

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

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

BERKINOV ELMUROD XOSHIMJONOVICH

**KREMNIY MONOKRISTALLIDA NIKEL KIRISHMA ATOMLARI
MIKRO- VA NANOBIRIKMALARNING STRUKTURAVIY XOSSALARI**

01.04.10 – Yarimo‘tkazgichlar fizikasi

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

Toshkent - 2023

**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**

Berkinov Elmurod Xoshimjonovich

Kremniy monokristallida nikel kirishma atomlari mikro- va nanobirikmalarning strukturaviy xossalari..... 3

Беркинов Элмурод Хошимжонович

Структурные свойства микро- и нановключений примесных атомов никеля в монокристаллах кремния..... 25

Berkinov Elmurod Khoshimjonovich

Structural properties of micro- and nanoinclusions of nickel impurity atoms in silicon single crystals..... 49

E'lon qilingan ishlar ro'yxati

Список опубликованных работ

List of published works..... 53

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

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

BERKINOV ELMUROD XOSHIMJONOVICH

**KREMNIY MONOKRISTALLIDA NIKEL KIRISHMA ATOMLARI
MIKRO- VA NANOBIRIKMALARNING STRUKTURAVIY XOSSALARI**

01.04.10 – Yarimo‘tkazgichlar fizikasi

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

Toshkent - 2023

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahon miqyosida mikroelektronika sohasida turli kirishmalar bilan legirlangan yarimo'tkazgichli materiallardan keng ko'lamda foydalanilmoqda. Zamonaviy mikroelektronikada keng qo'llanilayotgan 3d-metall guruhi elementlari bilan legirlangan kremniy monokristalli hajmida hosil bo'luvchi kirishma nuqsonlarining morfologik xususiyatlari, shuningdek ularning yarimo'tkazgichli kremniy elektrofizik xususiyatlariga ta'siri jadal o'rganilmoqda. Bu borada kremniy monokristalli asosida ishlab chiqarilayotgan yarimo'tkazgichli qurilmalarning turli tashqi ta'sirlarga nisbatan chidamliligini hamda ishlash muddatini oshirishga alohida ahamiyat qaratilmoqda.

Yarimo'tkazgichli diodlar, tranzistorlar, fotoelementlar, integral sxemalar va boshqa qurilmalarni ishlab chiqarishda asosiy materiallardan biri hisoblangan kremniyning hajmida hosil bo'luvchi kirishma nuqsonlari uning elektrofizik parametrlarini boshqarishda o'ziga xos imkoniyatlar yaratadi. Shu sababdan hajmida noyob strukturaviy tuzilishga ega bo'lgan ko'p komponentli kirishma to'plamlari mavjud bo'lgan yarimo'tkazgichli kremniy asosidagi materiallarni olish, shuningdek, ularning morfologik, elektrofizik va fotoelektrik xususiyatlarini o'rganish bo'yicha ilmiy izlanishlar jahon miqyosida olib borilmoqda. Ushbu sohada yarimo'tkazgichli kremniy materialini turli kirishmalar bilan diffuziya usulida legirlashning yangi texnologiyalarni ishlab chiqishga alohida e'tibor qaratilmoqda.

Respublikamizda yarimo'tkazgichli materiallarni turli kirishmalar bilan legirlash orqali ularning xususiyatlarini boshqarish hamda ular asosida yaratilgan asboblarni parametrlarini kompleks o'rganish borasida muayyan natijalarga erishilmoqda. Bu borada kremniy monokristalini 3d-o'tish guruhi metallari bilan yuqori haroratli diffuziya usulida legirlash hamda turli tashqi omillar (harorat, bosim, nurlanish)ga sezgir yarimo'tkazgichli materiallar va ular asosida ko'p qatlamli strukturalar olishga bo'lgan ehtiyoj ortib bormoqda. O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2021-yil 19-martdagi "Fizika sohasidagi ta'lim sifatini oshirish va ilmiy tadqiqotlarni rivojlantirish chora-tadbirlari to'g'risida"gi PQ-5032-son qarorida «... fizika sohasidagi ilmiy tadqiqotlarning ishlab chiqarish bilan uzviy bog'liqligini ta'minlash, iqtisodiyot tarmoqlaridagi muammolar yechimiga qaratilgan ilmiy ishlar ko'lamini kengaytirish; ilmiy tadqiqotlarning va innovatsiya ishlarining natijadorligi va amaliy ahamiyatini oshirish...»¹ vazifalari belgilangan. Mazkur yo'nalishda mikro- va nanoelektronika qurilmalarini ishlab chiqarish uchun zarur elektrofizik, fotoelektrik va optik xususiyatlarga ega bo'lgan yangi yarimo'tkazgichli materiallar-qattiq qorishmalarni yaratish muhim ilmiy ahamiyat kasb etadi.

Ushbu dissertatsiya tadqiqoti O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-son "2022-2026-yillarga mo'ljallangan yangi

¹ O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2021-yil 19-martdagi "Fizika sohasidagi ta'lim sifatini oshirish va ilmiy tadqiqotlarni rivojlantirish chora-tadbirlari to'g'risida"gi PQ-5032-son qarori.

O‘zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to‘g‘risida”gi farmoni, O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2021-yil 2-martdagi PQ-5011-son “Elektrotexnika va elektronika sanoatini yanada rivojlantirish va mahalliy mahsulotlarning raqobatbardoshligini oshirishga doir qo‘shimcha chora-tadbirlar to‘g‘risida”gi, 2021-yil 19-martdagi PQ-5032-son «Ta’lim sifatini oshirish va fizika sohasida ilmiy tadqiqotlarni takomillashtirish chora-tadbirlari to‘g‘risida»gi qarorlari, shuningdek, ushbu sohada qabul qilingan boshqa me’yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga 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. Hozirgi kunga qadar 3d-metall guruhi kirishma elementlari bilan legirlangan, oldindan berilgan kattaliklarga ega bo‘lgan kremniy monokristalini olish hamda uning strukturaviy, elektrofizik, fotoelektrik xususiyatlarini tadqiq qilish muammolari quyidagi ilmiy markazlarda o‘rganilgan: Maks-Plank jamiyati qattiq jismlar kimyoviy fizikasi instituti (Germaniya), Massachuset texnologiya instituti, Berklidagi Kaliforniya universiteti – AQSh davlat tadqiqotlar universiteti (AQSh), Xitoy FANing Shanxay fizika texnika instituti (Xitoy), A.F. Ioffe nomidagi Fizika-texnika instituti, Rossiya FANing A.V.Rjanov nomidagi yarimo‘tkazgichlar fizikasi instituti, Rossiya FANing mikrostrukturalar fizikasi instituti (Rossiya), Ukraina MFANing yarimo‘tkazgichlar fizikasi instituti (Ukraina), O‘zR FANing Fizika-texnika instituti, Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti, Yadro fizikasi instituti (O‘zbekiston).

Germaniyalik olimlar P.Saring va M.Seibtlar tomonidan elektron dastali induktsiyalangan tok mikroskopiyasi (EBIC) usulida kremniy hajmida hosil bo‘luvchi ignasimon nikel nuqsonlarga e’tibor qaratilib, ularning o‘lchamlari bir necha yuzlab mikrometrga yetishi hamda katta o‘lchamli nuqsonlar atrofida maydalari jamlangani aniqlangan. Rossiyalik olimlar G.M.Gusinskiy, S.V.Barishevlar tomonidan nikel bilan legirlangan kremniyda mikroigna va mikrotrubka shakllariga ega bo‘lgan nikel to‘plamlarini hosil qilish metodikasi ishlab chiqilgan.

O‘zbekistonlik taniqli olimlar S.Z.Zaynabidinov, A.T.Mamadalimov, M.K. Baxadirxanov, Sh.B.Utamurodova, X.S.Daliyev va boshqalarning ishlarida 3d-metall guruhi elementlari bilan legirlangan kremniyning xususiyatlariga kirishma atomlari hosil qiluvchi nuqsonlarning ta’siri shuningdek, bunday kirishma nuqsonlari holatiga tashqi omillarning ta’siri batafsil tadqiq etilgan. Biroq hozirgi vaqtga qadar diffuziya usulida nikel bilan legirlangan kremniyda hosil bo‘luvchi kirishma to‘plamlarining strukturaviy tuzilishi, elementli tarkibi va tashqi ta’sirlar ostida parchalanish jarayonlari to‘liq 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 Yarimo'tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti ilmiy-tadqiqot ishlari rejasining OT-F2-11 "d-elementlar kirindilari bilan legirlangan kremniyning sirt qatlamlarida va hajmida nanoo'lchamli nuqsonlarning shakllanish qonuniyatlarini tadqiq etish" (2017-2020 yy.) ilmiy loyihasi doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi nikel bilan legirlangan kremniyda kirishma mikro- va nanobirikmalarning strukturaviy tuzilishi, elementli tarkibi hamda tashqi ta'sirlar (harorat, bosim) ostida parchalanish ketma-ketligini aniqlashdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

kremniydagi nikel kirishma to'plamlarining o'lchamlari, shakllari va strukturaviy tuzilishining diffuziya kattaliklariga bog'liqligini o'rganish;

nikel bilan legirlangan kremniydagi kirishma mikro- va nanobirikmalarining tarkibiy tuzilishini aniqlash;

nikel bilan legirlangan kremniyning elektrofizik xususiyatlariga kirishma mikro- va nanobirikmalarining ta'sirini o'rganish;

kremniyni diffuziya usulida nikel bilan legirlash jarayonida asosiy va texnologik kirishma atomlarining o'zaro ta'sirlashuvini tahlil qilish;

Si<Ni> namunalarida tashqi ta'sirlar (harorat, bosim) ostida kirishma to'plamlarining parchalanish ketma-ketligini o'rganish.

Tadqiqotning ob'ekti sifatida kirishma mikro va nanobirikmalariga ega bo'lgan n- va p-tipdagi Si<Ni> namunalari olingan.

Tadqiqotning predmeti kremniy monokristalidagi kirishma nikel atomlarining mikro- va nanobirikmalari, ularning strukturaviy va tarkibiy tuzilish jihatlari, shuningdek, kirishma to'plamlarini termik tavlash va bosim ta'sirida parchalanish jarayonlaridan iborat.

Tadqiqotning usullari. Qo'yilgan vazifalarni amalga oshirish uchun quyidagi usullar qo'llanilgan: nikel bilan legirlangan kremniy namunalari elektrofizik kattaliklarini o'lchashda zamonaviy Ecopia HMS-7000 Xoll effektini o'lchash qurilmasidan, kremniy monokristalidagi nikel kirishma to'plamlari strukturaviy tuzilishi va elementli tarkibini aniqlashda yuqori aniqlikka ega bo'lgan zamonaviy elektron mikroskopiya usullaridan, xususan Superprobe JXA-8800R (JEOL) elektron-zondli mikroskopi hamda JSM-IT200 skanerlovchi elektron mikroskoplaridan foydalanilgan.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

kremniy monokristalini diffuziya usulida $T \geq 1273$ K haroratlarda $t = 2 \div 4$ soat davomida nikel bilan legirlaganda, uning hajmida kirishma mikro- va nanobirikmalari hosil bo'lishi aniqlangan;

ilk bor kremniyda hosil bo'lgan nikel kirishma to'plamlarining, asosan o'lchamiga bog'liq holda, ya'ni $d < 1$ mkm bo'lganda birqatlamli va $d \geq 1$ mkm bo'lganda ko'pqatlamli strukturaviy tuzilishga ega bo'lishligi aniqlangan;

elektron mikroskopiya usuli yordamida kremniyda hosil bo'lgan nikel kirishma mikro- va nanobirikmalari kimyoviy tarkibining tahlili orqali, ulardagi texnologik kirishmalar (Fe, Cu, Cr va boshqalar) atomlarining miqdori asosiy kirishma atomlarining $0.01 \div 0.001\%$ ulushi miqdorida ekanligi aniqlangan;

termik tavlash harorati $T=1073$ K ni tashkil etganda nikel kirishma nanobirikmalari n-Si<Ni> namunalarida 10 minut davomida, p-Si<Ni> namunalarida esa 15÷20 minut davomida parchalanishi aniqlangan;

$P=6 \cdot 10^8$ Pa qiymatdagi tashqi har tomonlama gidrostatik bosim ta'siri ostida n-Si<Ni> namunalaridagi o'lchami ~700 nm gacha bo'lgan ignasimon, disksimon va linzasimon kirishma nanobirikmalari, bosimning $P=1.2 \cdot 10^9$ Pa qiymatida esa o'lchami ~1 mkm gacha bo'lgan linzasimon va sharsimon shakldagi kirishma nano- va mikrobirikmalari parchalanishi aniqlangan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

nikel bilan legirlangan kremniy monokristalida kirishma mikro- va nanobirikmalarini hosil qilishning optimal texnologik sharoitlari ishlab chiqilgan;

nikel kirishma mikro- va nanobirikmalarini shakllantirish orqali kremniy monokristalini texnologik kirishmalardan tozalash imkoniyatlari aniqlangan;

nikel bilan legirlangan kremniy monokristali elektrofizik xususiyatlarini boshqarish uchun termik tavlash va har tomonlama gidrostatik bosim berishning rejimlari aniqlangan.

Tadqiqot natijalarining ishonchligi nikel bilan legirlangan kremniy monokristalining elektrofizik xususiyatlari, diffuziya vaqtida va undan so'ng turli tashqi omillar ta'sirida ularda yuz beruvchi fizik jarayonlarni tadqiq qilishda umumqabul qilingan standart va keng qo'llaniladigan tadqiqot usullaridan shuningdek, tayyorlangan namunalarning elektrofizik kattaliklarini o'lchashda zamonaviy Ecopia HMS-7000 Xoll effektini o'lchash qurilmasidan, nikel bilan legirlangan kremniy monokristalida hosil bo'lgan kirishma atomlari to'plamlarining morfologik xususiyatlarini o'rganishda elektron-zondli hamda skanerlovchi elektron mikroskoplardan foydalanilganligi bilan asoslangan.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati kremniydagi nikel kirishma to'plamlarining o'lchamlari va shakllari, ularning strukturaviy tuzilishini belgilovchi asosiy omillar ekanligi, ko'pqatlamli tuzilishga ega bo'lgan nikel kirishma to'plamlarining tashqi omillar (harorat, bosim) ta'sirida parchalanish jarayoni ketma-ketligini aniqlashtirish va tahlil qilish bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati nikel kirishma mikro- va nanobirikmalarining strukturaviy tuzilishini, elementli tarkibini aniqlash, kremniy nikel bilan legirlashda diffuziya kattaliklarining kirishma to'plamlari strukturaviy tuzilishiga ta'sirini aniqlash, shuningdek, kirishma mikro- va nanobirikmalariga ega bo'lgan kremniy monokristali hajmini texnologik kirishma atomlaridan tozalashdan iborat.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi.

Nikel atomlari kirishma mikro- va nanobirikmalariga ega bo'lgan kremniy monokristalining elektrofizik xususiyatlarini tashqi ta'sirlar vositasida boshqarish bo'yicha olingan ilmiy natijalar asosida:

nikel bilan legirlangan kremniyda oldindan berilgan o'lchamlar va tarkibiy tuzilmalarga ega bo'lgan kirishma mikro- va nanobirikmalari hosil bo'lishi uchun aniqlangan maqbul texnologik sharoitlardan hamda yuqori haroratlarda ($T \geq 1273$ K)

diffuziya usulida nikel bilan legirlangan kremniy monokristalida hosil bo'luvchi kirishma mikro- va nanobirikmalari tarkibida mavjud bo'lgan texnologik kirishmalar (Fe, Cu, Cr va boshqalar) atomlarining miqdori asosiy kirishma atomlarining 0.01÷0.001% ulushi miqdorida ekanligidan Belorusiya FANing materialshunoslik bo'yicha ilmiy-amaliy markazida 1.3.1 "Kremniyli asboblarning strukturalarida radiatsiyaviy-induksiyalangan markazlarining nuqson-kirishma muhandisligi" mavzusidagi loyihasining "Kondensirlangan holat fizikasi va yangi funksional materiallarni yaratish hamda ularni olish texnologiyalari" kichik dasturini amalga oshirish jarayonida foydalanilgan (Belorusiya FANing materialshunoslik bo'yicha ilmiy-amaliy markazining 2022 yil 14 noyabrda №150-01-39/583-sonli ma'lumotnomasi). Ilmiy natijalardan foydalanish nikel bilan legirlangan kremniy asosida olingan diodlar va MDYa-strukturalarning funksional imkoniyatlarini oshirishga imkon bergan;

kremniydagi nikel kirishma atomlari to'plamlarining strukturaviy tuzilishi asosan, diffuziya harorati va diffuziyadan so'ng namunalarni sovitish tezligi qiymatlariga bog'liq bo'lib, $T \geq 1273$ K diffuziya haroratlarida olingan, so'ngra tez sovitilgan (≥ 200 K/s) namunalarda o'lchami bir necha yuzlab nanometrga yetuvchi kirishma nanobirikmalari, sekin sovitilgan (≤ 1 K/s) namunalarda esa o'lchami 10 mkm gacha bo'lgan kirishma mikrobirikmalari shakllanishidan; termik tavlash harorati $T = 1073$ K ni tashkil etganda nikel kirishma nanobirikmalari n-Si<Ni> namunalarda 10 minut davomida, p-Si<Ni> namunalarda esa 15÷20 minut davomida parchalanishidan «FOTON» AJda ishlab chiqariladigan yarimo'tkazgichli kremniy asosidagi elektron qurilmalar tayyorlashda foydalanilgan («O'zeltexsanoat» aksionerlik jamiyatining 2022 yil 9 dekabrda №04-3/2558-sonli ma'lumotnomasi). Ilmiy natijalardan foydalanish nikel bilan legirlangan kremniy tajribaviy namunalarning elektrofizik parametrlarini termik tavlash ta'sirida boshqarish imkonini bergan.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Dissertatsiya ishining natijalari 9 ta xalqaro va 11 ta Respublika miqyosida o'tkazilgan ilmiy- amaliy konferentsiyalarda ma'ruza va muhokama qilingan.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi. Dissertatsiya mavzusi bo'yicha asosiy natijalar 34 ta ilmiy ishda, ulardan 8 tasi dissertatsiya ishlarining asosiy ilmiy natijalarini nashr etish uchun O'zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasi tomonidan tavsiya etilgan ilmiy jurnallarda, shu jumladan 4 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 52 ta rasm, 4 ta jadvalni o'z ichiga olgan holda, 105 betni tashkil etadi.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Kirish qismida dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurligi asoslangan, tadqiqotning Respublikada fan va texnologiyalarni rivojlantirishning ustuvor yo'nalishlariga mosligi ko'rsatilgan, muammoning o'rganilganlik darajasi ochib berilgan, tadqiqot maqsadi va vazifalari belgilangan, tadqiqot ob'ektlari, tadqiqot

usullari, tadqiqotning ilmiy yangiligi va amaliy ahamiyati, tadqiqot natijalarining joriy qilinishi, ishni aprotatsiyadan o'tganligi va nashr qilinishi, shuningdek dissertatsiyaning hajmi va tuzilishi to'g'risida ma'lumotlar berilgan.

“Yarimo‘tkazgichlarda hosil bo‘luvchi kirishma atomlarining to‘plamlari” deb nomlangan birinchi bobda 3d-guruh elementlari bilan legirlangan yarimo‘tkazgichlar hajmida hosil qiluvchi nuqsonlarning tabiati, turli usullar bilan legirlangan kremniy monokristali hajmida hosil bo‘luvchi kirishma atomlari to‘plamlarining hosil bo‘lish mexanizmlari, xususan diffuziya usulida legirlangan kremniy monokristali hajmidagi nikel kirishma atomlari mikro- va nanobirikmalarining morfologik xususiyatlari, kirishma nuqsonlarining kremniy monokristali elektrofizik xususiyatlariga ta'siri bo'yicha adabiyotlardagi ma'lumotlar tahlili keltirilgan.

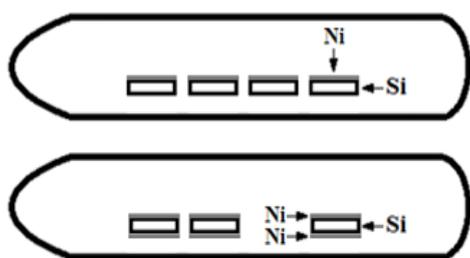
“Kremniydagi kirishma atomlari to‘plamlarining morfologik parametrlarini tadqiq qilish usullari” deb nomlangan ikkinchi bobda yarimo‘tkazgichli materiallarda hosil bo‘luvchi kirishma atomlari to‘plamlarining morfologik parametrlarini aniqlash bo'yicha tadqiqotlarni o'tkazish usullari, tayyorlangan namunalarning elektrofizik parametrlarini o'lchash haqida ma'lumotlar keltirilgan.

Nikel kirishma atomlari mikro- va nanobirikmalariga ega bo'lgan kremniy monokristalini olish bo'yicha diffuziya texnologiyasining xususiyatlari o'rganish, mavjud adabiyotlardagi ma'lumotlarni tahlil qilish natijasida Choxralskiy usulida o'stirilgan, solishtirma qarshiligi $\rho=5\div 40$ Om-sm ga teng bo'lgan n-tipdagi hamda solishtirma qarshiligi $\rho=5\div 20$ Om-sm bo'lgan p-tipdagi kremniy monokristallariga nikelning diffuziyasi $T=873\div 1573$ K harorat intervalida, davomiyliqi $t=20$ minutdan 8 soatgacha bo'lgan vaqt oralig'ida o'tkazildi. Diffuziyadan so'ng sovitish tezligi 0.01 K/sek $< v_{sov} < 400$ K/sek qiymatlarida kirishma nikel atomlarining kremniy hajmida elektr faol va elektr faol bo'lmagan holatlarda taqsimlanishini aniqlashtirish bo'yicha eksperimental tadqiqotlar o'tkazildi. Namunalarning qatlamlarini olib tashlash usuli va ularning radioaktiv tahlili asosida $Si\langle Ni\rangle$ namunalariidagi nikel kirishma atomlari konsentratsiyasi aniqlandi. Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatdiki, qalinligi 2 mm bo'lgan kremniy namunalari $T\geq 1523$ K haroratlarda 2 soat davomida tavlashda to'yinadi. Tavlanish vaqtining yanada ortishi Ni atomlari konsentratsiyasining sezilarli o'zgarishiga olib kelmaydi va bu konsentratsiya qiymati tadqiqotlar o'tkazilgan harorat intervalida eng yuqori eruvchanlik qiymati sifatida qabul qilindi.

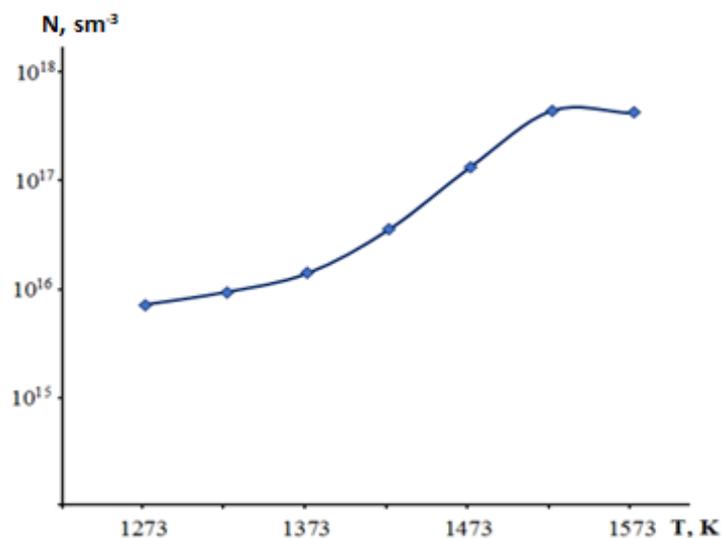
Tajribalar uchun kremniyning dastlabki namunalari $2\times 5\times 10$ mm o'lchamda parallelepiped shaklida kesib olindi. So'ngra ularning sirtiga Ni elementi 500 nm qalinlikda uchirildi. Si sirtiga uchirilgan Ni qatlamidan vakuum sharoitida (10^{-4} bar) diffuziyani amalga oshirish uchun namunalari joylashtirishga imkon beradigan maxsus ampulalar tayyorlandi. Bir tomonlama va ikki tomonlama nikel qatlamlariga ega bo'lgan Si namunalari ampulalarga joylashtirildi (1-rasm).

O'tkazilgan tadqiqotlar natijasida dastlabki legirlovchi kirishmaning turi (P, B), ular hosil qiluvchi energetik sathlarning tabiati (akseptor yoki donor), shuningdek, IQ faol kislorodning konsentratsiyasi ($10^{16}\div 10^{18}$ sm⁻³) nikelning kremniydagi

umumiy eruvchanligiga ta'sir etmasligi aniqlandi. Boshqa 3d-o'tish guruhi elementlari bilan solishtirilganda Si da Ni eng yuqori eruvchanlik va diffuziya koeffitsientiga ega bo'lib, kirishma atomlarining umumiy soni uning elektr faol qismiga nisbatan uch tartibga yuqori qiymatga ega. Shuningdek, olingan natijalar shuni ko'rsatdiki, kremniydagi dislokatsiyalar zichligining 10^2 dan 10^7 sm^{-2} gacha o'zgarishi hamda boshlang'ich fosfor kirishma atomlarining konsentratsiyasi 10^{13} dan 10^{19} sm^{-3} gacha o'zgarishi o'rganilayotgan harorat intervalida Ni umumiy eruvchanligini sezilarli darajadagi o'zgarishiga olib kelmaydi.



1-rasm. Nikelni kremniyga diffuziya qilish uchun olingan ampulalar.

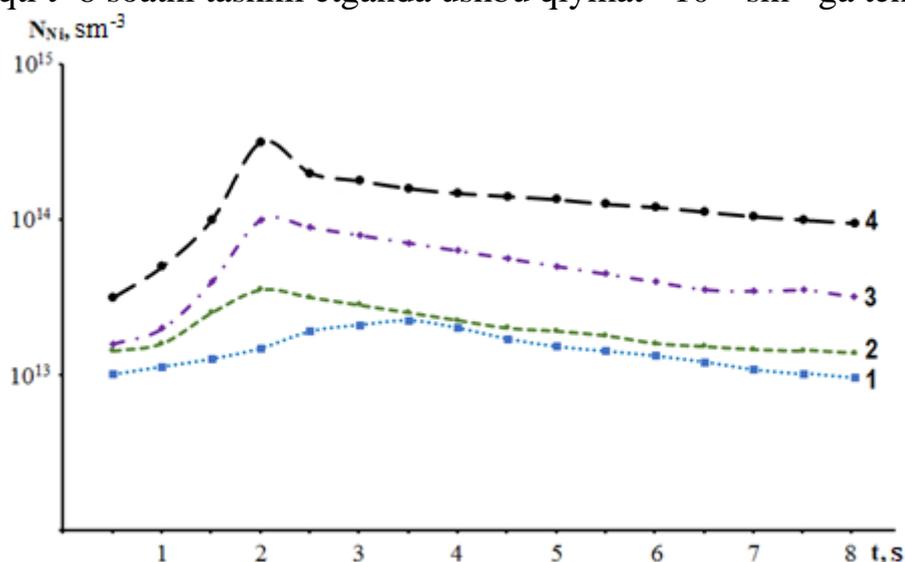


2-rasm. Kremniyda nikel kirishma atomlari eruvchanligining diffuziya haroratiga bog'liqligi.

Kremniyda nikel atomlari uchun maksimal eruvchanlik qiymati $T=1523 \text{ K}$ haroratda $5 \cdot 10^{17} \text{ sm}^{-3}$ ni tashkil etib, diffuziyaviy tavlash harorati $T=1573 \text{ K}$ ga ko'tarilganda ushbu qiymat uncha katta bo'lmagan miqdorda kamayadi va $4.5 \cdot 10^{17} \text{ sm}^{-3}$ ni tashkil etadi (2-rasm). Taqqoslash uchun mazkur yo'nalishda tadqiqotlar olib borgan boshqa mualliflar Lindroos J., Fenning D.P., Backlund D.J. lar tomonidan olingan natijalarga asosan $T=1158 \text{ K}$ haroratda 30 minut davomida nikelni kremniyga diffuziya qilinganda nikelning umumiy konsentratsiyasi $\sim 6.5 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-2}$ ni tashkil etgan.

Kremniyga nikelni diffuziya qilish jarayonida tavlani davomiyligining kremniyga kiritilgan elektr faol kirishma atomlari konsentratsiyasiga ta'siri $T=1273 \div 1573 \text{ K}$ harorat intervalida o'rganildi. 3-rasmdan ko'rinib turibdiki, dastlab diffuziya harorati $T=1273 \text{ K}$ ni tashkil etganda, kremniydagi elektr faol nikel atomlari konsentratsiyasi diffuziya vaqti ortishi bilan sekin ortib boradi. U o'zining maksimal ko'rsatkichiga tavlani vaqti $t=3.5$ soatga yetganda erishadi va uning qiymati $3 \cdot 10^{13} \text{ sm}^{-3}$ ga tenglashadi. Diffuziya vaqtining keyingi uzaytirilishi davomida u asta-sekin kamayib borib, $t=8$ soatga yetganda ushbu qiymat $\sim 9 \cdot 10^{12} \text{ sm}^{-3}$ ni tashkil qiladi. $T=1373 \text{ K}$ haroratda nikelni kremniyga diffuziya qilish jarayonining dastlabki 1 soatdan 2 soatgacha bo'lgan vaqt oralig'ida elektr faol kirishma atomlari konsentratsiyasining sezilarli ortishi kuzatilib, bunda uning qiymati $4.5 \cdot 10^{13} \text{ sm}^{-3}$ ga erishadi. Shundan so'ng diffuziya vaqtining keyingi

qiymatlarida ushbu qiymat kamayib boradi va $t=8$ soatni tashkil qilganda u deyarli o‘zining dastlabki qiymatiga yaqinlashadi. Diffuziya harorati $T=1473$ K ni tashkil etganda esa, dastlabki 2 soat mobaynida elektr faol nikel atomlari konsentratsiyasining keskin o‘shishi kuzatiladi va u $\sim 10^{14}$ sm^{-3} ga tenglashadi. Undan keyingi tavlaniish vaqtida ushbu qiymat oxista kamayib boradi, hamda $t=8$ soatga yetganda u $\sim 4 \cdot 10^{13}$ sm^{-3} ni tashkil etadi. So‘ngra diffuziya haroratini $T=1523$ K ga ko‘tarib, tavlaniish vaqtini $t=30$ minutdan 2 soatgacha oshirib borilganda kremniydagi elektr faol nikel atomlari konsentratsiyasi deyarli bir tartibga ortadi va uning qiymati $\sim 5 \cdot 10^{14}$ sm^{-3} ni tashkil etadi. Tavlaniish vaqtini keyinchalik oshirib borilishi elektr faol nikel atomlari miqdorining kamayib borishiga olib keladi. Tavlaniish vaqti $t=8$ soatni tashkil etganda ushbu qiymat $\sim 10^{14}$ sm^{-3} ga tenglashadi.



3-rasm. Kremniydagi elektr faol nikel kirishma atomlari konsentratsiyasining turlicha haroratlarda diffuziyaviy tavlaniish vaqtiga bog‘liqligi: 1– $T=1273$ K, 2– $T=1373$ K, 3– $T=1473$ K, 4– $T=1523$ K.

Olingan natijalar asosida diffuziyaviy tavlaniish harorati $T=1523$ K va tavlaniish vaqti 2 soatga teng bo‘lganda, kremniydagi elektr faol nikel kirishma atomlari konsentratsiyasi o‘zining eng katta qiymatiga erishishi va u $5 \cdot 10^{14}$ sm^{-3} ni tashkil etishi aniqlandi. Diffuziya haroratining $T \geq 1373$ K qiymatlarida, dastlabki 2 soatdan so‘ng diffuziya vaqtini keyingi oshirib borilishi natijasida namunalardagi elektr faol nikel kirishma atomlari konsentratsiyasi kamayib borishi kuzatildi. Shuningdek, tavlaniish haroratining ortib borishi bilan elektr faol nikel kirishma atomlari konsentratsiyasi tobora qisqaroq vaqt davomida keskin ortib, o‘zining maksimal qiymatiga erishishi ma’lum bo‘ldi.

Shuningdek, ushbu bobda n- va p-tipdagi Si<Ni> namunalarida hosil bo‘lgan kirishma atomlari to‘plamlarining morfologik kattaliklarini o‘rganish usullari haqida ma’lumotlar keltirilgan. Xususan nikel kirishma to‘plamlarining hajmi, shakli, strukturaviy tuzilishi va kimyoviy tarkibini batafsil o‘rganish uchun ushbu kattaliklarni yuqori aniqlik bilan o‘lchash imkonini beradigan zamonaviy «Superprobe JXA-8800R» (JEOL) elektron-zondli mikroanalizatori hamda JSM-IT200 skanerlovchi elektron mikroskoplaridan foydalanildi.

“Kremniy monokristalida nikel kirishma atomlari to‘plamlarining tuzilishi va tarkibi” deb nomlangan uchinchi bobda kremniy monokristalida nikel kirishma atomlari to‘plamlari shakllanishi jarayoniga diffuziya kattaliklarining ta’siri, nikel kirishma to‘plamlarining o‘lchamlari va shakllari, ularning elementli tarkibi va tuzilishi, birqatlamli va ko‘pqatlamli nikel kirishma to‘plamlarining strukturaviy xossalarini o‘rganish bo‘yicha eksperimental tadqiqotlar natijalari keltirilgan.

Tajribalar natijalari shuni ko‘rsatdiki, diffuziya usulida $T_{diff} < 1273$ K haroratlarda nikel bilan legirlangan kremniy namunalari hajmida, ularning tipidan qat’iy nazar kirishma atomlari mikro- va nanobirikmalari hosil bo‘lishi kuzatilmaydi. $T_{diff} = 1273$ K haroratda diffuziya qilingandan so‘ng $v_{sov} = 200$ K/s tezlik bilan sovutilgan n-Si<Ni> namunalarda nikel kirishma nanobirikmalari hosil bo‘lishi aniqlandi. Bunday diffuziya sharoitida olingan namunalarda kirishma nanobirikmalarining eng katta o‘lchami 300 nm ga yetib, ular asosan, ignasimon va linzasimon shakllarga ega bo‘ladi. Mazkur haroratda diffuziya qilingandan so‘ng $v_{sov} = 0.05$ K/s tezlik bilan sekin sovutilgan n-Si<Ni> namunalarda esa o‘lchamlari 300÷350 nm ga yetuvchi linzasimon va sharsimon shakllarga ega bo‘lgan kirishma nanobirikmalari hosil bo‘ladi (4-rasm). Ushbu kirishma nanobirikmalari namuna sirtidan $l = 200$ mkm chuqurlikkacha bo‘lgan qatlamda hosil bo‘lishi kuzatiladi.



4-rasm. $T_{diff} = 1273$ K haroratda diffuziyadan so‘ng, $v_{sov} = 0.05$ K/s tezlik bilan sovutilgan n-Si<Ni> namunalarda hosil bo‘lgan kirishma nanobirikmalari tasviri.

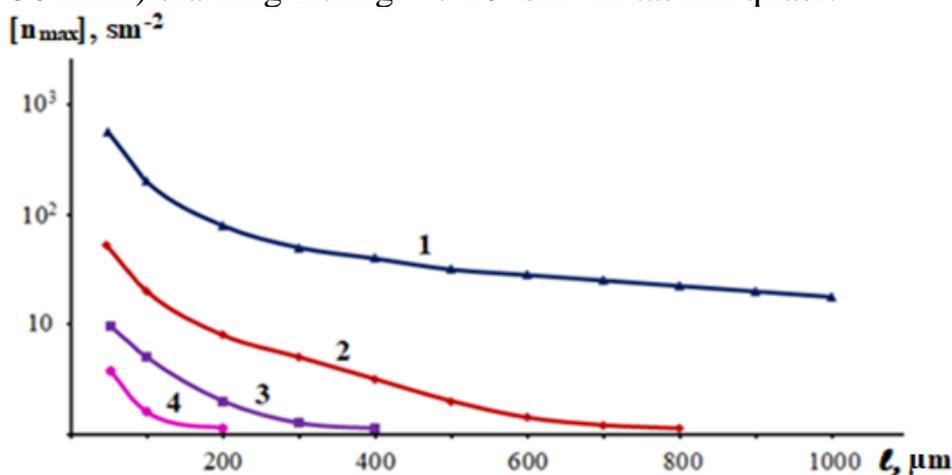


5-rasm. $T_{diff} = 1273$ K haroratda diffuziyadan so‘ng, $v_{sov} = 0.05$ K/s tezlik bilan sovutilgan p-Si<Ni> namunalarda hosil bo‘lgan kirishma nanobirikmalari tasviri.

Xuddi shunga o‘xshash sharoitda, ya’ni diffuziya harorati $T_{diff} = 1273$ K ni tashkil etib, undan so‘ng $v_{sov} = 0.05$ K/s sovitish tezligi bilan olingan p-Si<Ni> namunalarning sirtga yaqin sohalarida ham nikel kirishma nanobirikmalari hosil bo‘lishi kuzatildi (5-rasm). Bunda o‘lchami 250 nm gacha bo‘lgan nanobirikmalar hosil bo‘lib, ularning shakllari asosan ignasimon va linzasimon ko‘rinishga ega. Bunday kirishma nanobirikmalari namuna sirtidan $l = 150$ mkm gacha bo‘lgan masofadagi qatlamda hosil bo‘lishi aniqlandi.

Kremniy monokristalidagi nikel kirishma to‘plamlarining sirtidan hajmga qarab yo‘nalishdagi taqsimot zichligiga bo‘yicha olingan natijalarga ko‘ra $T_{diff} = 1273$ K haroratda 2 soat davomida diffuziya qilingandan so‘ng, sekin sovutilgan n-Si<Ni> namunalarda sirtidan $l = 200$ mkm gacha bo‘lgan chuqurlikdagi sohada hosil bo‘lishi kuzatilib, ular miqdori juda kam, ya’ni 1 sm^{-2} yuzada bir nechtani tashkil etadi (6-

rasm). Diffuziya harorati $T_{diff} = 1373$ K ga ko‘tarilganda, kirishma to‘plamlari namunalar sirtidan $l=400$ mkm gacha bo‘lgan chuqurlikdagi sohada hosil bo‘lishi kuzatiladi va ularning sirtga yaqin sohadagi zichligi ~ 10 sm⁻² ni tashkil etadi. $T_{diff}=1473$ K ni tashkil etganda, olingan namunalarda hosil bo‘luvchi nikel kirishma to‘plamlari, namuna sirtidan $l=800$ mkm gacha bo‘lgan chuqurlikda ham kuzatiladi. Namunaning ushbu sohasida ularning zichligi $\sim 70 \div 80$ sm⁻² ni tashkil qiladi. $T_{diff}=1523$ K haroratda diffuziya qilingan n-Si<Ni> namunalarida nikel kirishma to‘plamlari butun hajm bo‘ylab hosil bo‘lishi aniqlandi. Bunda namuna sirtiga yaqin sohada ($l=50$ mkm) ularning zichligi $\sim 7 \cdot 10^2$ sm⁻² ni tashkil qiladi.



6-rasm. $T=1273 \div 1523$ K harorat intervalida diffuziya qilingandan so‘ng $v_{sov}=0.05$ K/s tezlik bilan sovitilgan n-Si<Ni> namunalarida kirishma to‘plamlari maksimal zichligining sirtidan hajmga qarab yo‘nalishdagi taqsimoti.

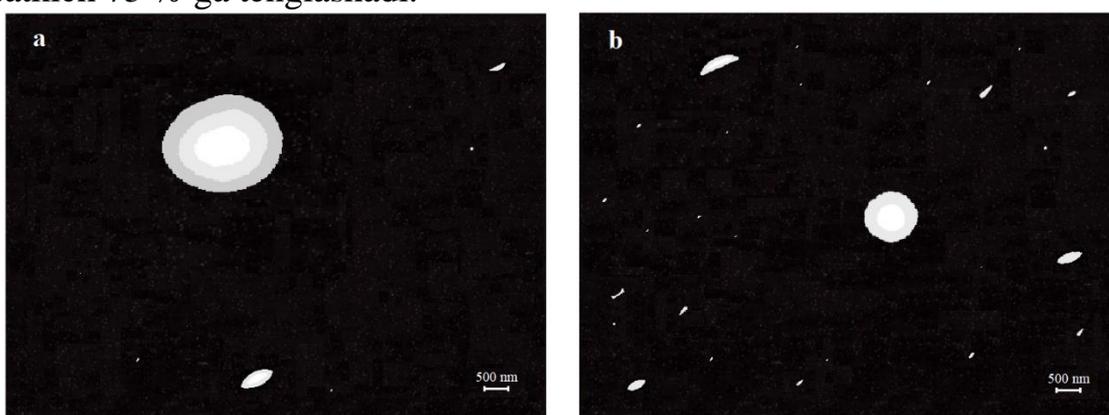
Kremniydagi nikel kirishma atomlarining mikro- va nanobirikmalari tarkibiy tuzilishini, kimyoviy tarkibini o‘rganish bo‘yicha o‘tkazilgan tadqiqotlar natijalari shuni ko‘rsatdiki, uning tuzilishi, asosan, diffuziyaviy tavlanişdan keyingi namunalarning sovitish tezligi – v_{sov} qiymatiga bog‘liq. 7-rasmda $T=1523$ K haroratda diffuziyadan so‘ng sekin (a) va tez (b) sovitish tezligi bilan olingan n-Si<Ni> namunalaridagi kirishma atomlari to‘plamlarining tasvirlari ko‘rsatilgan. Bunda namunalarni sovitish tezliklari tez sovitganda $v_{sov}=100$ K/s ni, sekin sovitishda esa $v_{sov} \leq 1$ K/s ni tashkil etgan.

Tasvirlardan ko‘rinib turibdiki, sekin sovitish bilan olingan namunalar hajmida o‘lchamlari bir necha yuz nanometrdan bir necha mikrometrgacha bo‘lgan, nisbatan katta kirishma mikrobirikmalari hosil bo‘ladi. Bunday mikrobirikmalar chegaralari aniq ajralib turadigan ko‘p qatlamli tuzilishga ega bo‘lib, ular asosan sharsimon shaklga ega (7-rasm (a)). Ko‘p qatlamli mikrobirikmalarning tuzilishiga ko‘ra, ularda har bir qatlam har xil qalinlik qiymatlariga ega bo‘lishi mumkin.

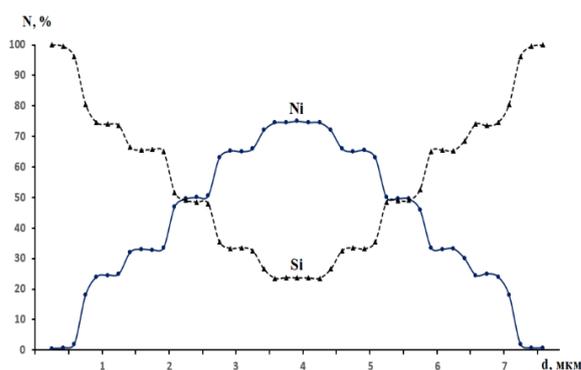
Tez sovitilgan n-Si<Ni> namunalari hajmida esa asosan, nisbatan kichik o‘lchamlarga (700-800 nm gacha) ega bo‘lgan nanobirikmalar hosil bo‘lib, ular asosan, bir qatlamli tuzilishga ega bo‘ladi (7-rasm (b)).

$T=1523$ K haroratda 2 soat davomida diffuziya qilingandan so‘ng $v_{sov}=0.05$ K/s tezlik bilan sekin sovitilgan n-Si<Ni> namunalaridagi kirishma mikrobirikmalarining morfologik kattaliklarini o‘rganish natijalari, ularda hosil bo‘luvchi nikel mikrobirikmalari o‘lchami $7 \div 8$ mkm ga yetib, ularning tarkibiy

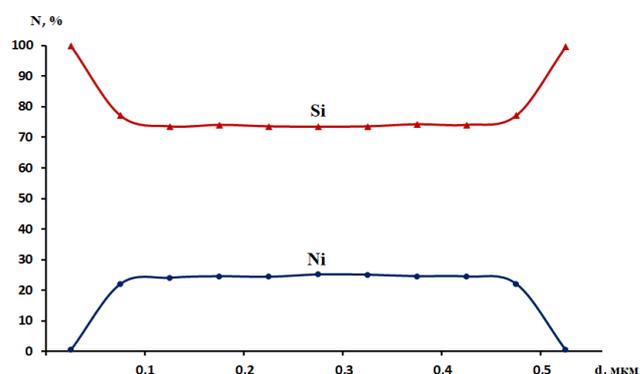
tuzilishida qatlamlar soni yanada ko‘proq bo‘lishini ko‘rsatdi. Diametri $d=7$ mkm ga teng bo‘lgan sharsimon shakldagi, beshta qatlamdan iborat mikrobirikmaning kimyoviy tarkibini tahlil qilish natijalari 8-rasmda keltirilgan. Undan ko‘rinib turibdiki, mazkur mikrobirikmaning markaziy qatlamida nikel atomlarining miqdoriy ulushi 73 % ni, Si atomlari esa 25 % tashkil etadi. Mikrobirikmaning markazdan keyingi joylashgan qatlamida nikel atomlari uchun mazkur qiymat sezilarli darajada kamayib 65 % ni, Si atomlari esa aksincha ortib 34 % tashkil qiladi. Mikrobirikma sirtiga tomon yo‘nalishda joylashgan navbatdagi qatlamda nikel atomlari ulushi yanada kamayadi va 50 % ni, Si atomlari esa 48 % ga tenglashadi. Keyingi joylashgan qatlamda ushbu ko‘rsatkichlar Ni va Si atomlari uchun mos ravishda 32 % va 67 % ni tashkil etadi. Mazkur mikrobirikmaning oxirgi sirtqi qatlamida nikel atomlarining miqdoriy ulushi 24 % ga, Si atomlari uchun ushbu ko‘rsatkich 75 % ga tenglashadi.



7-rasm. n-Si<Ni> namunalaridagi kirishma atomlari to‘plamlarining tasvirlari: a – sekin ($v_{\text{sov}} \leq 1$ K/s) sovitilgan namuna, b – tez ($v_{\text{sov}}=100$ K/s) sovitilgan namuna.



8-rasm. n-Si<Ni> namunasida sharsimon shakldagi, diametri $d=7$ mkm bo‘lgan ko‘pqatlamli kirishma mikrobirikmasi hajmi bo‘yicha Ni va Si atomlarining taqsimoti.

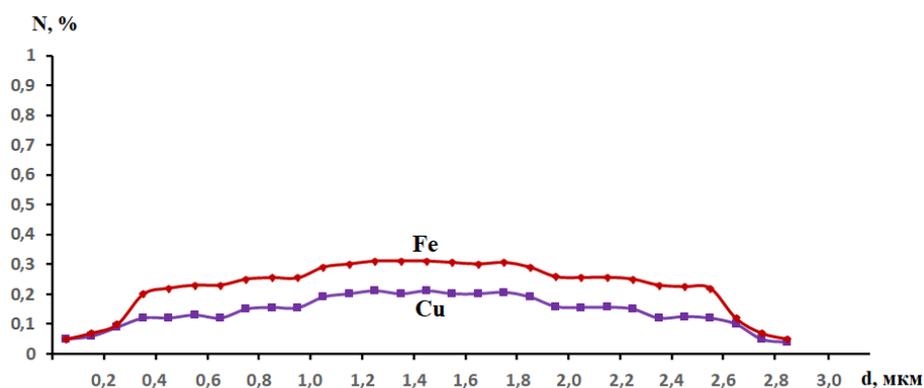


9-rasm. p-Si<Ni> namunasida o‘lchami $d=500$ nm bo‘lgan ignasimon shakldagi, bir qatlamli tuzilishga ega kirishma nanobirikmasi hajmi bo‘yicha Si va Ni atomlarining taqsimoti.

$T=1523$ K haroratda 2 soat davomida diffuziya qilingandan keyin $v_{\text{sov}}=200$ K/s sovitish tezligi bilan olingan p-Si<Ni> namunalarida hosil bo‘luvchi nikel kirishma nanobirikmalari hajmi bo‘yicha kirishma atomlari bir tekis taqsimlanganligi aniqlandi. Bir qatlamli tuzilishga ega bo‘lgan, o‘lchami $d=500$ nm ni tashkil etuvchi

ignasimon shakldagi kirishma nanobirikmasi hajmida Si hamda asosiy kirishma Ni atomlari taqsimoti 9-rasmda keltirilgan.

Kirishma to'plamlarining tarkibiy tuzilishini o'rganish bo'yicha o'tkazilgan tadqiqotlar natijalari n-Si<Ni> va p-Si<Ni> namunalarida hosil bo'luvchi kirishma mikro- va nanobirikmalari hajmida Fe, Cr, Cu kabi texnologik kirishmalar atomlari mavjudligini ko'rsatdi. Sharsimon shakldagi diametri $d=2.8$ mkm bo'lgan uch qatlamli kirishma mikrobirikmasi kimyoviy tarkibini o'rganish bo'yicha olib borilgan tahlillar orqali, uning har bir qatlamida temir va mis texnologik kirishma atomlarining taqsimotini aniqlandi. Undagi temir va mis texnologik kirishma atomlari foizining mikrobirikma diametriga bog'liqlik grafigi 10-rasmda keltirilgan. Mazkur mikrobirikmaning markaziy qismida temir atomlarining ulushi ~ 0.3 % ni, mis atomlari esa ~ 0.2 % ni tashkil qiladi. Mikrobirikmaning keyingi qatlamida Fe va Cu atomlarining ulushi mos ravishda ~ 0.24 % ga va ~ 0.15 % ga kamayadi. Mikrobirikmaning sirtqi qatlamida bu ko'rsatkichlar yanada kamayib, Fe va Cu atomlari uchun ular mos ravishda ~ 0.2 % va ~ 0.12 % ni tashkil qiladi.

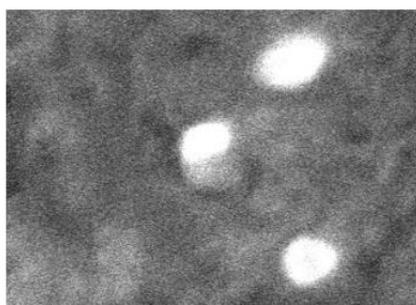


10-rasm. p-Si<Ni> namunasida diametri $d=2.8$ mkm ga teng, sharsimon shakldagi, ko'p qatlamli tuzilishga ega bo'lgan kirishma mikrobirikmasi hajmi bo'yicha Fe va Cu texnologik kirishmalari atomlarining taqsimoti.

JSM-IT200 skanerlovchi elektron mikroskop yordamida n-Si<Ni> va p-Si<Ni> namunalaridagi kirishma atomlari to'plamlarining strukturaviy tuzilishi, kimyoviy tarkibi o'rganildi. Bunda elektronlarni tezlashtiruvchi kuchlanish 20 kV ni, namunalar joylashgan kameradagi bosim 80 Pa ni tashkil etgan. Tadqiqotlar uchun dastlab n- va p- tipdagi Si<Ni> namunalari tayyorlandi. n-Si<Ni> namunalarini olish uchun Choxralskiy usulida o'stirilgan, solishtirma qarshiligi 0.3 Om·sm bo'lgan KEF markali kremniy monokristalidan, p-Si<Ni> namunalarini olish uchun esa Choxralskiy usulida o'stirilgan, solishtirma qarshiligi 0.3 Om·sm bo'lgan KDB markali kremniy monokristalidan foydalanildi. Kremniyga nikel diffuziyasi $T=1573$ K haroratda $t=2$ soat davomida amalga oshirildi. Diffuziyadan so'ng namunalar tez ($v_{sov}=200$ K/s) va sekin sovitish ($v_{sov}=1$ K/s) usullari bilan sovitildi.

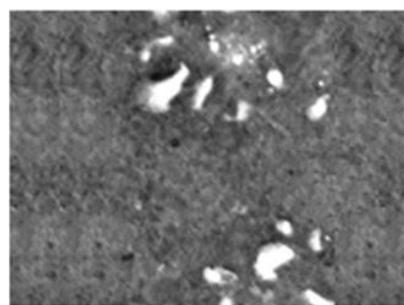
11-rasmda sekin sovitish usuli bilan olingan n-Si<Ni> namunalarida hosil bo'luvchi kirishma mikrobirikmalarining tasviri keltirilgan. Undan ko'rinib turibdiki, sekin sovitish bilan olingan namunalar hajmida o'lchamlari bir necha mikrometrga yetuvchi, nisbatan katta o'lchamli kirishma mikrobirikmalari hosil

bo'ldi. Bunday mikrobirikmalar asosan, ko'p qatlamli tuzilishga ega bo'lib, ular turlicha kimyoviy tarkibga ega ekanligi aniqlandi.



2 μm

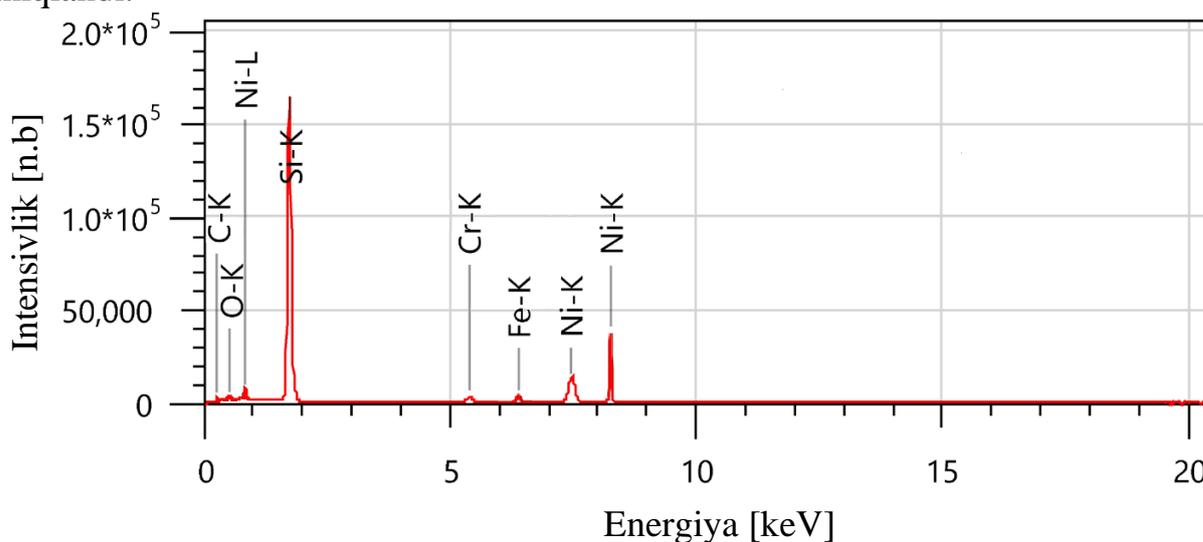
11-rasm. Sekin sovitilgan n-Si<Ni> namunasida kirishma atomlari to'plamlarining tasviri.



2 μm

12-rasm. Tez sovitilgan n-Si<Ni> namunasida kirishma atomlari to'plamlarining tasviri.

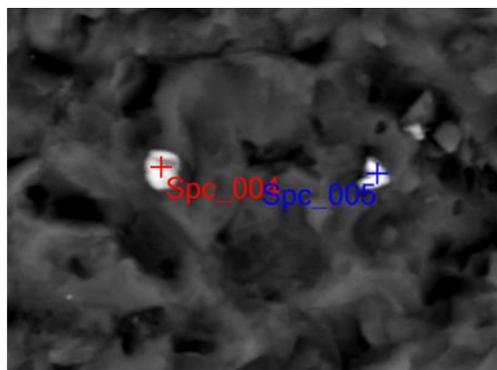
Sekin sovitilgan n-Si<Ni> namunasida hosil bo'lgan o'lchami ~1,8 mkm ga teng, sferasimon shakldagi kirishma mikrobirikmasi tarkibi o'rganilganda, unda Si va Ni atomlari bilan birga temir, xrom, kislorod va uglerod kabi texnologik kirishma atomlarining mavjudligi ma'lum bo'ldi (13-rasm). Ushbu mikrobirikmaning kimyoviy tarkibini tahlil qilish natijalari uning markaziy sohasida kirishma Ni atomlarining foizli 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 etishini ko'rsatdi. Mikrobirikmaning sirtga yaqin sohasida esa Ni atomlarining foizli 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 etishi aniqlandi.



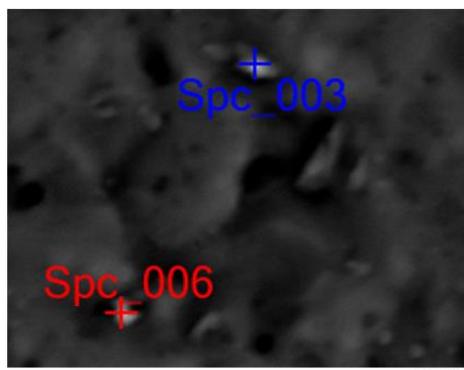
13-rasm. Sekin sovitilgan n-Si<Ni> namunasida o'lchami ~1.8 mkm ga teng bo'lgan sferasimon kirishma mikrobirikmasi elementli tarkibini umumiy spektri.

Diffuziyadan so'ng tez sovitish usuli bilan olingan n-Si<Ni> namunalarida o'lchamlari bir necha yuzlab nanometrdan bir necha mkm gacha bo'lgan kirishma nano- va mikrobirikmalari hosil bo'lishi kuzatildi (12-rasm). Namuna hajmida hosil bo'lgan o'lchami ~700 nm ga teng, ignasimon shakldagi kirishma nanobirikmasining kimyoviy tarkibi o'rganilganda, undagi Ni atomlarining foizli

ulushi 23.23 %, Si atomlari 75.42 %, temir atomlari 0.26 %, xrom atomlari 0.31 %, kislorod atomlari 0.43 % va uglerod atomlari 0.35 % ni tashkil qilishi aniqlandi. 14-rasmda sekin sovitish usuli bilan olingan p-Si<Ni> namunalaridagi kirishma atomlari to‘plamlarining tasviri keltirilgan. Undan ko‘rinib turibdiki, ushbu namunalar hajmida o‘lchamlari bir necha yuz nanometrdan bir necha mikrometrgacha bo‘lgan kirishma atomlari to‘plamlari hosil bo‘ladi. Nisbatan katta o‘lchamli kirishma mikrobirikmalari, asosan, ko‘p qatlamli strukturaga ega bo‘lib, har bir qatlam turlicha kimyoviy tarkibga ega bo‘ladi.



14-rasm. Sekin sovitilgan p-Si<Ni> namunalarida kirishma atomlari to‘plamlarining tasviri.



15-rasm. Tez sovitilgan p-Si<Ni> namunalarida kirishma atomlari to‘plamlarining tasviri.

14-rasmda keltirilgan o‘lchami ~1 mkm ga teng bo‘lgan nikel mikrobirikmasi kimyoviy tarkibini tahlil qilish natijalariga ko‘ra uning markaziy sohasida kirishma Ni atomlarining foizli ulushi 51.65 %, Si atomlari 46.32 %, temir atomlari 0.32 %, xrom atomlari 0.2 %, kislorod atomlari 0.82 % va uglerod atomlari 0.69 % ni tashkil qiladi. Ushbu mikrobirikmaning sirtga yaqin sohalarida esa Ni atomlarining foizli ulushi 25.46 %, kremniy atomlari 73.14 %, temir atomlari 0.21 %, xrom atomlari 0.14 %, kislorod atomlari 0.64 % va uglerod atomlari esa 0.41 % ni tashkil etishi aniqlandi.

15-rasmda tez sovitilgan p-Si<Ni> namunalarida hosil bo‘luvchi kirishma nanobirikmalari tasviri keltirilgan. Undagi o‘lchami ~400 nm ga teng bo‘lgan nikel nanobirikmasining kimyoviy tarkibi bo‘yicha olingan natijalar, unda Ni atomlarining foizli ulushi 24.68 %, Si atomlari 73.87 %, temir atomlari 0.22 %, xrom atomlari 0.15 %, kislorod atomlari 0.65 % va uglerod atomlari 0.43 % ni tashkil qilishini ko‘rsatdi.

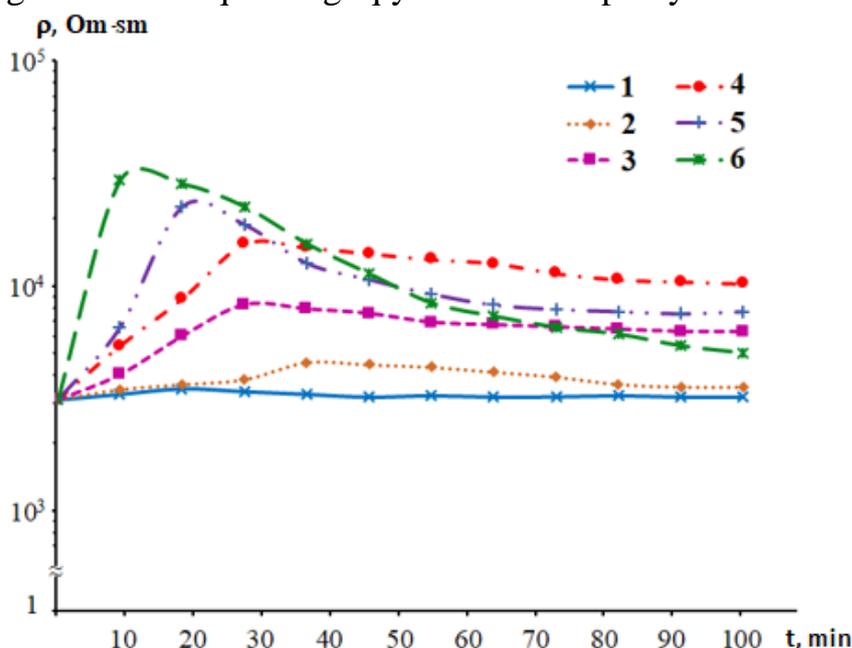
“Kremniydagi nikel kirishma to‘plamlari xossalari va ularga tashqi omillarning ta’siri” deb nomlangan to‘rtinchi bobda diffuziya usulida Ni bilan legirlangan Si namunalarida hosil bo‘luvchi kirishma to‘plamlari strukturaviy xossalari, shuningdek, nikel kirishma to‘plamlariga ega bo‘lgan kremniyning elektrofizik parametrlariga termik tavlash va tashqi har tomonlama gidrostatik bosimning ta’siri bo‘yicha tadqiqotlar natijalari keltirilgan.

Yuqori diffuziya haroratlarida ($T \geq 1273$ K) nikel bilan legirlangan kremniyda hosil bo‘luvchi kirishma nanobirikmalari asosan bir qatlamli, mikrobirikmalari esa ko‘p qatlamli tuzilishga ega bo‘ladi. Kremniydagi nikel kirishma mikrobirikmalari ikki va undan ortiq qatlamli tuzilishga ega bo‘lib, ular Ni_xSi_y tipidagi silitsidlardan

tashkil topadi. Kirishma nanobirikmalari esa asosan bir qatlamli tuzilishga ega bo‘lib, ular NiSi_3 silitsididan tashkil topadi.

$n\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$ va $p\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$ namunalari solishtirma qarshiligiga turli haroratlarda termik ishlov berishning ta’siri, shuningdek termik ishlov ta’sirida nikel kirishma mikro- va nanobirikmalari morfologiyalarining o‘zgarishini tadqiq qilish maqsadida, namunalarga $T=573\div 1073$ K harorat intervalida, $10\div 100$ minut vaqt oralig‘ida izotermik ishlov berildi. Namunalarning solishtirma qarshiligi har bir tavlaniş bosqichidan keyin o‘lchab borildi. Termik ishlovning har bir bosqichidan so‘ng namunalarning strukturaviy tahlillari Superprobe JXA-8800R elektron-zondli mikroanalizatori yordamida amalga oshirildi.

Boshlang‘ich solishtirma qarshiligi $\rho_0=5\cdot 10^3$ Om·sm bo‘lgan $n\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$ namunalarning solishtirma qarshiligini termik tavlash vaqtiga bog‘liqligini o‘rganish bo‘yicha olingan natijalar 16-rasmda ko‘rsatilgan. $n\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$ namunalari solishtirma qarshilikni tavlaniş vaqtiga bog‘liqligining bunday xarakterini quyidagicha izohlash mumkin, ya’ni tavlaniş harorati oshib borgan sari, tavlanişning dastlabki bosqichlarida elektr faol nikel kirishma atomlarining konsentratsiyasi kirishma nanobirikmalarining parchalanishi hisobiga oshib boradi va ular kristall panjara tugunlariga joylashadi. Termik tavlash vaqtining yanada ortishi bilan u to‘yinish holatiga yetadi va keyinchalik nikel atomlarining tugunlardan tugunlararo fazoga, elektr faol bo‘lmagan komplekslar hosil qilish bilan bog‘liq bo‘lgan o‘tish jarayoni asta-sekin ortib boradi. Buning oqibitida namunalarning solishtirma qarshiligi qiymatini biroz pasayishi kuzatiladi.

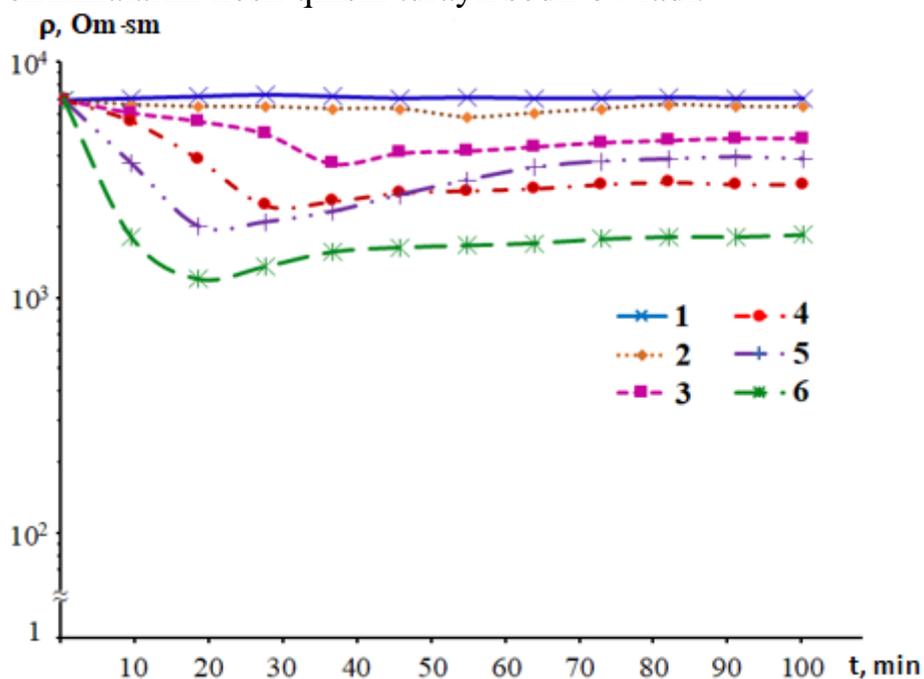


16-rasm. $n\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$ namunalari solishtirma qarshiligining termik tavlash vaqtiga bog‘liqligi. Bunda termik tavlash haroratlari: 1 – 573 K; 2 – 673 K; 3 – 773 K; 4 – 873 K; 5 – 973 K; 6 – 1073 K.

Boshlang‘ich solishtirma qarshiligi $\rho_0=8\cdot 10^3$ Om·sm ga teng bo‘lgan $p\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$ namunalari bilan o‘tkazilgan shu kabi tadqiqotlar natijalari 17-rasmda keltirilgan.

$p\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$ namunalari solishtirma qarshiligining termik tavlash vaqtiga bog‘liqligi egri chiziqlarida tavlanişning dastlabki bosqichlarida kuzatilgan

kamayish kristall panjara tugunlarida elektr faol bo'lgan nikel kirishma atomlari konsentratsiyasining ortishi bilan bog'liq. Ushbu ortish termik tavlashga qadar namunalarda elektr faol bo'lmagan holatlarda joylashgan turli kirishma komplekslari, mikro- va nanobirikmalarining tavlash ta'sirida parchalanishi, hamda ular tarkibida bo'lgan nikel kirishma atomlarining ajralib, panjara tugunlariga o'tishi hisobiga sodir bo'ladi. Termik tavlash vaqtining keyingi ortib borishi bilan p-Si<Ni> namunalari solishtirma qarshiligi qiymatida kuzatiladigan mo'tadil o'sish esa nikel kirishma atomlarining texnologik kirishmalar atomlari bilan birgalikda elektr faol bo'lmagan birikmalarini hosil qilishi tufayli sodir bo'ladi.

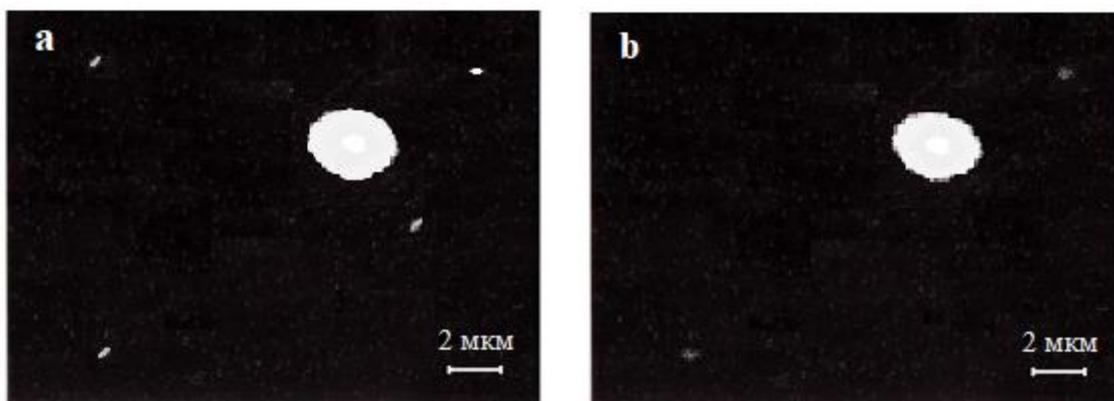


17-rasm. p-Si<Ni> namunalari solishtirma qarshiligining termik tavlash vaqtiga bog'liqligi. Bunda termik tavlash haroratlari: 1 – 573 K; 2 – 673 K; 3 – 773 K; 4 – 873 K; 5 – 973 K; 6 – 1073 K.

n- va p- tipdagi Si<Ni> namunalarning solishtirma qarshiligini termik tavlash ta'sirida bunday o'zgarishi sababini aniqlash maqsadida, ular hajmida hosil bo'lgan nikel kirishma mikro- va nanobirikmalarining tavlashdan oldin va keyingi holatlarini elektron-zondli mikroanalizator yordamida strukturaviy tahlil qilindi. Ma'lum bo'lishicha, termik tavlashning dastlabki bosqichlarida, tavlash haroratiga bog'liq holda turli vaqtlar davomida, har ikki tipdagi Si<Ni> namunalari hajmida o'lchamlari 500 nm gacha bo'lgan kirishma nanobirikmalari miqdori kamayadi. 18-rasmda n-Si<Ni> namunasining T=1073 K haroratda termik tavlashdan oldin (a) va keyin (b) olingan tasvirlari keltirilgan. Unda namunadagi ignasimon, linzasimon va disksimon shaklidagi kirishma nanobirikmalari miqdori 1073 K haroratdagi tavlashdan so'ng keskin kamayishi ko'rinib turibdi. O'lchamlari 10^{-6} m dan katta, sharsimon shaklga ega bo'lgan mikrobirikmalar esa o'z morfologik tuzilishini saqlaydi, ya'ni parchalanishga uchramaydi.

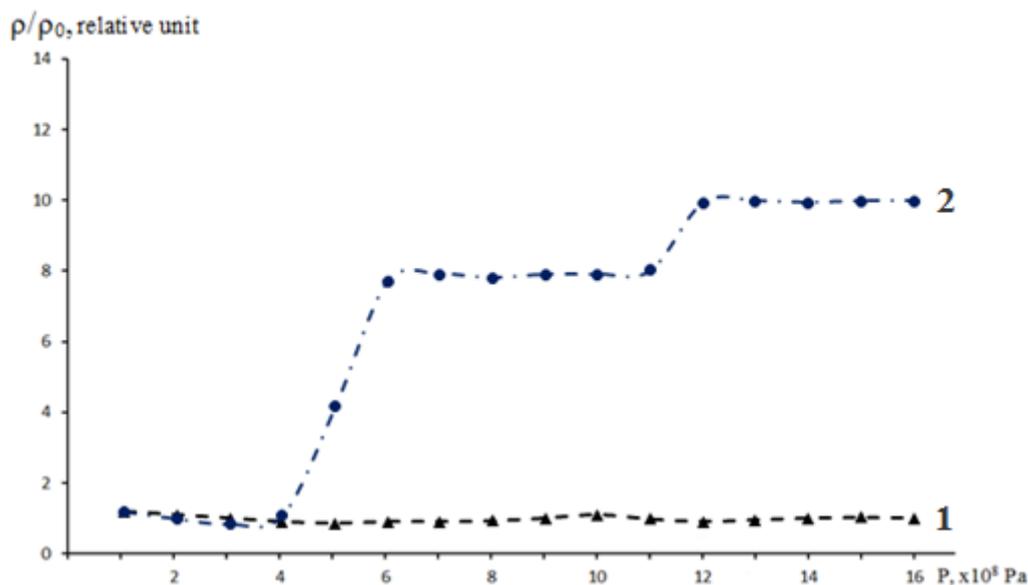
Tashqi bosimning kirishma to'plamlari morfologiyasiga ta'sirini o'rganish maqsadida n-Si<Ni> namunalari tashqi har tomonlama gidrostatik bosim (HTGB)

ta'sir ettirilgan. Bosim ta'sir etgunga qadar va undan so'ng namunalarning strukturaviy tahlili elektron-zondli mikroskopiya usuli orqali amalga oshirildi.



18-rasm. n-Si<Ni> namunasining T=1073 K haroratda termik tavlashdan oldingi (a) va keyingi (b) tasvirlari.

19-rasmda xona haroratida $P=10^8 \div 1.6 \cdot 10^9$ Pa bosim intervalida tashqi HTGB ta'sir ettirilgan dastlabki n-Si (1-egri chiziq) va n-Si<Ni> (2-egri chiziq) namunalari uchun ρ/ρ_0 qiymatini HTGB ga bog'liqligi grafiklari keltirilgan. Bunda namunalarning solishtirma qarshiligi ρ qiymatlari HTGB ta'siriga qadar va undan keyin o'lchangan. Olingan natijalar dastlabki n-Si namunalari uchun berilgan bosim intervalida ρ/ρ_0 qiymatini HTGB ga bog'liqligida sezilarli o'zgarishlar kuzatilmasligini ko'rsatdi. Ulardan farqli ravishda nikel bilan legirlangan kremniy namunalarning solishtirma qarshiligi mazkur intervaldagi bosim ta'sirida sezilarli darajada ortib boradi.

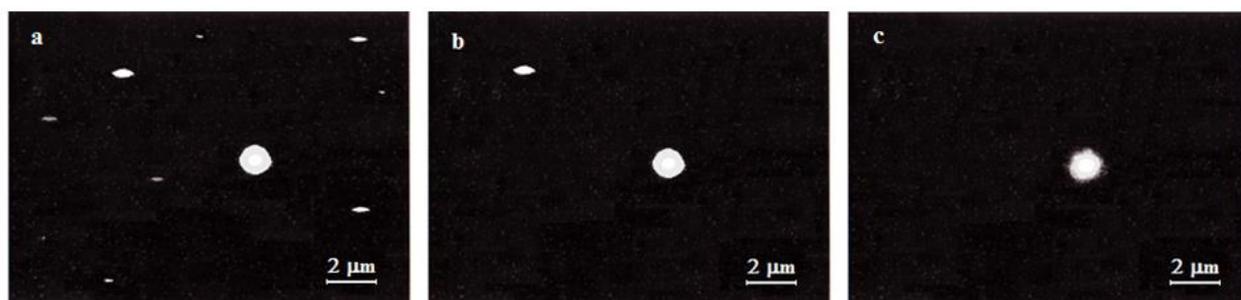


19-rasm. Namunalarning ρ/ρ_0 qiymatini HTGB ga bog'liqligi:
1– dastlabki n-Si; 2– n-Si<Ni> namunalari.

Tashqi HTGB ning dastlabki solishtirma qarshiligi $\rho_0=0.3$ Om·sm ga teng bo'lgan n-Si<Ni> namunalari solishtirma qarshiligiga ta'sirini o'rganish natijalari asosida olingan bog'liqlikni ikki bosqichga bo'lish mumkin (19-rasm, 2-egri chiziq). Ulardan birinchisi boshlang'ich bosim qiymatlarida, ya'ni $P < 4 \cdot 10^8$ Pa bo'lganda kuzatiladi va bunda namunalarning ρ qiymati ~30 % ga kamayadi. HTGB ning

qiymatini yanada oshirib borish ($P \geq 4 \cdot 10^8$ Pa) bilan ikkinchi bosqich kuzatiladi, bunda esa namunalarning solishtirma qarshiligini “keskin sakrash” xarakteridagi ortishiga olib keladi. HTGB ning qiymati $4 \cdot 10^8$ Pa dan $6 \cdot 10^8$ Pa gacha oshirib borilganda namunalarning ρ/ρ_0 qiymatida keskin ortish kuzatiladi va $P=6 \cdot 10^8$ Pa ga yetganda ushbu qiymat deyarli 8 barobarga ortadi. HTGB qiymatini keyingi $P=10^9$ Pa gacha oshirib borilishi ρ/ρ_0 qiymatini sezilarli o‘zgarishiga olib kelmaydi. Bosimning keyingi qiymatlarida ($P > 10^9$ Pa) esa yana ρ/ρ_0 qiymatining keskin ortishi sodir bo‘ladi. Bosim qiymati $P=1.2 \cdot 10^9$ Pa ga tenglashganda ρ/ρ_0 qiymati deyalii 10 barobarga ortadi. HTGB ning undan keyingi ortib borish qiymatlarida namunalarning solishtirma qarshiligi sezilarli o‘zgarmaydi.

n-Si<Ni> namunalarida HTGB ning ta’sirida solishtirma qarshilikni bunday xarakterda o‘zgarishi, bosimning $P=4 \cdot 10^8$ Pa ga qadar bo‘lgan dastlabki qiymatlarida kremniy kristall strukturasi deformatsiyalanishi tufayli energetik sathlarning siljishi oqibatida ta’qiqlangan zona kengligining torayishi bilan tushuntirish mumkin. Buning natijasida namunalar hajmida zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi ortib, solishtirma qarshilikning kamayishi kuzatiladi. Muayyan bosim qiymatlarida namunalarning solishtirma qarshiligi qiymatida kuzatilgan keyingi keskin o‘shishlar alohida qiziqish uyg‘otadi. Tashqi bosimning ayni bir qiymatlarida namunalar solishtirma qarshiligining bunday keskin oshishi, asosan, ularning hajmida zaryad tashuvchilarni qo‘shimcha tutib olish markazlarining hosil bo‘lishiga bog‘liq. Bunday markazlar ma’lum bir bosim qiymatlari ta’sirida yuzaga kelib, ular kirishma to‘plamlarining parchalanishi natijasida paydo bo‘ladi. Aynan tashqi bosim ta’sirida ilgari kirishma to‘plamlar hajmida elektr faol bo‘lmagan holatlarda joylashgan nikel kirishma atomlari parchalanish oqibatida to‘plamlardan ajralib, elektr faol holatlarga o‘tadi. Natijada, namunalarning solishtirma qarshiligida keskin ortishlar kuzatiladi.



20-rasm. HTGB ning kremniydagi nikel to‘plamlariga ta’siri:

a – HTGB ta’siriga qadar, b – $P=6 \cdot 10^8$ Pa, c – $P=1.2 \cdot 10^9$ Pa.

HTGB ning ta’siri ostida n-Si<Ni> namunalarning solishtirma qarshiligi qiymatlaridagi bunday o‘zgarishlarning sababini aniqlash maqsadida bosim ta’siridan oldin va keyin kirishma to‘plamlarining morfologik parametrlari tekshirildi. Kremniy namunalari hajmidagi nikel kirishma atomlari to‘plamlarining qiyosiy tahlillari shuni ko‘rsatdiki, HTGB ning $P=6 \cdot 10^8$ Pa ga teng qiymatidagi ta’siri ostida ignasimon va disksimon shakldagi nikelning kichik (1 mkm gacha) kirishma nanobirikmalari parchalanishi sodir bo‘ladi (20-rasm). Bundan tashqari, ushbu rasmda $P=1.2 \cdot 10^9$ Pa qiymatdagi HTGB ta’sirida linzasimon va shar shakliga

ega bo'lgan nisbatan katta o'lchamli ($d \geq 1$ mkm) nikel mikrobirikmalarining parchalanishini kuzatish mumkin. Shuni ta'kidlash kerakki, bu holda ko'p qatlamli tuzilishga ega bo'lgan ayrim nikel kirishma mikrobirikmalarining sirt qatlamlarini parchalanishi ham kuzatiladi. O'z navbatida HTGB ning $P > 4 \cdot 10^8$ Pa qiymatlarida solishtirma qarshilikni bosimga bog'liqligining qaytmas xarakterga ega bo'lishligi, ushbu o'zgarish aynan kirishma mikro- va nanobirikmalarining parchalanishi hisobiga sodir bo'lishligidan dalolat beradi.

Shunday qilib, HTGB ning $P \leq 4 \cdot 10^8$ Pa bo'lgan dastlabki qiymatlaridagi ta'siri ostida n-Si<Ni> namunalari solishtirma qarshiligining kichik qiymatlarga kamayishi kremniy kristall strukturasi deformatsiyalanishi sababli energetik sathlarning siljishi oqibatida ta'qiqlangan zona kengligining torayishi bilan bog'liq. Buning natijasida namunalarning hajmida zaryad tashuvchilar kontsentratsiyasi ortib, solishtirma qarshilikning kamayishi kuzatiladi. $P = 6 \cdot 10^8$ Pa ga teng qiymatdagi HTGB ning ta'siri ostida ignasimon, disksimon shakldagi nisbatan kichik o'lchamli (1 mkm gacha) nikel kirishma nanobirikmalarining parchalanishi sodir bo'lishi aniqlandi. Buning oqibatida esa n-Si<Ni> namunalari solishtirma qarshiligi qiymati 8 barobarga qadar keskin oshishiga olib keladi. $P = 1.2 \cdot 10^9$ Pa qiymatga ega bo'lgan HTGB ning ta'siri esa ko'p qatlamli nisbatan katta o'lchamga ega bo'lgan linzasimon va shar shakliga ega bo'lgan nikel kirishma mikrobirikmalarining parchalanishiga olib keladi. Natijada namunalarning solishtirma qarshiligi qiymati yana keskin ortadi va u deyarli 10 barobarni tashkil qiladi.

XULOSA

1. Diffuziya usulida nikel bilan legirlangan kremniyda kirishma atomlari mikro- va nanobirikmalari hosil bo'lishining maqbul texnologik rejimi aniqlandi, unga ko'ra diffuziya harorati $T \geq 1273$ K, diffuziya vaqti esa $t = 2 \div 4$ soatni tashkil etadi.

2. Ilk bor kremniyda hosil bo'luvchi nikel kirishma nanobirikmalari asosan birqatlamli, kirishma mikrobirikmalari esa ko'pqatlamli strukturaviy tuzilishga ega bo'lib, nanobirikmalar hajmida nikel atomlarining foizli ulushi $\sim 25\%$, mikrobirikmalarning markaziy qatlamida esa bu ko'rsatkich $\sim 73\%$ ga etishi aniqlandi.

3. Kremniyda hosil bo'luvchi nikel kirishma mikrobirikmalari ikki yoki undan ortiq qatlamlardan tashkil topib, har bir qatlam o'z kimyoviy tarkibi va kristall strukturasi bo'yicha bir-biridan farq qiluvchi Si_xNi_y tipidagi silitsidlardan iborat bo'lishi aniqlandi.

4. Nikel kirishma nanobirikmalari hajmida kirishma atomlari bir tekis taqsimlangan bo'lib, ular geksoqonal kristall strukturaga ega bo'lgan Si_3Ni silitsididan tashkil topishi, hamda ignasimon (< 500 nm), disksimon (< 500 nm) va linzasimon (< 700 mkm) shakllarga ega bo'lishi aniqlandi.

5. $T \geq 1273$ K haroratlarda diffuziya usulida nikel bilan legirlangan kremniyda hosil bo'luvchi kirishma mikro- va nanobirikmalarining tarkibida asosiy kirishma atomlaridan tashqari texnologik kirishmalar (Fe, Cu, Cr va boshqalar) atomlari ham

mavjud bo'lib, ularning miqdori asosiy kirishma atomlarining $0.01 \div 0.001\%$ ulushini tashkil etishi aniqlandi.

6. $T=1073$ K haroratda termik tavlash natijasida n-Si<Ni> namunalarida nikel kirishma nanobirikmalari 10 minut davomida, p-Si<Ni> namunalarida esa $15 \div 20$ minut davomida parchalanishi aniqlandi.

7. $P=6 \cdot 10^8$ Pa qiymatidagi tashqi har tomonlama gidrostatik bosim ta'sirida n-Si<Ni> namunalaridagi o'lchami ~ 700 nm gacha bo'lgan ignasimon, disksimon va linzasimon kirishma nanobirikmalari, bosimning $P=1.2 \cdot 10^9$ Pa qiymatida esa o'lchami ~ 1 mkm gacha bo'lgan linzasimon va sharsimon kirishma nano- va mikrobirikmalari parchalanishi aniqlandi.

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

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

БЕРКИНОВ ЭЛМУРОД ХОШИМЖОНОВИЧ

**СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА МИКРО- И НАНОВКЛЮЧЕНИЙ
ПРИМЕСНЫХ АТОМОВ НИКЕЛЯ В МОНОКРИСТАЛЛАХ
КРЕМНИЯ**

01.04.10 – Физика полупроводников

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

Ташкент – 2023

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мировом масштабе в области полупроводниковой микроэлектроники широко используются полупроводниковые материалы, легированные различными примесями. Интенсивно изучаются морфологические свойства примесных дефектов, формирующихся в объеме монокристаллического кремния, легированного элементами группы 3d-металлов, которые широко используются в современной микроэлектронике, а также их влияние на электрофизические свойства полупроводникового кремния. В связи с этим особое внимание уделяется повышению устойчивости и срока службы полупроводниковых приборов, изготовленных на основе монокристаллического кремния.

Примесные дефекты, образующиеся в объеме кремния, являющегося одним из основных материалов при производстве полупроводниковых диодов, транзисторов, фотоэлементов, интегральных схем и других устройств, создают уникальные возможности для управления его электрофизическими параметрами. По этой причине во всем мире проводятся научные исследования по получению полупроводниковых материалов на основе кремния с многокомпонентными примесными скоплениями с уникальными структурными строениями, а также по изучению их морфологических, электрофизических и фотоэлектрических свойств. В этой области особое внимание уделяется разработке новых технологий диффузионного легирования полупроводникового кремниевого материала с различными примесями.

В нашей республике достигнуты определенные результаты в области управления свойствами полупроводниковых материалов путем легирования их с различными примесями и комплексного изучения параметров устройств, созданных на их основе. В связи с этим возрастает потребность в легировании монокристаллического кремния металлами 3d-переходной группы методом высокотемпературной диффузии и получении полупроводниковых материалов и многослойных структур на их основе, чувствительных к различным внешним факторам (температура, давление, радиация). В Постановлении Президента Республики Узбекистан №ПП-5032 «О мерах по повышению качества образования и развитию научных исследований в области физики» от 19 марта 2021 года 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 данном направлении большое научное значение имеет создание новых полупроводниковых материалов-твердых растворов с необходимыми

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

электрофизическими, фотоэлектрическими и оптическими свойствами для производства приборов микро- и нанoeлектроники.

Данное диссертационное исследование соответствует задачам, обозначенным в Указе Президента Республики Узбекистан №УП-60 «О стратегии развития нового Узбекистана на 2022-2026 годы» 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» от 03 февраля 2021 года, № ПП-5032 «О мерах по повышению качества образования и совершенствованию научных исследований в области физики» от 19 марта 2021 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 проблемы получения монокристалла кремния, легированного элементами 3d-металлической группы с заданными параметрами и изучения его структурных, электрофизических, фотоэлектрических свойств изучаются в следующих научных центрах: Институт химической физики твёрдых тел общества Макса-Планка (Германия), Массачусетский технологический институт, Калифорнийский университет в Беркли–государственный исследовательский университет США (США), Шанхайский институт технической физики Китайской академии наук (Китай), в Физико-техническом институте имени А.Ф. Иоффе, в Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, в Институте физики микроструктур РАН (Россия), Институт физики полупроводников НАН Украины (Украина), Физико-технический институт АН РУз, Институт ионно-плазменных и лазерных технологий, Институт ядерной физики (Узбекистан).

Ученые из Германии P.Saring и M.Seibt обратили внимание на игольчатые дефекты никеля в объемах кремния, методом электронно-лучевой индуцированной токовой микроскопии (ЕВІС), и было установлено, что их размеры достигают нескольких сотен микрометров и мелкие скопления скапливаются вокруг крупных дефектов. Российские ученые Г.М.Гусинский, С.В.Барышев разработали метод формирования скоплений никеля микроигольчатой и микротрубчатой формы в кремнии, легированном никелем.

В работах известных узбекских ученых С.З.Зайнабидинова, А.Т.Мамадалимова, М.К. Бахадырханова, Ш.Б.Утамурадовой, Х.С.Далиева и других подробно изучены влияние дефектов примесных атомов, на свойства кремния, легированного элементами 3d группы металлов, а также влияние

внешних факторов на состояние подобных примесных дефектов. Однако до настоящего времени недостаточно изучены структурные строения, элементный состав примесных скоплений, образующихся в кремнии, легированном никелем диффузионным методом и процессы их распада под влиянием внешних воздействий.

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 темам: ОТ-Ф2-11 «Исследование закономерностей формирования наноразмерных дефектов в приповерхностных слоях и объеме кремния с примесями d-элементов» (2017-2020 гг.).

Целью исследования является определение структурного строения, элементного состава и последовательности распада примесных микро- и нановключений в кремнии, легированного никелем, при внешних воздействиях (температура, давление).

Задачи исследования:

изучение зависимости размера, формы и структурного строения примесных скоплений никеля в кремнии от диффузионных параметров;

определение состава примесных микро- и нановключений в кремнии, легированном никелем;

изучение влияния примесных микро- и нановключений на электрофизические свойства кремния, легированного никелем;

анализ взаимодействия основных и технологических примесных атомов в процессе диффузионного легирования кремния никелем;

изучить последовательность распада примесных скоплений в образцах Si<Ni> под влиянием внешних воздействий (температура, давление).

Объектом исследования являются образцы Si<Ni> n- и p-типа с примесными микро- и нановключениями.

Предметом исследования являются микро- и нановключения примесных атомов никеля в монокристаллах кремния, аспекты их структурного и составного строения, а также процессы распада примесных скоплений под воздействием термического отжига и давления.

Методы исследований. Для решения поставленных задач были использованы следующие методы: измерения электрофизических величин образцов кремния, легированного никелем, осуществлялись на современном приборе для измерения эффекта Холла Ecoria HMS-7000, для определения структурного строения и элементного состава примесных скоплений никеля 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.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

выявлено, что при легировании монокристалла кремния с никелем, диффузионным методом, при температурах $T \geq 1273$ К в течение $t = 2 \div 4$ часов в его объеме образуются примесные микро- и нановключения;

впервые установлено, что структурное строение примесных скоплений никеля, образующиеся в кремнии, в основном зависит от их размера, т.е. при $d < 1$ мкм они имеют однослойную, а при $d \geq 1$ мкм многослойную структуру;

путем анализа химического состава микро- и нановключений никеля, образующихся в кремнии, с помощью метода электронной микроскопии выявлено, что количество атомов технологических примесей (Fe, Cu, Cr и других) в них составляет $0,01 \div 0,001\%$ атомов основной примеси;

установлено, что при температуре термического отжига $T = 1073$ К нановключения никеля в образцах n-Si<Ni> распадаются в течение 10 минут, а в образцах p-Si<Ni> в течение $15 \div 20$ минут;

установлено, что под воздействием внешнего всестороннего гидростатического давления $P = 6 \cdot 10^8$ Па в образцах n-Si<Ni> распадаются примесные нановключения размером до ~ 700 нм с иглообразной, дискообразной и линзообразной формой, а под влиянием давления $P = 1.2 \cdot 10^9$ Па распадаются примесные нано- и микровключения размером ~ 1 мкм, которые имеют линзообразную и сферическую форму.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработаны оптимальные технологические условия формирования примесных микро- и нановключений в монокристаллах кремния, легированного никелем;

выявлены возможности очистки монокристалла кремния от технологических примесей путем формирования примесных микро- и нановключений никеля;

определены режимы термического отжига и всестороннего гидростатического давления для управления электрофизическими свойствами кремния, легированного никелем.

Достоверность результатов исследования обосновывается применением общепринятых стандартных и широко используемых методов исследования при изучении электрофизических свойств монокристаллов кремния, легированного никелем, физических процессов, протекающих в них во время и после диффузии, при различных внешних воздействиях, а также современного измерительного прибора Ecoria HMS-7000 с эффектом Холла при измерении электрофизических параметров подготовленных образцов, морфологических свойств скоплений примесных атомов, сформированных в монокристаллическом кремнии, легированного никелем, использованием электронно-зондовых и сканирующих электронных микроскопов при изучении морфологических свойств скоплений примесных атомов.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов исследований заключается в установлении основных факторов, определяющих структурное строение примесных

скоплений никеля в кремнии, которым являются размеры и формы скоплений, в определении и анализа последовательности процесса распада примесных скоплений никеля под воздействием внешних воздействий (температура, давление).

Практическая значимость результатов исследования заключается в определении структурного строения, элементного состава примесных микро- и нановключений никеля, определении влияния диффузионных параметров на структурное строение примесных скоплений при легировании кремния никелем, а также очистки объема монокристаллов кремния, с примесными микро- и нановключениями от атомов технологических примесей.

Внедрение результатов исследования.

На основе полученных научных результатов по управлению электрофизическими свойствами монокристаллического кремния, имеющего микро- и нановключения примесных атомов никеля, с помощью внешних воздействий:

определенные оптимальные технологические условия легирования кремния, примесью никеля, при которых образуются примесные микро- и нановключения, заданных размеров и структурных строений, а также установленные значения содержания атомов технологических примесей (Fe, Cu, Cr и др.) в составе микро- и нановключений никеля, образующихся в кремнии при высокотемпературном ($T \geq 1273$ К) диффузионном легировании, которые составляют $0,01 \div 0,001$ % от количества атомов основной примеси были использованы в процессе выполнения проекта 1.3.1 «Дефектно-примесная инженерия радиационно-индуцированных центров в кремниевых приборных структурах» подпрограммы «Физика конденсированного состояния и создание новых функциональных материалов и технологий их получения» в научно-практическом центре по материаловедению АН Белоруссии (Справка №150-01-39/583 от 14 ноября 2022 года Научно-практического центра по материаловедению АН Белоруссии). Использование научных результатов позволило расширить функциональные возможности диодов и МДП-структур, полученных на основе кремния, легированного примесными атомами никеля;

выявленные зависимости структурных строений скоплений примесных атомов никеля в кремнии, от значений температуры диффузии и скорости охлаждения образцов после диффузии: при температурах диффузии $T \geq 1273$ К в быстроохлаждаемых (≥ 200 К/с) образцах наблюдается образование примесных нановключений с размерами до нескольких сотен нанометров, а в образцах с медленным охлаждением (≤ 1 К/с) формируются примесные микровключения с размерами до 10 мкм; распад примесных нановключений никеля при температуре термического отжига $T = 1073$ К в образцах n-Si<Ni> происходит в течение 10 минут, а в образцах p-Si<Ni> в течение $15 \div 20$ минут были применены в Акционерном обществе «FOTON» при изготовлении полупроводниковых электронных приборов на основе кремния (Справка №04-3/2558 от 9 декабря 2022 года АК Узэлтехсаноат). Использование научных

результатов позволило контролировать электрофизические параметры экспериментальных образцов кремния, легированного никелем, под воздействием термического отжига.

Апробация результатов исследования. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 9 международных и 11 республиканских научно-практических конференциях.

Публикации результатов исследований. Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 34 научных трудах, из них 8 статей в научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных работ, в том числе 4 статьи в зарубежных международных реферируемых журналах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложения. Текст диссертации изложен на 105 страницах, включая 52 рисунков и 4 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

В первой главе под названием **«Скопления примесных атомов, образующихся в полупроводниках»** представлен анализ литературных данных о природе дефектов, которые образуются в объеме полупроводников, узаконенных элементами 3d-группы, образование вводных атомных пучков, образованных монокристаллическими атомами кремния, узаконенными различными методами, в частности, морфологические свойства монокристаллических атомов кремния в монокристаллических атомах кремния, узаконенных диффузией, эффекты вводных атомных пучков, образованных монокристаллическими атомами кремния. дефекты электрофизических свойств монокристаллического кремния.

Во второй главе **«Методы исследования морфологических параметров скоплений примесных атомов в кремнии»** приведены данные о методах исследования по определению морфологических параметров скоплений примесных атомов, образующихся в полупроводниковых материалах, а также по измерению электрофизических параметров подготовленных образцов.

В результате изучения особенностей диффузионной технологии получения монокристалла кремния с микро- и нановключениями примесных атомов никеля, а также анализа данных, содержащихся в литературе, диффузия никеля в монокристаллах кремния n-типа с удельным сопротивлением $\rho=5\div 40$ Ом·см, и p-типа с удельным сопротивлением $\rho=5\div 20$

Ом-см проводились в интервале температуры при $T=873\div 1573$ К, с продолжительностью от $t=20$ минут до 8 часов. Проведены экспериментальные исследования по выявлению распределения примесных атомов никеля в объеме кремния в электроактивном и электронейтральном состояниях при значениях скорости охлаждения после диффузии $0.01 \text{ К/с} < v_{\text{охл}} < 400 \text{ К/с}$. На основе метода поэтапного удаления слоев образцов и их радиоактивного анализа была определена концентрация атомов никеля в образцах $\text{Si}\langle\text{Ni}\rangle$. Результаты исследования показали, что образцы кремния толщиной 2 мм насыщаются при температурах отжига $T\geq 1523$ К в течение 2 часов. Дальнейшее повышение времени отжига не приводит к существенному изменению концентрации атомов Ni, и это значение концентрации было принято за наибольшее значение растворимости в интервале температур, при которых проводились исследования.

Для проведения экспериментальных исследований исходные образцы кремния были вырезаны в виде параллелепипеда с соответствующими размерами $2\times 5\times 10$ мм. Затем на их поверхность путем напыления наносили элемент Ni толщиной 500 нм. Для осуществления диффузии в условиях вакуума (10^{-4} бар) из напыленного слоя Ni на поверхность Si были изготовлены специальные ампулы, позволяющие помещать образцы. опыты показали, что в таких условиях примесные атомы проникают в объем образцов практически равномерно. Образцы Si с односторонними и двусторонними слоями никеля помещали в ампулы (рис.1).

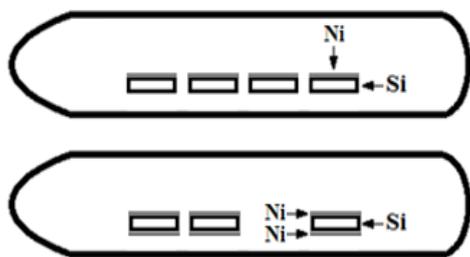


Рис.1. Ампулы, полученные для диффузии никеля в кремнии.

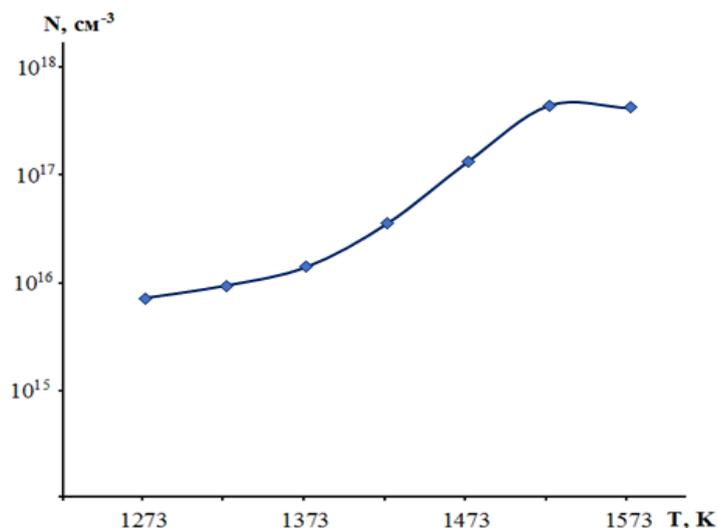


Рис.2. Зависимость растворимости атомов никеля в кремнии от температуры диффузии.

В результате проведенных исследований было установлено, что тип исходной легирующей примеси (Р, В), характер образуемых им энергетических уровней (акцепторный или донорный), а также концентрация ИК активного кислорода ($10^{16}\div 10^{18} \text{ см}^{-3}$) не влияют на общую растворимость никеля в кремнии. По сравнению с другими элементами 3d-переходной группы, Ni в Si обладает наибольшим коэффициентом растворимости и

диффузии, а общее число атомов примеси превышает значение его электрически активной части почти на три порядка. Также полученные результаты показали, что изменение плотности дислокаций в кремнии от 10^2 до 10^7 см⁻² и концентрации исходных атомов фосфора от 10^{13} до 10^{19} см⁻³ не приводит к существенному изменению общей растворимости Ni в исследуемом температурном интервале.

При температуре $T=1523$ К максимальное значение растворимости для атомов никеля в кремнии составляет $5 \cdot 10^{17}$ см⁻³. При повышении температуры диффузионного отжига до $T=1573$ К это значение уменьшается незначительно и составляет $4.5 \cdot 10^{17}$ см⁻³ (рис.2). Для сравнения, исходя из результатов, полученных другими авторами, проводившие исследования в этом направлении Lindroos J., Fenning D.P., Backlund D.J. при диффузии никеля в кремний при температуре $T=1158$ К, в течение 30 минут общая концентрация никеля составила $\sim 6.5 \cdot 10^{16}$ см⁻².

Изучено влияние длительности отжига при диффузии никеля в кремний на концентрацию электрически активных примесных атомов вводимых в кремний в температурном интервале $T=1273 \div 1573$ К. Из рис.3 видно, что при первоначальной температуре диффузии $T=1273$ К концентрация электрически активных атомов никеля в кремнии медленно увеличивается с увеличением времени диффузии. Свое максимальное значение, которое составляет $3 \cdot 10^{13}$ см⁻³, она достигает при значении времени отжига $t=3.5$ часа. В течение следующего продления времени диффузии это значение постепенно уменьшается и при $t=8$ часов она составляет $\sim 9 \cdot 10^{12}$ см⁻³. В процессе диффузии никеля в кремний при температуре $T=1373$ К в интервале времени от 1 до 2 часов наблюдается существенное увеличение концентрации электроактивных атомов примеси, значение которого достигает $4.5 \cdot 10^{13}$ см⁻³. После этого при последующих значениях времени диффузии оно уменьшается, а при $t=8$ часов приближается к своему первоначальному значению. А при температуре диффузии $T=1473$ К, в течение первых 2 ч происходит резкое увеличение концентрации электрически активных атомов никеля, которая становится равной $\sim 10^{14}$ см⁻³. При последующем отжиге это значение постепенно уменьшается, и при достижении $t=8$ часов оно составляет $4 \cdot 10^{13}$ см⁻³. Затем при повышении температуры диффузии до $T=1523$ К и увеличении времени отжига от $t=30$ минут до 2 часов концентрация электроактивных атомов никеля в кремнии увеличивается почти в полтора раза, а его величина составляет $5 \cdot 10^{14}$ см⁻³. Дальнейшее увеличение времени отжига приводит к уменьшению количества электрически активных атомов никеля. При достижении $t=8$ часов это значение становится равным $\sim 10^{14}$ см⁻³.

На основе полученных результатов было установлено, что при температуре диффузионного отжига $T=1523$ К с длительностью отжига 2 часа концентрация электроактивных примесных атомов никеля в кремнии достигает своего наибольшего значения и составляет $5 \cdot 10^{14}$ см⁻³. При значениях температуры диффузии $T \geq 1373$ К в результате последующего увеличения времени диффузии после предварительных 2 часов наблюдается

уменьшение концентрации электроактивных атомов никеля в образцах. Также выяснилось, что с повышением температуры отжига концентрация электроактивных атомов никеля достигает своего максимального значения, резко увеличиваясь за все более короткий промежуток времени.

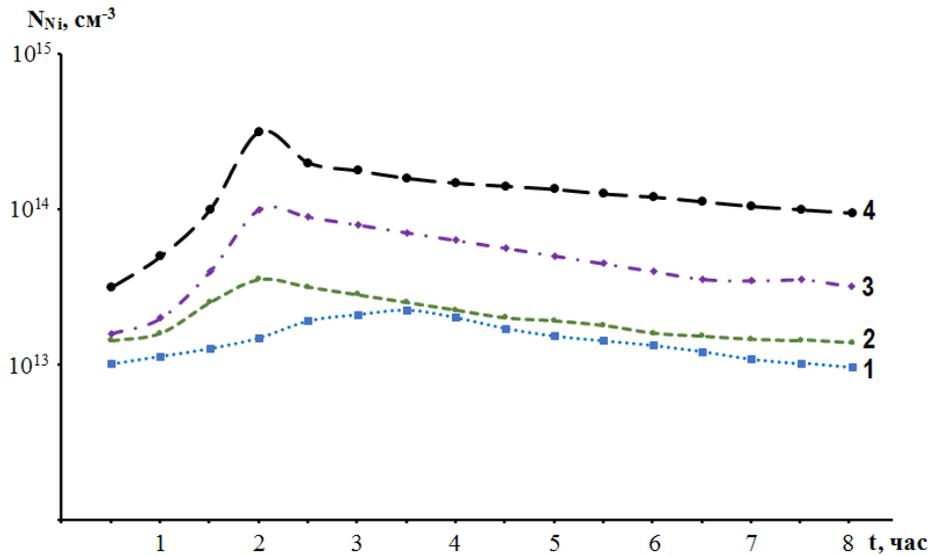


Рис.3. Зависимость концентрации электроактивных атомов никеля в кремнии от времени диффузионного отжига при различных температурах:

1– $T=1273$ К, 2– $T=1373$ К, 3– $T=1473$ К, 4– $T=1523$ К.

Также в данной главе представлены данные о методах исследования морфологических параметров скоплений примесных атомов, образующихся в образцах n- и p-типа $\text{Si}\langle\text{Ni}\rangle$. В частности, для детального изучения размеров, формы, структурного строения и химического состава примесных скоплений никеля были использованы электронно-зондовый микроскоп «Superprobe JXA-8800R» (JEOL) и сканирующий электронный микроскоп JSM-IT200, которые позволяют с высокой точностью измерять эти величины.

В третьей главе «**Структура и состав скоплений примесных атомов никеля в монокристаллах кремния**» приведены результаты экспериментальных исследований по изучению влияния диффузионных параметров на процесс формирования скоплений примесных атомов никеля в монокристаллах кремния, размеров и форм скоплений примесных атомов никеля, их элементного состава и строения, а также структурных свойств однослойных и многослойных скоплений примесных атомов никеля.

Результаты исследований показали, что при диффузионном легировании в объеме образцов кремния, легированных никелем при температуре $T_{\text{дифф}} < 1273$ К, независимо от их типа образование микро - и нановключений примесных атомов не наблюдается. Установлено, что после диффузии при $T_{\text{дифф}} = 1273$ К в образцах n-Si<Ni>, полученных со скоростью охлаждения $v_{\text{охл}} = 200$ К/с образуются нановключения примесных атомов никеля. В образцах, полученных при таких условиях диффузии, наибольший размер примесных нановключений достигает 300 нм и они, в основном, имеют иглообразную и линзообразную форму. В образцах n-Si<Ni>, охлажденных со скоростью $v_{\text{охл}} = 0,05$ К/с, после диффузии при данной температуре образуются

примесные нановключения, имеющие линзообразную и сферическую форму, размеры которых достигают до $300\div 350$ нм (рис.4). Наблюдается, что подобные нановключения образуются на поверхностном слое образца с глубиной $l=200$ мкм.

В образцах $p\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$, полученных в аналогичных условиях, т.е. при температуре диффузии $T_{\text{дифф}}=1273$ К и со скоростью охлаждения $v_{\text{охл}}=0.05$ К/с, в областях, близких к поверхности наблюдается образование нановключений примесных атомов никеля (рис.5). Установлено, что они имеют, в основном, иглообразную и линзообразную форму и их размеры достигают до 250 нм. Выявлено, что такие примесные нановключения образуются в приповерхностном слое на расстоянии до $l=150$ мкм от поверхности образца.



Рис.4. Снимок примесных нановключений, образующихся в образцах $n\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$, охлажденных со скоростью $v_{\text{охл}}=0.05$ К/с после диффузии при $T_{\text{дифф}}=1273$ К.



Рис.5. Снимок примесных нановключений, образующихся в образцах $p\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$, охлажденных со скоростью $v_{\text{охл}}=0.05$ К/с после диффузии при $T_{\text{дифф}}=1273$ К.

Согласно результатам, полученным по плотности распределения примесных скоплений никеля в монокристаллах кремния, по направлению от поверхности к объему, в образцах $n\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$, с медленным охлаждением после диффузии при $T_{\text{дифф}}=1273$ К в течение 2 часов, в приповерхностной области с глубиной $l=200$ мкм, наблюдается образование примесных скоплений, количество которых составляет несколько единиц на 1 см^2 (рис.6). При повышении температуры диффузии до $T_{\text{дифф}}=1373$ К наблюдается образование примесных скоплений в приповерхностной области образцов с глубиной до $l=400$ мкм, а их плотность в области, прилегающей к поверхности, составляет $\sim 10\text{ см}^{-2}$. При температуре диффузии $T_{\text{дифф}}=1473$ К, формирование скоплений примесных атомов никеля наблюдается в приповерхностных областях образцов с глубиной до $l=800$ мкм. Их плотность составляет $\sim 70\div 80\text{ см}^{-2}$. Установлено, что в образцах $n\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$, полученных при $T_{\text{дифф}}=1523$ К, по всему объему образуются примесные скопления никеля. При этом их плотность на участке, прилегающем к поверхности образца ($l=50$ мкм), составляет $\sim 7\cdot 10^2\text{ см}^{-2}$.

Результаты исследований структурного строения, химического состава микро- и нановключений примесных атомов никеля в кремнии показали, что их структура во многом зависит от величины скорости охлаждения — $v_{\text{охл}}$

образцов после диффузионного отжига. На рисунке 7 показаны изображения скоплений атомов никеля в образцах n-Si<Ni>, полученных с медленной (а) и быстрой (б) скоростью охлаждения после диффузии при T=1523 К. При этом скорость охлаждения образцов при быстром охлаждении составляло $v_{\text{охл}}=100$ К/с, а при медленном охлаждении $v_{\text{охл}} \leq 1$ К/с. На снимках видно, что в объеме образцов, полученных при медленном охлаждении, образуются относительно крупные примесные микровключения размером от нескольких сотен нанометров до нескольких микрометров. Такие микровключение имеют, в основном, сферическую форму, а также многослойную структуру с четко разделяющимися границами (рис.7 (а)). По строению многослойных микровключений, каждый слой в них может иметь разные значения толщины.

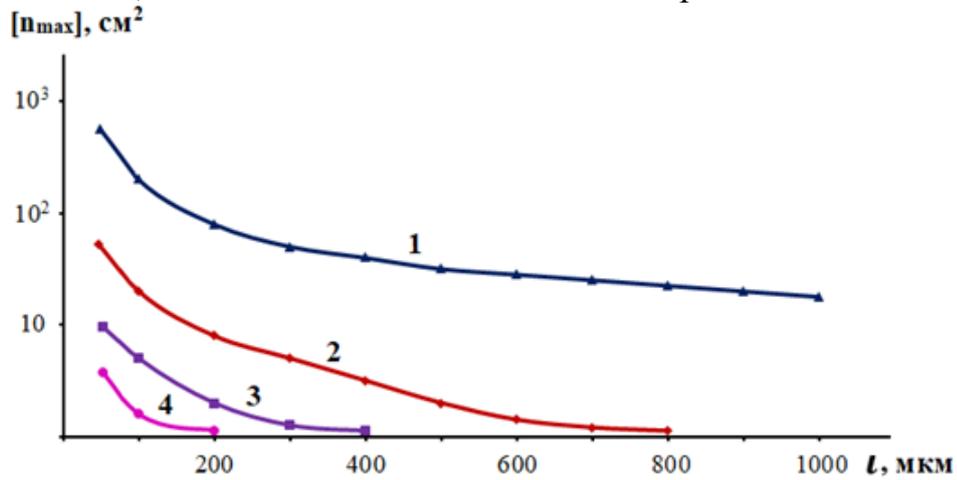


Рис.6. Распределение максимальной плотности скоплений примесей по направлению от поверхности к объему в образцах n-Si<Ni>, охлажденных со скоростью $v_{\text{охл}}=0.05$ К/с после диффузии в интервале температур $T=1273 \div 1523$ К.

При быстром охлаждении в объеме образцов n-Si<Ni> образуются нановключения, имеющие преимущественно однослойную структуру с сравнительно небольшими размерами (до 700-800 нм) (рис.7 (б)).

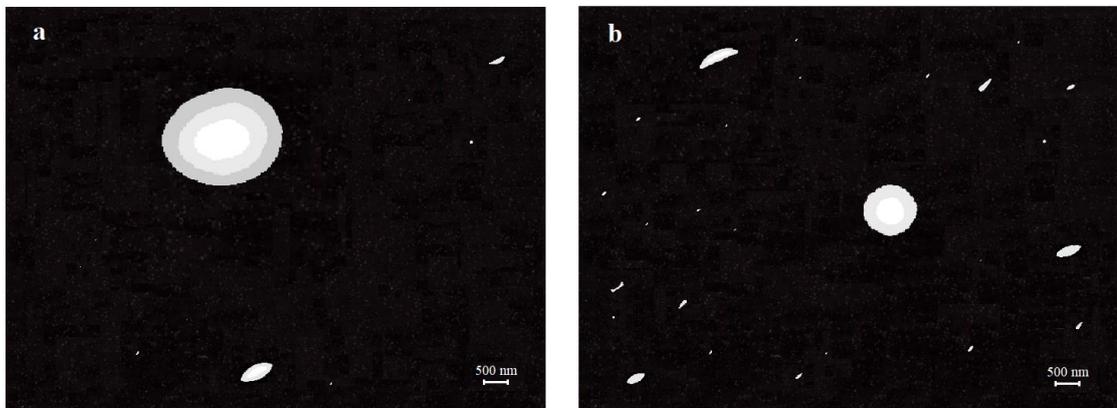


Рис.7. Снимок скоплений примесных атомов в образцах n-Si<Ni>: а—образец с медленным охлаждением ($v_{\text{охл}} \leq 1$ К/с), б— образец с быстрым охлаждением ($v_{\text{охл}}=100$ К/с).

Результаты исследования морфологических параметров микровключений никеля в образцах n-Si<Ni>, охлажденных со скоростью $v_{\text{охл}}=0.05$ К/с после

диффузии при $T=1523$ К в течение 2 часов показали, что размер образующихся в них микровключения никеля достигает до $7\div 8$ мкм, а количество слоев в их структуре еще больше. Результаты анализа химического состава микровключения со сферической формой диаметром $d=7$ мкм, состоящего из пяти слоев, приведены на рисунке 8. Как видно, что в центральном слое данного микровключения процентная доля атомов никеля составляет 73 %, а атомы Si – 25 %. В последующем слое микровключения, расположенном после центральной, это значение для атомов никеля значительно уменьшается и составляет 65 %, а для атомов Si наоборот, увеличивается до 34 %. В следующем слое, расположенном по направлению к поверхности микровключения, доля атомов никеля еще больше уменьшается и составляет 50 %, а атомы Si – 48 %. В последующем слое эти показатели для атомов Ni и Si составляют соответственно 32 % и 67 %. Количественная доля атомов никеля в поверхностном слое данного микровключения составляет 24 %, для атомов Si этот показатель равен 75 %.

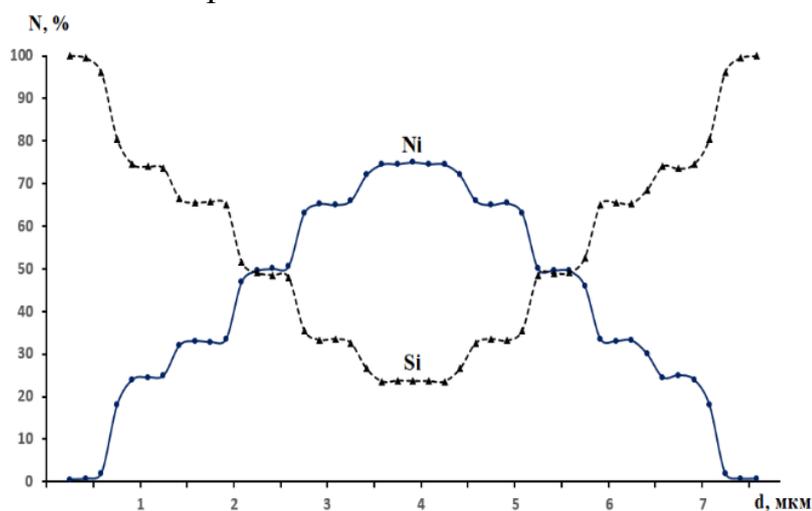


Рис.8. Распределение атомов Ni и Si по объему многослойного микровключения со сферической формой, диаметром $d=7$ мкм в образце $n\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$.

В образцах $p\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$, полученных со скоростью охлаждения $v_{\text{охл}}=200$ К/с после диффузии в течение 2 ч при температуре $T=1523$ К, было обнаружено, что по объему образующихся примесных нановключений никеля примесные атомы распределены равномерно. Распределение атомов Si и основного включения Ni в объеме иглообразный примесных нановключение, имеющей однослойную структуру, размер которой составляет $d=500$ нм, приведено на рис.9.

Результаты исследований по изучению структурного состава примесных скоплений в образцах $n\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$ и $p\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$ показали, что в объеме образующихся примесных микро- и нановключений присутствуют атомы технологических примесей, таких как Fe, Cr, Cu. Путем анализа химического состава трехслойного микровключения никеля со сферической формой, диаметром $d=2.8$ мкм установлено распределение атомов технологических примесей железа и меди в каждом его слое. График зависимости процентной

доли атомов технологических примесей железа и меди от диаметра данного микровключения приведен на рисунке 10. Как видно в центральной части микровключения процентная доля атомов железа составляет 0.3 %, а атомы меди – 0.2 %. В последующем слое микровключения эти значения для атомов Fe и Cu уменьшаются до 0.24 % и 0.15 % соответственно. В поверхностном слое микровключения эти показатели еще больше уменьшаются, и для атомов Fe оно составляет 0.2 %, а для Cu – 0,12 %.

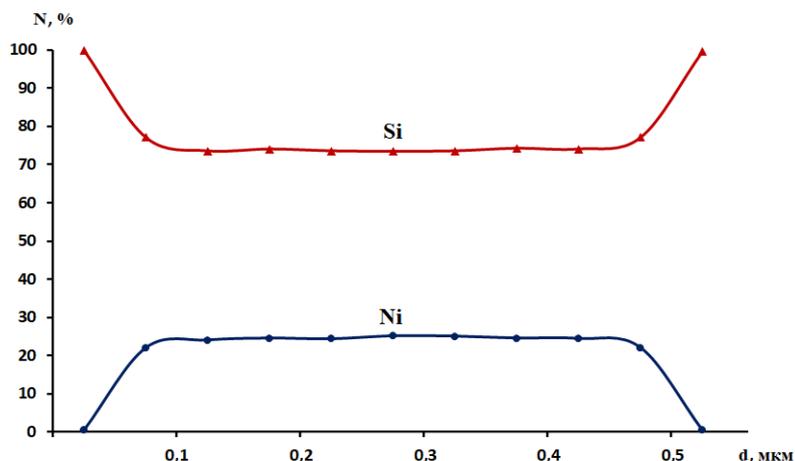


Рис.9. Распределение атомов Si и Ni по объему однослойного нановключения с иглообразной формой, размером $d=500$ нм, в образце p-Si<Ni>.

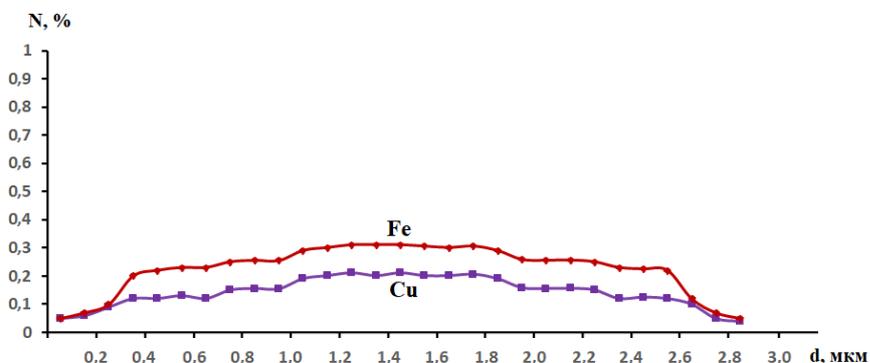


Рис.10. Распределение атомов технологических примесей Fe и Cu по объему многослойного микровключения со сферической формой диаметром $d=2.8$ мкм в образце p-Si<Ni>.

С помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-IT200 исследовано структурное строение и химический состав скоплений примесных атомов в образцах n-Si<Ni> и p-Si<Ni>. При этом ускоряющее напряжение электронов составляло 20 кВ, а давление в камере с образцом – 80 Па. Первоначально для исследований были подготовлены образцы Si<Ni> n- и p-типа. Для получения образцов n-Si<Ni> использовали монокристаллический кремний марки КЭФ, выращенный по методу Чохральского, с удельным сопротивлением 0.3 Ом·см, а для образцов p-Si<Ni> использовали монокристаллический кремний марки КДБ, выращенный методом Чохральского, с удельным сопротивлением 0.3 Ом·см. Диффузия никеля в кремний осуществлялась при $T=1573$ К в течение $t=2$ часов. После

диффузии образцы охлаждали быстрым ($v_{\text{охл}}=200$ К/с) и медленным ($v_{\text{охл}}=1$ К/с) способами охлаждения.

На рис.11 представлено изображение микровключений, образовавшихся в образцах n-Si<Ni>, полученных методом медленного охлаждения. Видно, что в объеме образцов, полученных медленным охлаждением, образуются относительно крупные микровключения, размеры которых достигают до нескольких микрометров. Выявлено, что подобные микровключения, в основном, имеют многослойную структуру с различным химическим составом.

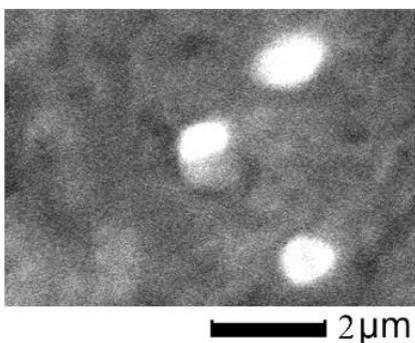


Рис.11. Снимок скоплений примесных атомов в образцах n-Si<Ni>, с медленным охлаждением.

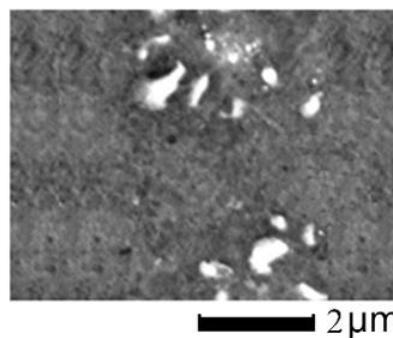


Рис.12. Снимок скоплений примесных атомов в образцах n-Si<Ni>, с быстрым охлаждением.

При изучении состава примесного микровключения, образованного в образце n-Si<Ni> с медленным охлаждением, размером ~ 1.8 мкм со сферической формой, было обнаружено, что в его объеме наряду с атомами Si и Ni присутствуют атомы технологических примесей, такие как железо, хром, кислород и углерод (рис.13). Результаты анализа химического состава данного микровключения показали, что процентная доля атомов Ni в его центральной области составляет – 52.58 %, атомы Si – 45.38 %, атомы железа – 0.42 %, атомы хрома – 0.31 %, атомы кислорода – 0.73 % и атомы углерода – 0.58 %. Выявлено, что в приповерхностной области данного микровключения процентная доля атомов Ni составляет – 24.44 %, атомы кремния – 74.14 %, атомы железа – 0.31 %, атомы хрома – 0.24 %, атомы кислорода – 0.55 %, а также атомы углерода – 0.32 %.

В объеме образцов n-Si<Ni>, полученных методом быстрого охлаждения, наблюдалось образование примесных нано- и микровключений размерами от нескольких сотен нанометров до нескольких микрон (рис.12). При изучении химического состава иглообразного примесного нановключения, размером ~ 700 нм выявлено, что его объеме процентная доля атомов Ni составляет 23.23%, атомы Si – 75.42 %, атомы железа – 0.26 %, атомы хрома – 0.31 %, атомы кислорода – 0.43 % и атомы углерода – 0.35 %.

На рис.14 представлено изображение скоплений примесных атомов в образцах p-Si<Ni>, полученных методом медленного охлаждения. Из них видно, что в объеме данных образцов формируются скопления примесных атомов с размерами от нескольких сотен нанометров до нескольких

микрометров. Относительно крупные микровключения, в основном, имеют многослойную структуру и каждый слой имеет различный химический состав. По результатам анализа химического состава микровключения никеля размером ~ 1 мкм, представленного на рис.14, процентное содержание примесных атомов Ni в его центральной части составляет 51.65 %, атомы Si – 46.32 %, атомы железа – 0.32 %, атомы хрома 0.2 %, атомы кислорода 0.82 % и атомы углерода составляют 0.69 %. В приповерхностной области этого микровключения, процентное содержание атомов Ni составляет 25.46 %, атомы кремния – 73.14 %, атомы железа – 0.21 %, атомы хрома – 0.14 %, атомы кислорода – 0.64 %, а также атомы углерода – 0.41 %.

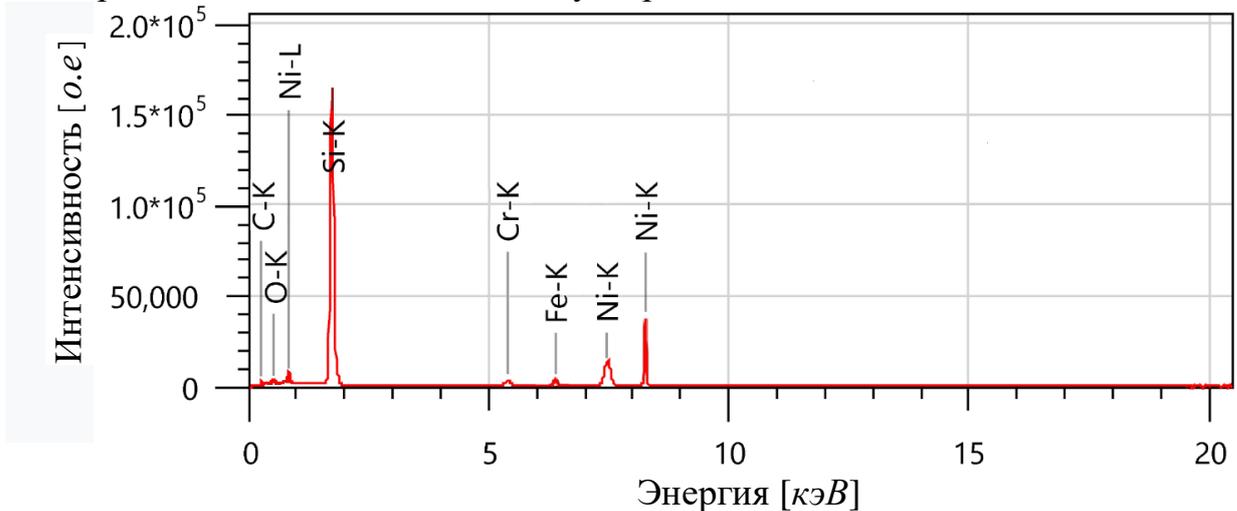


Рис.13. Суммарный спектр элементный состав сферического микровключения никеля размером ~ 1.8 мкм в образце p-Si<Ni>, с медленным охлаждением.

На рис.15 показано изображение нановключений, образующихся в объеме быстро охлажденных образцов p-Si<Ni>. Результаты химического состава наноклучения никеля размером ~ 400 нм показали, что процентное содержание атомов Ni составляет 24.68 %, атомов Si – 73.87 %, атомов железа – 0.22 %, атомов хрома – 0.15 %, атомов кислорода – 0.65 %, а атомов углерода 0.43 %.

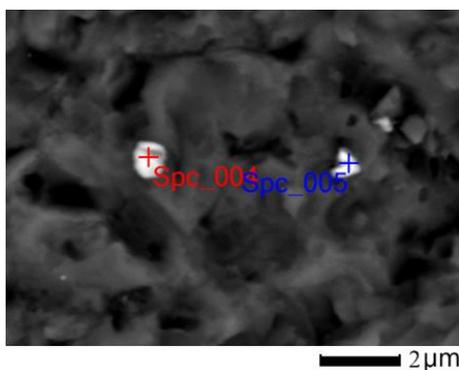


Рис.14. Снимок скоплений примесных атомов в образцах p-Si<Ni>, с медленным охлаждением.

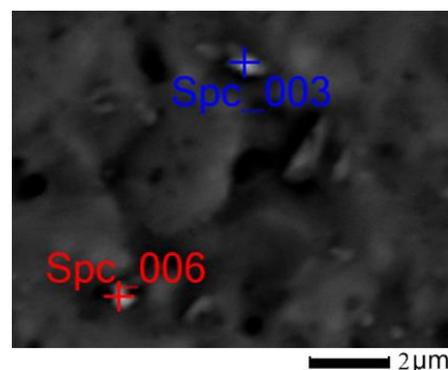


Рис.15. Снимок скоплений примесных атомов в образцах p-Si<Ni>, с быстрым охлаждением.

В четвертой главе «Свойства примесных скоплений никеля в кремнии и влияние на них внешних воздействий» приведены результаты исследований структурных свойств примесных скоплений, образующихся в образцах Si, легированных Ni диффузионным методом, а также по воздействию термического отжига и внешнего всестороннего гидростатического давления на электрофизические параметры кремния, с примесными скоплениями атомов никеля.

Применные нановключения, образующиеся в кремнии, легированном никелем при высоких температурах диффузии ($T \geq 1273$ K), имеют в основном, однослойные, а микровключения имеют многослойную структуру. Примесные микровключения никеля в кремнии имеют двух- и более слоистую структуру и состоят из силицидов типа Ni_xSi_y . А примесные нановключения имеют однослойную структуру и состоят из силицида $NiSi_3$.

С целью исследования влияния термической обработки при различных температурах на удельное сопротивление образцов n-Si<Ni> и p-Si<Ni>, а также изменения морфологии микро- и нановключений никеля под воздействием термической обработки, образцы подвергались изотермической обработке в температурном интервале $T=573 \div 1073$ K, в промежутке времени $10 \div 100$ мин. Удельное сопротивление образцов измерялось после каждой стадии отжига. Структурный анализ образцов после каждого этапа термической обработки проводили методом электронно-зондового микроанализа на установке Superprobe JXA-8800R.

Полученные результаты исследования зависимости удельного сопротивления образцов n-Si<Ni>, с исходным удельным сопротивлением $\rho_0 = 5 \cdot 10^3$ Ом·см от времени термического отжига приведены на рис.16. Такой характер зависимости удельного сопротивления от времени отжига в образцах n-Si<Ni> можно объяснить следующим образом, т. е. с повышением температуры отжига концентрация электроактивных атомов никеля в начальных стадиях отжига увеличивается за счет распада нановключений никеля, в результате которой отделяющиеся атомы переходят в узлы кристаллической решетки. С дальнейшим увеличением времени термического отжига такой переход достигает состояния насыщения, а затем постепенно нарастает процесс перехода атомов никеля из узлов в междоузлия, связанный с образованием электрически неактивных комплексов. В результате этого происходит небольшое снижение значения удельного сопротивления образцов.

Результаты аналогичных исследований с образцами p-Si<Ni>, с исходным удельным сопротивлением $\rho_0 = 8 \cdot 10^3$ Ом·см, представлены на рис.17. Уменьшение, наблюдаемое на начальных стадиях отжига в кривых зависимости удельного сопротивления образцов p-Si<Ni> от времени термического отжига, связано с увеличением концентрации электрически активных примесных атомов никеля в узлах кристаллической решетки. Это увеличение происходит за счет того, что различные комплексы, микро- и нановключение, находящиеся в электрически неактивном состоянии в объеме

образцов до термического отжига, распадаются под воздействием отжига, и содержащиеся в них примесные атомы никеля отделяются и переходят в узлы кристаллической решетки. При дальнейшем увеличении времени термического отжига наблюдается умеренное увеличение значения удельного сопротивления образцов p-Si<Ni> за счет образования электрически неактивных соединений атомов никеля с атомами технологических примесей.

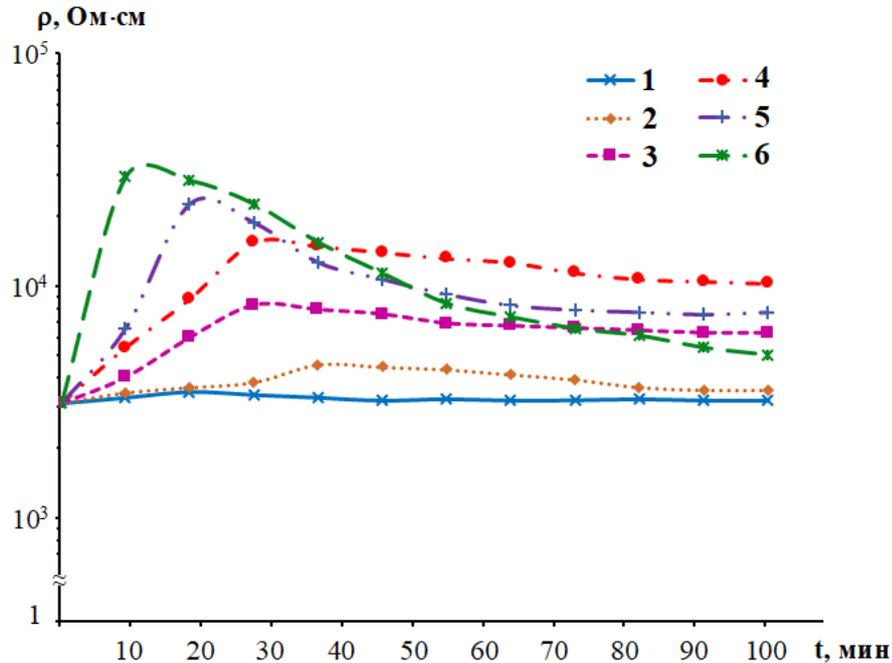


Рис.16. Зависимость удельного сопротивления образцов p-Si<Ni> от времени термического отжига. При этом температуры термического отжига: 1 – 573 К; 2 – 673 К; 3 – 773 К; 4 – 873 К; 5 – 973 К; 6 – 1073 К.

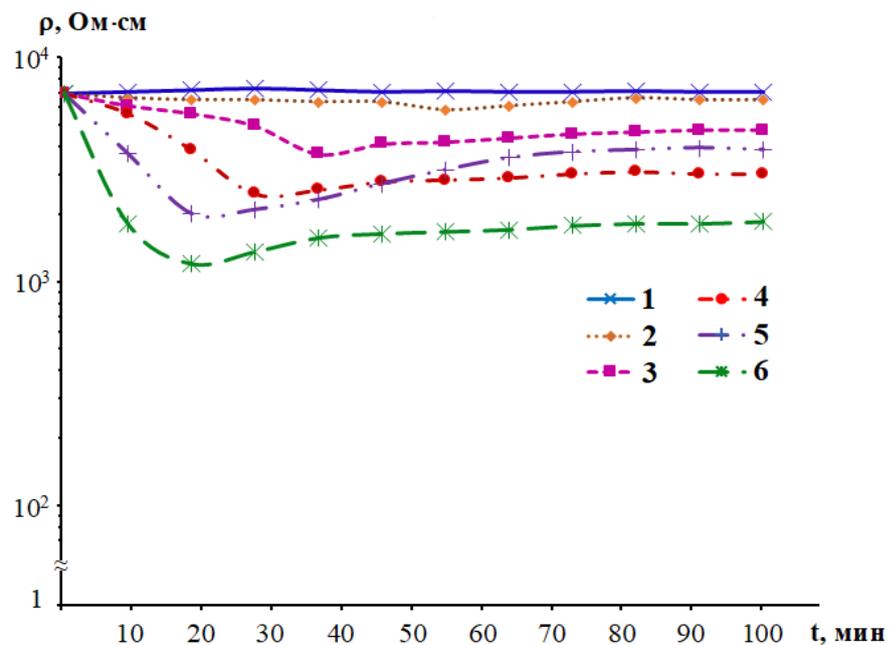


Рис.17. Зависимость удельного сопротивления образцов p-Si<Ni> от времени термического отжига. При этом температуры термического отжига: 1 – 573 К; 2 – 673 К; 3 – 773 К; 4 – 873 К; 5 – 973 К; 6 – 1073 К.

С целью определения причины такого изменения удельного сопротивления образцов Si<Ni> n- и p-типа, под воздействием термического отжига, с помощью электронно-зондового микроанализатора были проведены структурные анализы состояний образующихся в их объеме микро- и нановключений никеля до и после отжига. Получается, что на ранних стадиях термического отжига, в течение различных периодов времени, в зависимости от температуры отжига, в объеме образцов Si<Ni> n- и p-типа уменьшается количество примесных нановключений размером до 500 нм. На рис.18 представлены снимки образца n-Si<Ni>, полученные до (а) и после (б) термического отжига при $T=1073$ К. В нем видно, что количество иглообразных, линзообразных и дискообразных примесных нановключений в образце резко уменьшается после отжига при температуре 1073 К. При этом микровключения, с размерами более 10^{-6} м, и имеющие шарообразную форму сохраняют свою морфологическую структуру, т.е. не подвергаются к распаду.

С целью изучения влияния внешнего давления на морфологию примесных скоплений образцы n-Si<Ni> подвергались к воздействию внешнего всестороннего гидростатического давления (ВГД). Структурный анализ образцов до и после воздействия давления проводился методом электронно-зондовой микроскопии.

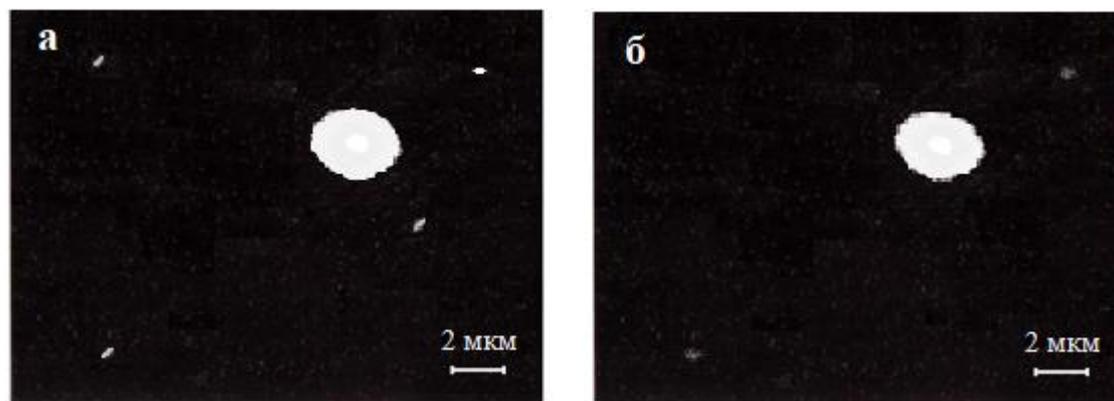


Рис.18. Снимки образца n-Si<Ni> до (а) и после (б) термического отжига при $T=1073$ К.

На рис.19 приведены графики зависимости значения ρ/ρ_0 для исходных образцов n-Si (кривая 1) и n-Si<Ni> (кривая 2), которые подвергались к внешнему ВГД в интервале давления $P=10^8 \div 1.6 \cdot 10^9$ Па при комнатной температуре. При этом значения удельного сопротивления ρ образцов измерялись до и после воздействия ВГД. Полученные результаты показали, что в заданном интервале давлений, для исходных образцов n-Si, в зависимости значения ρ/ρ_0 от ВГД существенные изменения не наблюдаются. В отличие от них под воздействием давления в данном интервале удельное сопротивление образцов кремния, легированных никелем, значительно возрастает.

По результатам исследования влияния внешнего ВГД на удельное сопротивление образцов n-Si<Ni> с начальным удельным сопротивлением $\rho_0=0.3$ Ом·см, полученную зависимость можно разделить на два этапа (Рис.19,

кривая 2). Первый из них наблюдается при начальных значениях давления, т. е. при $P < 4 \cdot 10^8$ Па, при которых значение проб уменьшается на $\sim 30\%$. При дальнейшем увеличении значения ВГД ($P \geq 4 \cdot 10^8$ Па) наблюдается вторая стадия, приводящая к увеличению удельного сопротивления образцов “скачкообразным” характером. При увеличении значения ВГД с $4 \cdot 10^8$ Па до $6 \cdot 10^8$ Па происходит резкое увеличение значения ρ/ρ_0 образцов, а при достижении $P = 6 \cdot 10^8$ Па это значение увеличивается почти в 8 раз. Дальнейшее увеличение значения ВГД до $P = 10^9$ Па не приведет к значительному изменению значения ρ/ρ_0 . При последующих значениях давления ($P > 10^9$ Па) снова происходит резкое увеличение значения ρ/ρ_0 . При достижении значения давления $P = 1.2 \cdot 10^9$ Па, значение ρ/ρ_0 увеличивается в 10 раз. При последующем увеличении значения ВГД удельное сопротивление образцов существенно не изменяется.

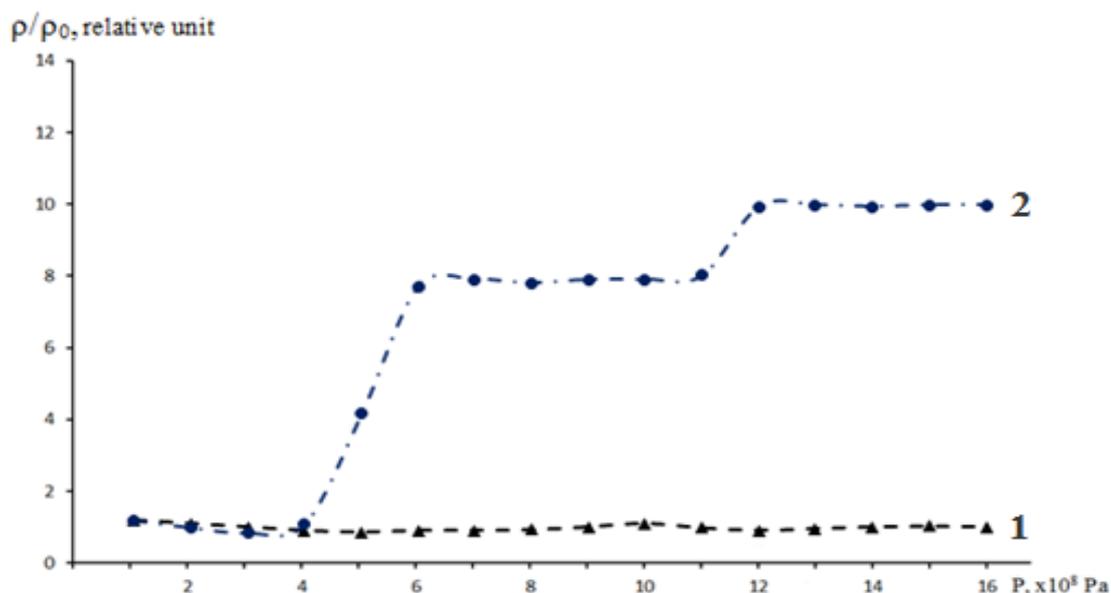


Рис.19. Зависимость значения ρ/ρ_0 образцов от ВГД: 1 – исходные n-Si; 2 – n-Si<Ni> образцы.

Такое характерное изменение удельного сопротивления под действием ВГД в образцах n-Si<Ni> можно объяснить сужением ширины запрещенной зоны вследствие сдвига энергетических уровней, вследствие деформации кристаллической структуры кремния при начальных значениях давления до $P = 4 \cdot 10^8$ Па. В результате этого происходит увеличение концентрации носителей заряда в объеме образца и уменьшение удельного сопротивления. Особый интерес представляют последующие резкие увеличения значения удельного сопротивления образцов при определенных значениях давления. Такое резкое увеличение удельного сопротивления образцов при определенных значениях внешнего давления во многом обусловлено образованием в их объеме дополнительных центров захвата носителей заряда. Такие центры появляются в результате распада примесных скоплений никеля под воздействием определенных значений давления. Именно под воздействием внешнего давления примесные атомы никеля, ранее находившиеся в объеме скоплений в электрически неактивных состояниях, в

результате распада отделяются от скоплений и переходят в электрически активные состояния. В результате происходит резкое увеличение удельного сопротивления образцов.

С целью выяснения причины таких изменений значения удельного сопротивления образцов $n\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$ под воздействием ВГД, исследованы морфологические параметры примесных скоплений до и после воздействия давления. Сравнительный анализ скоплений примесных атомов никеля в объемах кремниевых образцов показал, что под воздействием ВГД при значении равном $P=6\cdot 10^8$ Па, происходит распад мелких (до 1 мкм) нановключений никеля с иглообразной и дискообразной формой (рис.20).

Кроме того, на этом снимке можно наблюдать распад относительно крупных ($d\geq 1$ мкм) микровключение никеля, имеющих линзообразную и сферическую форму, под действием ВГД при значении $P=1.2\cdot 10^9$ Па. Следует отметить, что в этом случае также наблюдается разложение поверхностных слоев некоторых примесных микровключений никеля, имеющих многослойную структуру. В свою очередь тот факт, что зависимость удельного сопротивления ВГД от давления при значениях $P>4\cdot 10^8$ Па носит необратимый характер, свидетельствует о том, что это изменение происходит именно за счет распада примесных микро - и нановключений.

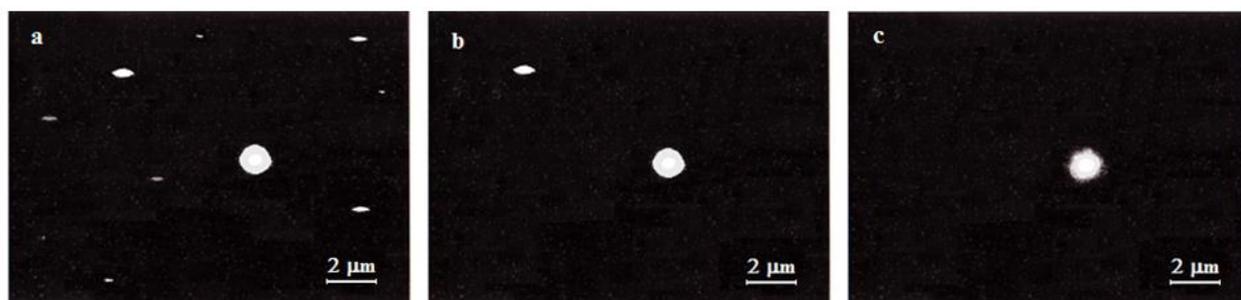


Рис.20. Влияние ВГД на скопления никеля в кремнии: а – до воздействия ВГД, б – $P=6\cdot 10^8$ Па, с – $P=1.2\cdot 10^9$ Па.

Таким образом, небольшое уменьшение удельного сопротивления образцов $n\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$ под воздействием ВГД при ее начальных значениях $P\leq 4\cdot 10^8$ Па, связано с уменьшением ширины запрещенной зоны за счет сдвига энергетических уровней вследствие деформации кристаллической структуры кремния. В результате этого происходит увеличение концентрации носителей заряда в объеме образца, которое приводит к уменьшению значения удельного сопротивления. Установлено, что под воздействием ВГД при $P=6\cdot 10^8$ Па, происходит распад относительно небольших по размеру (до 1 мкм) примесных нановключений никеля с иглообразной и дискообразной формой. Это приводит к резкому увеличению значения удельного сопротивления образцов $n\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$ до 8 раз. Воздействие ВГД со значением $P=1.2\cdot 10^9$ Па приводит к распаду многослойных примесных микровключений никеля, имеющих линзообразную и сферическую форму, которые имеют относительно большие размеры. В результате значение удельного сопротивления образцов снова резко возрастает, и оно составляет почти в 10 раз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Определен оптимальный технологический режим формирования микро- и нановключений примесных атомов в кремнии, легированного никелем, диффузионным методом, согласно которому температура диффузии составляет $T \geq 1273$ К, а время диффузии $t = 2 \div 4$ часа.

2. Впервые было выявлено, что примесные нановключения никеля, которые образуются в кремнии, в основном, имеют однослойную структуру, а примесные микровключения имеют многослойную структуру, а также процентная доля атомов никеля по объему нановключений составляет ~ 25 %, в центральном слое микровключений этот показатель достигает ~ 73 %.

3. Установлено, что примесные микровключения никеля, образующиеся в кремнии состоят из двух или более слоев силицидов типа Si_xNi_y , которые отличаются друг от друга своим химическим составом и кристаллической структурой.

4. Выявлено, что в объеме примесных нановключений атомы никеля распределены равномерно, образуют силицид типа Si_3Ni с гексогональной кристаллической структурой и имеют иглообразную (< 500 нм), дискообразную (< 500 нм) и линзобразную (< 700 мкм) форму.

5. Выявлено, что в объеме примесных микро- и нановключений, образующиеся в кремнии, легированном никелем, методом диффузии при температурах $T \geq 1273$ К, помимо атомов основной примеси присутствуют также и атомы технологических примесей (Fe, Cu, Cr и т.д.) и их количество составляет $0.01 \div 0.001$ % от количества атомов основной примеси.

6. Установлено, что в результате термического отжига при температуре $T = 1073$ К примесные нановключения никеля, в образцах $n-Si \langle Ni \rangle$ распадаются в течение 10 минут, а в образцах $p-Si \langle Ni \rangle$ в течение $15 \div 20$ минут.

7. Установлено, что в образцах $n-Si \langle Ni \rangle$ под воздействием внешнего гидростатического давления со значением $P = 6 \cdot 10^8$ Па распадаются иглообразные, дискообразные и линзообразные примесные нановключения, размеры которых достигают ~ 700 нм, а под влиянием давления $P = 1.2 \cdot 10^9$ Па распадаются линзообразные и сферические нано- и микровключения с размерами до ~ 1 мкм.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 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**

BERKINOV ELMUROD KHOSHIMJONOVICH

**STRUCTURAL PROPERTIES OF MICRO- AND NANOCINCLUSIONS OF
IMPURITY NICKEL ATOMS IN SILICON SINGLE CRYSTALS**

01.04.10 - Physics of semiconductors

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

Tashkent – 2023

The theme of the dissertation of the doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences was registered by the Supreme Attestation Commission under the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2020.2.PhD/FM477.

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) languages on the website of the Scientific Council at www.ispm.uz and on the website of "Ziyo" Educational Portal at www.zivonet.uz.

Scientific supervisor: **Turgunov Nozimjon Abdumannopovich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, assistant professor

Official opponents: **Rakhmatov Akhmad Zainiddinovich**
Doctor of technical sciences, professor

Gulyamov Gofur
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor

Leading organization: **Karakalpak State University**

The defense of the doctoral dissertation will be held on "20" 04 2023, at 12⁰⁰ at the meeting of the Scientific Council No DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 at the Scientific Research Institute of Physics of Semiconductors and Microelectronics of the National University of Uzbekistan (Address: 20 Yangi Olmazor str., 100057 Tashkent city, Uzbekistan. Tel. (+99871) 248-79-94, fax: (+99871) 248-79-92, e-mail info@ispm.uz)

The doctoral dissertation can be looked through in the ICT Implementation Unit (registered under No. 45). 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 "07" 04 2023.
(Registry record No. 45 dated "07" 04 2023)



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

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

INTRODUCTION (abstract of the PhD dissertation)

The aim of the study is to determine the structural friction, elemental composition and sequence of decomposition of impurity micro- and nano-inclusions in nickel-doped silicon under external influences (temperature, pressure).

The objectives of the research:

study of the dependence of the size, shape, and structural structure of nickel impurity accumulations in silicon on diffusion parameters;

determination of the composition of impurity micro- and nano-inclusions in nickel-doped silicon;

study of the influence of impurity micro- and nano-inclusions on the electrophysical properties of nickel-doped silicon;

analysis of the interaction of the main and technological impurity atoms in the process of diffusion doping of silicon with nickel;

to study the sequence of decay of impurity accumulations in Si<Ni> samples under the influence of external influences (temperature, pressure).

The object of the study are n- and p-type Si<Ni> samples with impurity micro- and nano-inclusions.

The scientific novelty of the research is as follows:

it was found that when doping a single crystal of silicon with nickel, by the diffusion method, at temperatures $T \geq 1273$ K for $t = 2 \div 4$ hours, impurity micro- and nano-inclusions are formed in its volume;

it was established for the first time that the structural structure of nickel impurity accumulations formed in silicon mainly depends on their size, i.e. single layer at $d < 1 \mu\text{m}$ and multilayer at $d \geq 1 \mu\text{m}$;

by analyzing the chemical composition of micro- and nano-inclusions of nickel formed in silicon, using the method of electron microscopy, it was revealed that the number of atoms of technological impurities (Fe, Cu, Cr and others) in them is $0.01 \div 0.001\%$ of the atoms of the main impurity;

it was found that at the temperature of thermal annealing $T = 1073$ K, nickel nano-inclusions in n-Si<Ni> samples decompose within 10 minutes, and in p-Si<Ni> samples within $15 \div 20$ minutes;

it was found that under the influence of an external all-round hydrostatic pressure $P = 6 \cdot 10^8$ Pa in n-Si<Ni> samples, impurity nano-inclusions with a disk-shaped and lenticular shape, up to ~ 700 nm in size, disintegrate, and under the influence of pressure $P = 1.2 \cdot 10^9$ Pa impurity micro- and nano-inclusions $\sim 1 \mu\text{m}$ in size, which have a lenticular and spherical shape, disintegrate.

Implementation of research results.

Based on the obtained scientific results on the control of the electrophysical properties of monocrystalline silicon having micro- and nano-inclusions of impurity nickel atoms by external influences:

certain optimal technological conditions for alloying silicon with nickel admixture, at which impurity micro- and nano-inclusions are formed, given sizes and structural structures, as well as established values of the content of atoms of

technological impurities (Fe, Cu, Cr, etc.) in the composition of micro- and nickel nanoclusters formed in silicon at high temperature ($T \geq 1273$ K) diffusion alloying, which amount to 0.01÷0.001 % of the number of atoms of the main impurity 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 No.150-01-39/583 dated November 14, 2022 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 atoms;

the revealed dependences of the structural structures of clusters of impurity nickel atoms in silicon on the values of the diffusion temperature and the cooling rate of samples after diffusion: at diffusion temperatures $T \geq 1273$ K, the formation of impurity nanoclusters with sizes up to several hundred nanometers is observed in fast-cooled (≥ 200 K/s) samples, and in samples with slow cooling (≤ 1 K/c) impurity microinclusions with sizes up to 10 microns are formed; the decay of impurity nickel nanoclusters at thermal annealing temperature $T = 1073$ K in samples of n-Si<Ni> occurs within 10 minutes, and in samples of p-Si<Ni> within 15÷20 minutes were used in the Joint Stock Company "FOTON" in the manufacture of semiconductor electronic devices based on silicon (Reference No.04-3/2558 dated December 9, 2022 AK Uzeltehsanoat). The use of scientific results made it possible to control the electrophysical parameters of experimental samples of nickel-doped silicon 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 105 pages, including 52 figures and 4 tables.

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

I bo'lim (I часть; part I)

1. Turgunov N.A., Berkinov E.Kh., Turmanova R.M. Influence of heat treatment on the electrical properties and morphology of impurity accumulations of silicon doped with nickel // Science and world. 2022, vol.2, №4(104). pp.25-29. (№5; GIF:0.325).

2. Зайнабидинов С.З., Тургунов Н.А., Беркинов Э.Х., Турманова Р.М. Структурообразование примесных преципитатов никеля в кремнии // Физика полупроводников и микроэлектроника. 2021, том 3, №3, с.8-12. (01.00.00; №16).

3. Тургунов Н.А., Беркинов Э.Х., Акбаров Ш.К. Формирование скоплений примесных атомов никеля и кобальта в монокристаллах кремния // Scientific bulletin Physical and mathematical research. 2021. vol.3, iss.2, pp.5-12. (01.00.00; №13).

4. Turgunov N.A., Mamajonova D.Kh., Berkinov E.Kh. Decay of impurity clusters of nickel and cobalt atoms in silicon under the influence of pressure // Journal of nano- and electronic physics. 2021. vol.13, №5. pp.05006-1(4). (№3; Scopus).

5. Зайнабидинов С.З., Тургунов Н.А., Беркинов Э.Х., Акбаров Ш.К., Мамажонова Д.Х. Распределение примесных атомов по объему микровключений в образцах n-Si<Ni> // Физика полупроводников и микроэлектроника. 2021, том 3, №1, с.10-15. (01.00.00; №16)

6. Turgunov N., Zainabidinov S., Berkinov E., Akbarov, Sh. Influence of the clusters of impurient nickel atoms on the crystalline silicon structure // Euroasian Journal of Semiconductors science and engineering. 2020, vol.2, №5. pp.19-21. (01.00.00; №16)

7. Тургунов Н.А., Беркинов Э.Х., Мамажонова Д.Х. Влияние термической обработки кремния, легированного никелем, на его электрические свойства // Прикладная физика. 2020. №3. с.40-45. (№3; Scopus)

8. Turgunov N.A., Berkinov E.Kh. Structures of inclusions of impurity nickel atoms in silicon monocrystals // International journal of engineering and advanced technology (IJEAT). 2020, vol.9, №4, pp.1436-1439. (№5; GIF, IF:0.676)

II bo'lim (II часть; part II)

9. Berkinov E.X., Turmanova R.M., Turgunov N.A., Botirova I.K. n-Si<Ni> namunalarida kirishma mikro- va nanobirikmalarining morfologiyasini o'rganish // "Zamonaviy yarimo'tkazgichlar fizikasi rivojlanishining tendentsiyalari: yutuqlar, muammolar va istiqbollari" mavzusida II Xalqaro ilmiy konferentsiya materiallari to'plami. 2022 y. 27-28 dekabr, Toshkent, 40-42-b.

10. Turgunov N.A., Berkinov E.X., Ruzmetov R.R., Madaliyeva L.E. Nikel

bilan legirlangan kremniydagi kirishma to'plamlarining tarkibiy tuzilishini o'rganish // "Zamonaviy yarimo'tkazgichlar fizikasi rivojlanishining tendentsiyalari: yutuqlar, muammolar va istiqbollari" mavzusida II Xalqaro ilmiy konferentsiya materiallari to'plami. 2022 y. 27-28 dekabr, Toshkent, 361-364-b.

11. Turgunov N.A., Turmanova R.M., Berkinov E.X., Botirova I.K. n-Si<Ni,Cu> namunalarning elektrofizik xususiyatlarini tadqiq qilish // "Zamonaviy yarimo'tkazgichlar fizikasi rivojlanishining tendentsiyalari: yutuqlar, muammolar va istiqbollari" mavzusida II Xalqaro ilmiy konferentsiya materiallari to'plami. 2022 y. 27-28 dekabr, Toshkent, 23-25-b.

12. Turgunov N.A., Berkinov E.X. n-Si<Ni> namunalarida kirishma to'plamlari hosil bo'lish jarayoniga diffuziya kattaliklarining ta'siri // «Science and innovation 2022». Yosh olimlarning xalqaro ilmiy konferensiyasi materiallari to'plami. 2022 y., 20 oktyabr, Toshkent, 370-371-b.

13. Turgunov N.A., Berkinov E.X., Asatova U.P., Botirova I.K. p-Si<Ni> namunalarida kirishma mikrobirikmalari tuzilishi va kimyoviy tarkibi // «Fotonika muammolari va rivojlanish istiqbollari» Respublika ilmiy-amaliy anjumani materiallari. 2022 y., 27-28 may, Urganch, 291-294-b.

14. Turgunov N.A., Berkinov E.X., Ruzmetov R.R., Botirova I.K. Diffuziya kattaliklarining kremniydagi kirishma nikel atomlari holatiga ta'siri // Yosh olimlar va fizik talabalarning II Respublika ilmiy anjumani (YoOFTRIA-II) materiallari to'plami. 2022 yil 20-21 may, Toshkent, 35-37-b.

15. Turgunov N.A., Berkinov E.X., Turmanova R.M., Ruzmetov R.R. Diffuziya haroratining kremniydagi nikel kirishmasi eruvchanligiga ta'siri // Yosh olimlar va fizik talabalarning II Respublika ilmiy anjumani (YoOFTRIA-II) materiallari to'plami. 2022 yil 20-21 may, Toshkent, 24-25-b.

16. Тургунов Н.А., Беркинов Э.Х., Турманова Р.М., Нурмирзаева Д.Х., Мадалиева Л.Э. Морфология скоплений примесных атомов никеля в образцах p-Si<Ni> // Сборник материалов Республиканской научно-практической конференции, посвященной 75-летию со дня рождения академика А.Т.Мамадалимова с участием зарубежных ученых на тему «Актуальные проблемы физики полупроводников и полимеров». 1 февраля 2022 г., Ташкент, с. 37-39.

17. Turgunov N.A., Berkinov E.Kh., Turmanova R.M., Nurmirezayeva D.Kh. Structural formation and elemental composition of nickel and cobalt impurity accumulation in silicon // Actual Problems of Solid-State Physics: proc. Book IX Intern. Scient. Conf., Minsk, 22-26 November, 2021. pp.135-137

18. Тургунов Н.А., Беркинов Э.Х., Турманова Р.М. Распределение атомов технологических примесей по объему примесных скоплений никеля в кремнии // Материалы I-Международной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы физики полупроводников, микро- и наноэлектроники». 28-29 октября 2021 г., Ташкент, с. 158-160.

19. Тургунов Н.А., Беркинов Э.Х., Вахабов К.И., Нурмирзаева Д.Х. Морфологические параметры примесных микровключений никеля в образцах n-Si<Ni> // Сборник материалов Республиканской научно-практической

конференции на тему «Актуальные проблемы физики полупроводниковой микроэлектроники, нанотехнологий и альтернативных источников энергии». 7-8 октября 2021 г., Андижан, с. 18-19.

20. Зайнабидинов С.З., Тургунов Н.А., Беркинов Э.Х., Турманова Р.М. Влияние скоплений примесных атомов никеля на кристаллическую структуру монокристаллов кремния // Сборник материалов Республиканской научно-практической конференции на тему «Актуальные проблемы физики полупроводниковой микроэлектроники, нанотехнологий и альтернативных источников энергии». 7-8 октября 2021 г., Андижан, с. 6-8.

21. Zaynabidinov S.Z., Turgunov N.A., Berkinov E.X. Formation of nickel and cobalt impurities nano-inclusions in silicon // “Yarimo‘tkazgichlar fizikasi, mikro va nanoelektronika: fan, ta’lim va ishlab chiqarish integratsiyasi istiqbollari” mavzusidagi Respublika ilmiy anjumani materiallari to‘plami. 2021 yil 21-22 may, Toshkent, 8-10-b.

22. Тургунов Н.А., Беркинов Э.Х., Вахабов К.И., Мамажонова Д.Х. Особенности структурных строений скоплений примесных атомов никеля в кремнии // Сборник материалов международной научно-практической конференции на тему «Роль альтернативных источников энергии в развитии энергетики». 24-25 апреля 2021 г., Наманган, с. 108-111.

23. Turgunov N.A., Berkinov E.X., Vaxabov K.I., Akbarov Sh.K. Formation of vacancy pores in Si during high-temperature annealing // Yosh olimlar va fizik talabalarning I Respublika ilmiy anjumani (YoOFTRIA-I) materiallari to‘plami. 2021 yil 21 aprel, Toshkent, 46-48-b.

24. Зайнабидинов С.З., Тургунов Н.А., Беркинов Э.Х., Акбаров Ш.К., Мамажонова Д.Х. Morphology of impurable microwaves nickel and cobalt in silicon single crystals // Сборник материалов Республиканской научно-методической конференции, посвященной 75-летию со дня рождения академика С.З. Зайнабидинова «Интеграция науки, образования и инноваций в развитии современной микроэлектроники». 24-25 декабря 2020 г., Андижан, с. 218-220.

25. Зайнабидинов С.З., Тургунов Н.А., Беркинов Э.Х., Акбаров Ш.К., Мамажонова Д.Х. Ассоциированные скопления примесных атомов никеля в кремнии // Сборник материалов Республиканской научно-методической конференции, посвященной 75-летию со дня рождения академика С.З. Зайнабидинова «Интеграция науки, образования и инноваций в развитии современной микроэлектроники». 24-25 декабря 2020 г., Андижан, с. 191-192.

26. Тургунов Н.А., Беркинов Э.Х., Рахмонов А.Ш, Мамажонова Д.Х. Влияние микровключений никеля и кобальта на механические свойства монокристаллов кремния // Материалы V международной конференции по Оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро- и наноструктурах. 13-14 ноября 2020 г., ФерПИ., с. 67-68.

27. Тургунов Н.А., Беркинов Э.Х., Рахмонов А.Ш, Мамажонова Д.Х. Формирование примесных микровключений Ni и Co в Si // Материалы V Международной конференции по Оптическим и фотоэлектрическим явлениям

в полупроводниковых микро- и наноструктурах. 13-14 ноября 2020 г., ФерПИ., с. 65-67.

28. Тургунов Н.А., Беркинов Э.Х., Акбаров Ш.К. Структурные строения примесных микровключений никеля в кремнии // Сборник материалов международной научной конференции "Наноструктурные полупроводниковые материалы в фотоэнергетике". 9-10 октября 2020 г., Ташкент, с. 172-174.

29. Тургунов Н.А., Беркинов Э.Х., Акбаров Ш.К., Мамажонова Д.Х. Исследование структурного строения примесных микровключений в образцах $n\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$ // Сборник материалов Республиканской научно-практической конференции на тему «Интеграция науки, образования и производства». 22-23 сентября 2020 г., КарГУ, с. 257-259.

30. Тургунов Н.А., Беркинов Э.Х., Акбаров Ш.К., Мамажонова Д.Х. Скопления примесных атомов Ni в Si // Сборник материалов международной научной конференции «Инновационные проблемы технических и технологических наук». 22 сентября 2020 г., Термезский филиал ТДГУ, с. 262-264.

31. Беркинов Э.Х., Рахмонов А.Ш, Мамажонова Д.Х. Структурообразования примесных микровключений никеля и кобальта в кремнии // Сборник материалов Республиканской научно-теоретической конференции на тему «Инновационные реформы в системе образования: с точки зрения ученых и молодежи». 17 июня 2020 г., Ташкент, с. 108-110.

32. Тургунов Н.А., Беркинов Э.Х., Рахмонов А.Ш, Мамажонова Д.Х. Кинетика роста сферических микровключений примесных атомов никеля и кобальта в кремнии // Сборник материалов онлайн-конференции на тему «Научно-практические исследования по актуальным вопросам развития непрерывного образования в Узбекистане». 8 июня 2020 г., НамИСИ, с. 360-361.

33. Тургунов Н.А., Зайнабидинов С.З., Беркинов Э.Х., Акбаров Ш.К. Влияние скоплений примесных атомов никеля на кристаллическую структуру кремния // «Тенденции развития современной физики полупроводников: проблемы, достижения и перспективы», Сборник материалов международной научно-рецензируемой конференции, Ташкент, 28 мая 2020 г., с.109-113

34. Тургунов Н.А., Беркинов Э.Х., Мамажонова Д.Х. Изучение морфологии скоплений примесных атомов никеля в монокристаллах кремния // Сборник материалов республиканской научно-практической конференции на тему «Современное состояние и перспективы использования альтернативных источников энергии». 22-23 апреля 2020 г., НамИСИ, с. 249-250.

Avtoreferat “Til va adabiyot ta’limi” jurnali taxririya-tadqiqotida taxrirdan o‘tkazildi va o‘zbek, rus va ingliz tillaridagi matnlarini mosligi tekshirildi (07.04.2023 yil).

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

Shartli bosma tabog‘i: 3,75. Adadi 60. Buyurtma №41.

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.

