представлены на рисунках ниже.

Это свидетельствует об увеличении количества Si в кристалле.

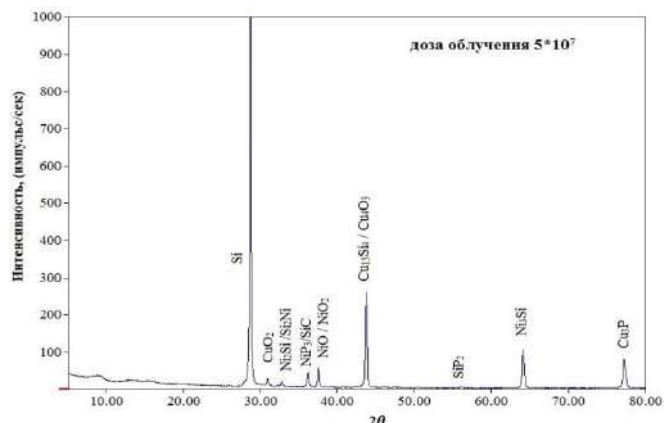


Рис. 18. Рентгенограмма образца $n\text{-Si}\langle\text{Ni,Cu}\rangle$ после облучения дозой $5 \cdot 10^7$ рад

Наблюдалось смещение угла наблюдения для этого рефлексе в сторону малых значений на $0,0958^\circ$. На рентгенограмме образца, облученного дозой $5 \cdot 10^7$ рад, наблюдалось увеличение интенсивности рефлекса CuO_2 в 2,5 раза, по сравнению с тем же рефлексом на рентгенограмме, полученной после облучения дозой $1 \cdot 10^7$ рад, а также смещение угла наблюдения в сторону меньших значений на $0,11^\circ$. На данной

рентгенограмме также наблюдается рефлекс нового соединения $\text{Ni}_2\text{Si}/\text{Si}_2\text{Ni}$, отсутствовавшего на прежней рентгенограмме.

Рентгенограмма, представленная на рис. 18, показывает увеличение интенсивности рефлекса, наблюдаемого под углом $2\theta = 36,23^\circ$ в 3,5 раза, по сравнению с тем же рефлексом на рентгенограмме, представленной на рис. 17. Интенсивность рефлекса, наблюдаемого под углом $2\theta = 37,5^\circ$ на рентгенограмме, показанной на рис. 18, и относящегося соединению NiO_2/NiO , снизилась на 13%, по сравнению с тем же рефлексом на рентгенограмме, показанной на рис. 17. Интенсивность самого высокого рефлекса, наблюдаемого на рентгеновском снимке, снятом после облучения дозой 10^7 рад, уменьшился на 20% по сравнению с рефлексом на рентгеновском снимке, полученном после облучения дозой $5 \cdot 10^7$ рад. В интервале углов $45 \div 50^\circ$ после дозы облучения $5 \cdot 10^7$ рад, никакие рефлексы не наблюдались. Рефлексы, относящиеся к соединениям NiP_2 , CuP_2 и SiO_2 , наблюдались в этом угловом интервале после облучения дозой 10^7 рад. Это может указывать на то, что эти соединения распадаются при воздействии высоких доз радиации. Интенсивности рефлексов SiP_2 , Ni_3Si и Cu_3P , наблюдаемых на рентгенограмме, после облучения дозой 10^7 рад, уменьшились на 6%, 17% и 11%, соответственно, по сравнению с рентгенограммой, полученной после облучения дозой $5 \cdot 10^7$ рад. После облучения дозой $5 \cdot 10^7$ рад, в интервале углов $65 \div 77^\circ$ никакие рефлексы не наблюдались. Однако в этом интервале углов после облучения дозами 10^7 рад наблюдались несколько рефлексов, относящихся к соединениям CuP_2 , NiP_2 и CuO .

На рис. 19 представлена рентгенограмма образцов $n\text{-Si}\langle\text{Ni,Cu}\rangle$, облученных дозой 10^8 рад. Как видно из рис. 19, после облучения дозой 10^8 рад никакие новые соединения не образовывались по сравнению с рентгенограммой, показанной на рис. 18, наблюдались только изменения интенсивностей существующих рефлексов.

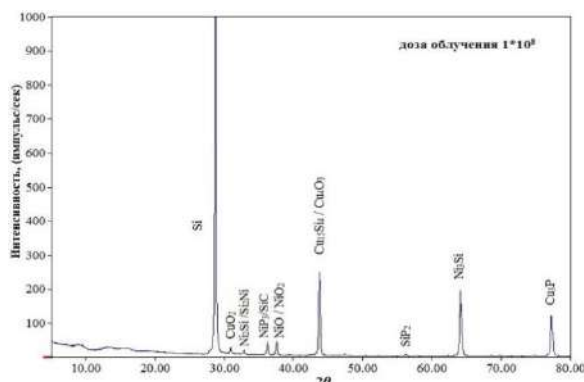


Рис. 19. Рентгенограмма образца $n\text{-Si}\langle\text{Ni,Cu}\rangle$ после облучения дозой $1 \cdot 10^8$ рад.

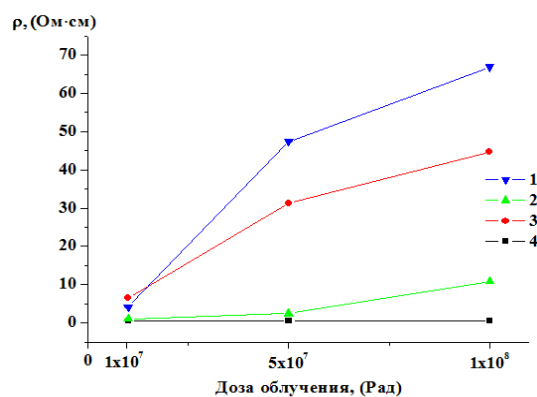


Рис. 20. Зависимость удельного сопротивления от дозы облучения в образцах: 1- $n\text{-Si}$, 2- $n\text{-Si}\langle\text{Cu}\rangle$, 3- $n\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$ и 4- $n\text{-Si}\langle\text{Ni,Cu}\rangle$.

Удельные сопротивления образцов, легированных никелем и медью одновременно, а также легированных отдельно, были измерены до и после облучения четырехзондовым методом. Результаты которых представлены на рис. 20. При всех дозах облучения практически не наблюдалось изменения значения удельного сопротивления (ρ) образца $\text{Si}\langle\text{Ni,Cu}\rangle$ (рис. 20, кривая 4).

По сравнению с необлученным образцом, удельное сопротивление (ρ) образца $\text{Si}\langle\text{Ni}\rangle$, облученного дозой 10^7 рад увеличивается в 11,86 раз. При последующем увеличении дозы облучения значение удельного сопротивления увеличивается в 57 раз, по сравнению с необлученным образцом. При увеличении дозы облучения до 10^8 рад удельное сопротивление увеличивается в 82 раза, по сравнению с необлученным образцом (рис. 20, кривая 3).

После облучения образца $n\text{-Si}\langle\text{Cu}\rangle$ удельное сопротивление его увеличивается значительно. При начальной дозе облучения удельное сопротивление в облученном образце $n\text{-Si}\langle\text{Cu}\rangle$ увеличивается почти в 3 раза, по сравнению с необлученным образцом. При увеличении дозы облучения до $5 \cdot 10^7$ рад, наблюдается увеличение удельного сопротивления этого образца в 4 раза (рис. 20, кривая 2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлено, что в процессе одновременного диффузионного легирования кремния, примесными атомами никеля и меди при температуре $t = 1200^\circ\text{C}$, в объеме образцов образуются скопления примесных атомов, обладающие различными геометрическими формами, размеры которых варьируются от нескольких 10 нм до 3 мкм.

2. Установлено, что при высокотемпературном ($t=1200^\circ\text{C}$) одновременном диффузионном легировании кремния, примесными никеля и меди, концентрация оптически активного кислорода в объеме образцов уменьшается на $\sim 30\%$, а оптически активного углерода уменьшается на $\sim 20\%$ по сравнению с исходными образцами, что связано с образованием различных соединений с участием примесных атомов кислорода и углерода.

3. Установлено, что под воздействием γ -облучения в диапазоне доз $10^7 \div 10^8$ рад в объёме образцов кремния, одновременно легированного никелем и медью, наблюдается распад примесных соединений SiCu_3 , CuO , Si_2Ni , SiNi и образование новых соединений, с участием примесных атомов кислорода, никеля и меди такие как Cu_4O_3 , Ni_3Si , $\text{Cu}_{15}\text{Si}_4$.

4. Выявлено, что под воздействием γ -облучения дозой 10^8 рад значение удельного сопротивления образцов $\text{n-Si}\langle\text{Ni}\rangle$ и $\text{n-Si}\langle\text{Cu}\rangle$ возрастает на 82 и 18 раза соответственно. В отличие от них, при такой же значении дозы облучения, в образцах $\text{n-Si}\langle\text{Ni,Cu}\rangle$ значение удельного сопротивления увеличивается $\sim 1,5$ раза, которое показывает, что эти образцы являются устойчивыми к воздействию радиации.

5. Впервые установлено, что под воздействием термического отжига при температуре $t = 1000^\circ\text{C}$ в течение 15 минут, а при температуре $t=1200^\circ\text{C}$ в течение 10 минут, в объёме образцов Si , одновременно легированного Ni и Cu происходит распад примесных наноскоплений, которые приводят к увеличению удельного сопротивления образцов почти на ~ 2 порядка.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.03/2025.27.12.FM/T.01.06 ON THE
AWARDING ACADEMIC DEGREES AT THE RESEARCH INSTITUTE
OF SEMICONDUCTOR PHYSICS AND MICROELECTRONICS OF THE
NATIONAL UNIVERSITY OF UZBEKISTAN**

**RESEARCH INSTITUTE OF SEMICONDUCTOR PHYSICS AND
MICROELECTRONICS AT THE NATIONAL UNIVERSITY OF
UZBEKISTAN**

TURMANOVA RAYMASH MAXMUTOVNA

**INFLUENCE OF IMPURITY CLUSTERS OF 3d-TRANSITION METAL
ATOMS ON THE ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF SILICON**

01.04.10 - Physics of semiconductors

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

Tashkent – 2026

The topic of the dissertation of the Doctor of Philosophy (PhD) on Physical and Mathematical sciences has been registered with the Higher Attestation Commission at the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan under registration number B2021.1.PhD/FM584.

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 and on the website of "ZiyoNet" Information and Educational Portal at www.ziynet.uz.

Scientific supervisor:

Turgunov Nozimjon Abdumannopovich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor

Official opponents:

Ayupov Kutub Sautovich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor

Boboyev Akramjon Yuldashboyevich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, associate professor

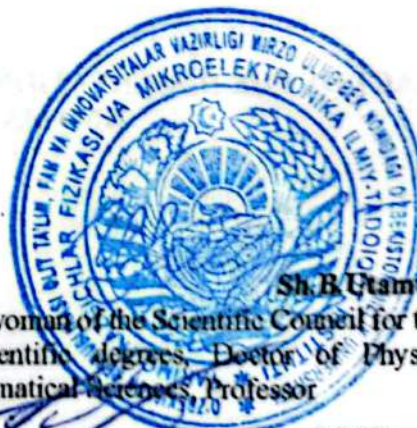
Leading organization:

Namangan State University

The defense of the doctoral dissertation will be held on "17" 09 2026, at 14⁰⁰ at the meeting of the Scientific Council No. DSc.03/2025.27.12.FM/T.01.06 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)

The dissertation can be viewed at the Institute's Information Resource Center (registered under No. 48). Address: 20 Yangi Olmazor str., 100057 Tashkent city, Uzbekistan. Tel.: (+99871) 248-79-59, e-mail: info@ispm.uz.

The abstract of the dissertation was distributed on "03" 09 2026.
(Registry record No. 48 dated "03" 09 2026)



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 Senior Research Fellow

O. X. Kuldashov,
Chairman of the Scientific Seminar at the Scientific Council for the Awarding of Academic Degrees, Doctor of technical sciences, professor.

INTRODUCTION (abstract of the PhD dissertation)

The aim of the study is to investigate the influence of nickel and copper impurity accumulations on the electrophysical properties of silicon, as well as the processes of formation and dissolution of these impurity accumulations under the influence of external factors (temperature, γ -irradiation).

The object of the research is single-crystal silicon samples obtained by separate (n-Si<Ni> and n-Si<Cu>) and combined (n-Si<Ni,Cu>) diffusion.

The scientific novelty of the research consists of the following:

it has been established that during the simultaneous high-temperature ($T=1473$ K) diffusion doping of silicon with Ni and Cu, accumulations of impurity atoms of various geometrical shapes are formed in the sample volume, with sizes ranging from 10nm to 3 μ m;

it has been found that, under high-temperature ($t=1200$ °C) conditions during diffusion doping of silicon with nickel and copper, the concentration of optically active oxygen in the sample volume degrades by $\sim 30\%$, that of carbon by $\sim 20\%$;

it has been found that in the volume of n-Si<Ni,Cu> samples, under the influence of γ -radiation, impurity compounds SiCu_3 , CuO , Si_2Ni , SiNi decompose and form new compounds with the participation of impurity oxygen, nickel, and copper atoms such as Cu_4O_3 , Ni_3Si , $\text{Cu}_{15}\text{Si}_4$;

for the first time, it was established that under the influence of thermal annealing at a temperature of $t = 1000$ °C for 15 minutes, and at a temperature of $t = 1200$ °C for 10 minutes, impurity nanoscoptes decompose in the volume of Si samples doped with Ni and Cu simultaneously;

it was established that under the influence of γ -irradiation at a dose of 10^8 rad, the specific resistance values of n-Si<Ni>, n-Si<Cu>, and n-Si<Ni,Cu> samples increase by 82, 18 and 1,5 times respectively, indicating that silicon samples doped with Ni and Cu simultaneously are radiation-resistant

Implementation of research results.

Based on the scientific results obtained on the control of the electrophysical properties of single-crystal silicon containing impurity accumulations of 3d metal atoms using external influences:

certain formations of impurity atom accumulation with simultaneous diffusion doping of silicon with <Ni,Cu> <Ni,Fe> impurities at a temperature of $t=1200$ °C in the volume of samples that have different geometric shapes and sizes ranging from 10 nm to 3 μ m, and also in their chemical composition, in addition to the atoms of the silicon matrix element and the main doping nickel, there are also atoms of technological impurities such as oxygen and carbon with a percentage of atoms of 0,01-0,001%; in the temperature range of $-153 \div 47$ °C, the concentration of charge carriers in n-Si<Cu> samples increases almost 8 times, and the mobility of charge carriers decreases by more than one order of magnitude were used in the course of the project 1.3.1 “Defect-impurity engineering of radiation-induced centers in silicon instrument structures” of the subprogram “Condensed matter physics and the creation of new functional materials and technologies for their production” in the Scientific and Practical Center for Materials Science of the Academy of Sciences of Belarus (Reference dated November 12, 2024 of the Scientific and Practical Center

for Materials Science of the Academy of Sciences of Belarus). The use of scientific results made it possible to expand the functionality of diodes and MDS structures obtained on the basis of silicon doped with impurity nickel and copper atoms;

the identified dependencies of the structural arrangements of nickel and iron impurity atom clusters in silicon on the diffusion temperature and cooling rate of samples after diffusion: at diffusion temperatures $t \geq 1000$ °C in rapidly cooled (≥ 200 °C/sec) samples, the formation of impurity nanoinclusions with sizes up to several hundred nanometers and various geometric shapes is observed. It has been established that under the influence of thermal annealing at $t = 1000$ °C for 20 minutes, impurity accumulations with a size of up to 400 nm undergo decomposition. The scientific results obtained were applied by the joint-stock company FOTON in the manufacture of silicon-based semiconductor electronic devices (Reference No. 04-3/1124 dated July 11, 2024, AK Uzelteksanoat). The use of scientific results made it possible to control the electrophysical parameters of experimental samples of silicon doped with nickel and copper under the influence of thermal annealing.

The structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, conclusion, list of references and applications. The text of the dissertation consists of 123 pages, including 35 figures and 7 tables.

E'LON QILINGAN ISHLAR RO'YXATI
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I bo'lim (I часть; part I)

1A. Turgunov N.A., Berkinov E.Kh., Turmanova R.M. The effect of thermal annealing on the electrophysical properties of Samples n-Si<Ni,Cu> // East European Journal of Physics. 2023, 3. pp.287-290.
DOI: <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2023-3-26> (01.00.00; №3, Scopus).

2A. Тургунов Н.А., Турманова Р.М., Хайтимметов Н.Б. Структурное строение примесных скоплений в кремнии, легированном Ni, Fe и Cu// Физика полупроводников и микроэлектроника. 2023, т.5, вып.3-4, с. 28-33.
https://journal.ispm.uz/issues/vol5/issue_6.html (01.00.00; №16).

3A. Turgunov N.A., Berkinov E. Kh., Turmanova R.M., Haytimmetov N.B., Madaliyeva L.E. Influence of impurity Ni atoms on the electrophysical parameters of Si // Eurasian Journal of Physics, Chemistry and Mathematics. June 2023, vol.19, pp.126-130.
<https://geniusjournals.org/index.php/ejpcm/article/view/4606> (01.00.00; №2, JIF: 7.825).

4A. Turgunov N.A., Berkinov E. Kh., Turmanova R.M. Influence of impurity Ni and Cu atoms on the electrophysical properties of Si // American Journal Of Applied Science And Technology. March 2023, vol.3, iss.3, pp.53-57.
<https://doi.org/10.37547/ajast/Volume03Issue03-10>, (01.00.00; №2, JIF: 7.063).

I bo'lim (I часть; part I)

5A. Turgunov N.A., Berkinov E.Kh., Turmanova R.M. Accumulations of impurity Ni atoms and their effect on the electrophysical properties of Si // E3S Web of Conferences. 2023, 402, 14018, pp.1-8.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340214018>, (01.00.00; №3, Scopus).

6A. Тургунов Н.А., Беркинов Э.Х., Турманова Р.М., Мадалиева Л.Э. Изучение электрофизических свойств образцов p-Si<Cu> // X Международная научная конференция «Actual problems of solid state physics». 22-26-мая 2023г. Минск, с.417.

7A. Turgunov N.A., Turmanova R.M., Khaytimmetov N.B. Electrophysical properties of silicon doped with iron and nickel // Международная научная конференция на тему “Тенденции развития физики конденсированных сред”. Фергана-2023. стр. 94-95.

8A. Turgunov N.A., Turmanova R.M., Khaytimmetov N.B., Kosimov I.O. The study of structural properties of n-Si<Ni,Cu> samples // International Workshop “Functional materials for energy applications” (FUNMAT-2). 28 June 2024, Urgench, pp.50-51.

9A. Тургунов Н.А., Турманова Р.М., Хайтимметов Н.Б. Влияние примесных скоплений на структурные свойства кремния, легированного никелем и медью // Международная научно-практическая конференция “Физика полупроводников, фундаментальные и практические проблемы

современной электроники и энергетики”. 18-19 сентября, 2024г., Наманган, с.46-48.

10А. Тургунов Н.А., Турманова Р.М., Хайтимметов Н.Б. Влияния радиации на структурные свойства образцов $n\text{-Si}\langle\text{Ni,Cu}\rangle$ // III Международная научная конференция «Современные тенденции развития физики полупроводников: достижения, проблемы и перспективы». 26-27 сентября 2024 г., Ташкент, с.87-90.

11А. Тургунов Н.А., Турманова Р.М., Хайтимметов Н.Б. Влияние примесных скоплений на структурные свойства кремния, легированного медью // Республиканский научно-практический семинар: “Развитие и перспективы физики полупроводников”. 23 ноября 2024 г., Андижан, с. 106-107.

12А. Тургунов Н.А., Турманова Р.М., Хайтимметов Н.Б. Влияние термической обработки на электрофизические свойства Si, легированного Ni и Fe // III Международная научная конференция «Современные тенденции развития физики полупроводников: достижения, проблемы и перспективы». Ташкент, 26-27 сентября 2024 г. стр. 45-47

13А. Тургунов Н.А., Турманова Р.М., Хайтимметов Н.Б., Собирова Ш.А. Влияние облучения на структурные свойства образцов $n\text{-Si}\langle\text{Ni,Cu}\rangle$ // Международная научно-практическая конференция “Фундаментальные и практические проблемы современной физики и энергетики” Наманган 2025 г., 5-6 июнь, с.140-143.

14А. Тургунов Н.А., Турманова Р.М., Хайтимметов Н.Б., Аллабергенов М.М. Формирование примесных скоплений в образцах $n\text{-Si}\langle\text{Ni,Cu}\rangle$ под воздействием радиации // Материалы III международной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы физики полупроводников, микро- и нанoeлектроники» Конференция посвящена 70-летию профессора Ш.Б. Утамурадовой Ташкент 2025 г., 20-21 июня, стр.221-223.

15А. Тургунов Н.А., Турманова Р.М. Исследование структурных и оптических свойств образцов $n\text{-Si}\langle\text{Cu,Ni}\rangle$ // Республиканская научно-практическая конференция на тему «Современные проблемы физики полупроводников» с участием ученых из стран СНГ, 7-8 ноября 2025г, стр.121-124.

16А. Тургунов Н.А., Турманова Р.М. Влияние γ – облучения на электрофизические свойства кремния, легированного Ni и Cu // Международная научно-практическая конференция на тему «Применение наноразмерных систем в современной полупроводниковой микроэлектронике и фотовольтаике», Андижан, 19-20 декабря 2025 г, стр.49-51.

17А. Турманова Р.М. Исследование морфологических свойств Si, легированного Ni // Международная научная конференция на тему “Новые перспективные материалы для солнечной энергетики” Ташкент, 24-25-декабря 2025г, стр.56-58.

Avtoreferat “Til va adabiyot ta’limi” – “Преподавание языка и литературы” –
“Language and literature teaching” DM jurnali tahririyatida tahrirdan o‘tkazilib,
o‘zbek, rus va ingliz tillaridagi matnlar o‘zaro muvofiqlashtirildi.
(25.08.2026).

Bichim 60x841/16. Raqamli bosma usuli. Times garniturası.
Shartli bosma tabog‘i: 3,25. Adadi 70. Buyurtma №72.
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.

