

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

**QORAQALPOQ DAVLAT UNIVERSITETI
TOSHKENT DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI**

KOSBERGENOV ERNAZAR JUSIPBAY O‘G‘LI

**NIKEL BILAN LEGIRLANGAN KREMNIY VA UNING ASOSIDAGI
FOTOELEMENTLAR PARAMETRLARIGA HARORAT VA GAMMA
NURLANISHNING TA‘SIRI**

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**

Kosbergenov Ernazar Jusipbay o'g'li

Nikel bilan legirlangan kremniy va uning asosidagi fotoelementlar parametrlariga harorat va gamma nurlanishning ta'siri..... 3

Косбергенов Ерназар Жусипбай улы

Влияние температуры и гамма облучения на параметры кремния, легированного никелем и фотоэлементов на его основе..... 21

Kosbergenov Ernazar Jusipbay uly

Influence of temperature and gamma irradiation on the parameters of silicon doped with nickel and photocells based on it 39

E'lon qilingan ishlar ro'yxati

Список опубликованных работ
List of published works 43

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

**QORAQALPOQ DAVLAT UNIVERSITETI
TOSHKENT DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI**

KOSBERGENOV ERNAZAR JUSIPBAY O‘G‘LI

**NIKEL BILAN LEGIRLANGAN KREMNIY VA UNING ASOSIDAGI
FOTOELEMENTLAR PARAMETRLARIGA HARORAT VA GAMMA
NURLANISHNING TA‘SIRI**

01.04.10 – Yarimo‘tkazgichlar fizikasi

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

Toshkent – 2023

Falsafa doktori (PhD) dissertatsiya mavzusi O‘zbekiston Respublikasi Oliy ta’lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2022.4.PhD/FM769 raqam bilan ro‘yxatga olingan.

Dissertatsiya Berdaq nomidagi Qoraqalpoq davlat universiteti va Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universitetida bajarilgan.

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

Ilmiy rahbar:

Ismaylov Qanatbay Abdreymovich
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Rasmiy opponentlar:

Turgunov Nozimjon Abdumannopovich
fizika-matematika fanlari doktori, dotsent

Yo‘lchiev Shaxriyor Xusanovich
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Yetakchi tashkilot:

Namangan davlat universiteti

Dissertatsiya himoyasi O‘zbekiston Milliy universiteti huzuridagi Yarimo‘tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti huzuridagi ilmiy darajalar beruvchi DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 raqamli Ilmiy kengashning 2023-yil « 07 » 09 soat 12-00 dagi majlisida bo‘lib o‘tadi. (Manzil: 100057, O‘zbekiston, Tashkent sh., Yangi Olmazor ko‘chasi, 20-uy, Tel.: (+99871)248-79-94, faks: (+99871)248-79-92, e-mail: info@ispm.uz.)

Dissertatsiya bilan Raqamli ta’lim texnologiyalarini joriy etish bo‘limida tanishish mumkin. (54-raqam bilan ro‘yxatga olingan). (Manzil: 100057, O‘zbekiston, Toshkent shahri, Yangi Olmazor ko‘chasi, 20-uy. Tel.: (+99871) 248-79-59; e-mail: info@ispm.uz).

Dissertatsiya avtoreferati 2023-yil « 25 » 08 kuni tarqatildi.
(2023-yil « 25 » 08 dagi 54-raqamli reestr bayonnomasi).



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

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

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

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Hozirgi kunda jahonda qo‘shimcha energiya resurslariga talab oshishi tufayli, kremniy asosidagi fotoelementlar (FE) keng ko‘lamda foydalanib kelinmoqda. Ular orasida monokristall kremniy (mono-Si) va polikristall kremniy (poli-Si) asosidagi FEarning tashqi ta’sirlarga sezgirligi yuqori hisoblanadi. Shu sababli, harorat va radiatsiyaning FEarning parametrlariga, mustahkamligiga, turg‘un ishlashiga ta’sirini o‘rganish dolzarb masalalardan biri hisoblanadi.

Dunyo miqyosidagi ilg‘or ilmiy markazlarda, yarimo‘tkazgichli birikmalar asosidagi, ko‘pkaskadli, samaradorligi yuqori bo‘lgan FElar yaratilmoqda. Lekin, ularni ishlab chiqarish texnologiyasi murakkab va qimmat xomashyo va uskunalarni talab qiladi. Dunyo bozorida ishlab chiqarilishi bo‘yicha poli-Si asosidagi FEarning ulushi 52,9 % ni, mono-Si asosidagi FEarning ulushi 33,2 % ni va amorf kremniy asosidagi FEarning ulushi 13,9 % ni tashkil qiladi. Nisbatan arzonligi tufayli poli-Si asosidagi FElar va yarimo‘tkazgichli qurilmalar yaratish dunyoda yuqori o‘rinni egallab kelmoqda. Shu sababli, samaradorligi yuqori bo‘lgan poli-Si asosidagi FEarni yaratish muhim ahamiyat kasb etadi.

Respublikamizda yarimo‘tkazgichlar fizikasi sohasini rivojlantirish, xususan, jahon andozalari talablariga javob beradigan arzon FElar va yarimo‘tkazgichli qurilmalar yaratish hamda ularning parametrlarini o‘rganish bo‘yicha muayyan natijalarga erishilmoqda. Bu borada kremniydagi nikel bilan getterlash orqali, asosiy bo‘lmagan zaryad tashuvchilarning yashash vaqtini oshirishga, kremniyning temperaturaviy va radiatsiyaviy turg‘unligini oshirishga bo‘lgan ehtiyoj ortib bormoqda. Shu bilan birga, birikmalar shakllanishining fizik mexanizmlari va birikmalarga ega materiallar olishning texnologik usullari to‘liq ishlab chiqilmagan. Shunday ekan, kremniyni nikel kirishma atomlari bilan legirlash orqali, iqtisodiy nuqtai nazardan nisbatan arzon hamda termik ishlov (TI) va radiatsiyaga chidamli FEarni yaratish dolzarb vazifalardan hisoblanadi.

Ushbu dissertatsiya tadqiqoti O‘zbekiston Respublikasining 2019-yil 21-maydagi O‘zRQ-539-son “Qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan foydalanish to‘g‘risida”gi qonunida, O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2021-yil 19-martdagi PQ-5032-son “Fizika sohasidagi ta’lim sifatini oshirish va ilmiy tadqiqotlarni rivojlantirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi qarorida, O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2023-yil 16-fevraldagi PQ-57-son “Qayta tiklanuvchi energiya manbalarini va energiya tejoychi texnologiyalarni joriy etishni jadallashtirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi qarorida va ushbu sohada qabul qilingan boshqa me’yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo‘nalishlariga mosligi. Mazkur dissertatsiya ishi O‘zbekiston Respublikasi fan va texnologiyalari rivojlanishining III. “Energetika, energiya resurslarini tejash, transport, mashina va asbobsozlik, zamonaviy elektronikasi mikroelektronika, fotonika, elektron asbobsozlikni rivojlantirish” ustuvor yo‘nalishlariga muvofiq bajarilgan.

Muammoning o'rganilganlik darajasi. Hozirgi kunga qadar nikel atomlarining diffuziya mexanizmi, ularning kristall panjaradagi holati, mono-Si ning elektr parametrlariga ta'siri, nikel kirishma atomlarining birikmalari xossalari hamda birikmalarning hosil bo'lishining fizik mexanizmlari H. Kitagawa, A. Istratov, M. Yoshida, H. Aalberts, J. Lindroos, S. Tanaka va boshqa xorij olimlari tomonidan o'rganilgan.

Nikel kirishma atomlarining boshqa kirishma atomlari bilan kompleks hosil qilishi va komplekslarning fizik xossalari, harorat va radiatsiyaning kremniy va kremniyli FELarning elektrofizik parametrlariga ta'siri F. Korshunov, V. Prosolovich, I. Medvedova ishlarida o'rganilgan.

Dunyoning yetakchi ilmiy markazlari (Yaponiya, Slovakiya, Xitoy, Germaniya, Janubiy Koreya, AQSH, Rossiya davlatlaridagi), institutlari va universitetlarida fotoenergetika va mikroelektronika uchun mo'ljallangan poli-Si ishlab chiqarishning yangi texnologiyalarini yaratish bo'yicha ilmiy izlanishlar olib borilmoqda. Donadorlik chegaralari sohasining atom strukturasi, poli-Si da segregatsiya va diffuziya jarayonlari o'rganilgan. K. Boubaker, R. Hopkins, J. Davis, P. Rai-Chaudri va boshqalar poli-Si asosidagi FELar samaradorligini oshirish uchun keng miqyosli tadqiqotlar olib borishgan.

O'zbekistonda akademiklar M. Bahadixonov, S. Zaynabiddinov, R. Mo'minov, A. Mamadalimov, professorlar K. Abdurahmonov, Sh. Utamurodova va ularning shogirdlari tomonidan, kirishma atomlarining turli xil nuqsonlar bilan o'zaro ta'siri, shuningdek, ularning kremniyning rekombinatsion xossalari ta'siri o'rganilgan. Akademik M. Saidov, professorlar A. Saidov, A. Karimov, R. Aliev, I. Otaboyevlar tomonidan poli-Si asosidagi yarimo'tkazgichli qurilmalar va FELar samaradorligini oshirish bo'yicha ilmiy tadqiqotlar olib borilgan. Nikel bilan legirlangan kremniyning parametrlarini o'rganish bo'yicha ko'plab ilmiy natijalarga erishilganligiga qaramasdan, gamma-nurlanish va haroratning, poli-Si va o'stirish jarayonida nikel bilan legirlangan mono-Si parametrlariga ta'siri to'liq o'rganilmagan.

Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan oliy ta'lim muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog'liqligi. Dissertatsiya tadqiqoti TDTU ning "Raqamli elektronika va mikroelektronika" kafedrasida va QQDU ning "Yarimo'tkazgichlar fizikasi" kafedralarining ilmiy tadqiqot ishlari rejasiga muvofiq OT-F2-50 «Kremniy panjarasida $A^{III}B^V$ va $A^{II}B^{VI}$ yarimo'tkazgich birikmalarining elementar yacheykalari shakllanishining ilmiy asoslarini ishlab chiqish – fotoenergetika va fotonika uchun istiqbolli materiallar olishdagi yangi yondashuv» (2017-2020 yy.) loyihasi doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi nikel kirishma atomlari bilan legirlangan mono-Si va poli-Si hamda ular asosidagi fotoelementlar parametrlariga harorat va gamma-nurlanish ta'sirining o'ziga xos jihatlari o'rganishdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

nikel kirishma atomlari bilan legirlashning poli-Si elektrofizik parametrlariga ta'sirini (mono-Si namunalari bilan solishtirib) o'rganish;

nikel kirishma atomlari bilan legirlangan poli-Si asosidagi FELar parametrlarini tadqiq qilish;

nikel kirishma atomlari bilan diffuziya usulida legirlangan, mono-Si va poli-Si hamda ular asosidagi FELar elektrofizik parametrlariga gamma-nurlanishning ta'sirini tadqiq qilish;

o'stirish jarayonida nikel kirishma atomlari bilan legirlangan mono-Si ning parametrlariga termik ishlov va gamma-nurlanishning ta'sirini o'rganish;

o'stirish jarayonida va diffuziya usulida nikel kirishma atomlari bilan legirlangan mono-Si asosidagi FELar parametrlarini solishtirish orqali tadqiq qilish.

Tadqiqotning ob'yekti sifatida Choxral usuli bilan o'stirilgan mono-Si (Cz-Si, p -tip o'tkazuvchanlikka ega, kovaklar konsentratsiyasi $N_p=(2\div3)\cdot 10^{14} \text{ sm}^{-3}$); tigelsiz zonali eritish usuli bilan o'stirilgan mono-Si (Fz-Si, n -tip o'tkazuvchanlikka ega, elektronlar konsentratsiyasi $N_n=(2\div5)\cdot 10^{13} \text{ sm}^{-3}$); poli-Si (donadorliklar o'lchami $10\div 500 \text{ mkm}$, n -tip o'tkazuvchanlikka ega, elektronlar konsentratsiyasi $N_n=(2\div5)\cdot 10^{13} \text{ sm}^{-3}$); nikel kirishma atomlari bilan o'stirish jarayonida legirlangan mono-Si (p -tip o'tkazuvchanlikka ega, kovaklar konsentratsiyasi $N_p=(2\div3)\cdot 10^{14} \text{ sm}^{-3}$); sanoatda ishlab chiqarilgan, p^+-p-n^+ strukturaga ega bo'lgan, poli-Si va mono-Si asosidagi FELar olingan.

Tadqiqotning predmeti ^{60}Co gamma-kvantlari bilan nurlantirishdan va TI ta'siridan keyingi, nikel kirishma atomlari bilan legirlangan, poli-Si va mono-Si hamda ular asosidagi FELarning elektrik, fotoelektrik va optik xossalarning o'zgarishi hisoblanadi.

Tadqiqotning usullari: ikkilamchi ion massa spektrometriyasi va energiya dispersiv rentgen spektroskopiyasi, atom kuch mikroskopiyasi, skanerli elektron mikroskopiya, Xoll effekti usuli, infraqizil Furrye spektroskopiyasi, infraqizil mikroskopiya.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

ilk bor $850\div 1200 \text{ }^\circ\text{C}$ harorat oralig'ida diffuziya usulida nikel bilan legirlangan poli-Si sirtidagi nikel kirishma atomlari konsentratsiyasi, mono-Si namunalaridagidan $\sim 3\div 4$ marta katta ekanligi aniqlangan;

diffuziya harorati 850°C dan 1200°C gacha oshishi bilan, poli-Si sirtidagi nikel kirishma atomlarining konsentratsiyasi $9,43\cdot 10^{13} \text{ sm}^{-2}$ dan $1,2\cdot 10^{13} \text{ sm}^{-2}$ gacha kamayishi aniqlangan;

ilk bor poli-Si namunalarida diffuziya harorati $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ bo'lganda elektrofaol nikel atomlari konsentratsiyasi $\sim 4\cdot 10^{13} \text{ sm}^{-3}$ ga tengligi va bu qiymat mono-Si namunalaridagiga nisbatan bir tartibga kichik ekanligi aniqlangan;

ilk bor diffuziya usuli bilan legirlangan poli-Si da nikel kirishma atomlari birikmalarining o'lchami mono-Si namunalariga nisbatan $\sim 10^2$ marta kichik ekanligi, ularning konsentratsiyasi esa $\sim 10^3$ marta katta ekanligi aniqlangan;

o'stirish jarayonida nikel bilan legirlangan mono-Si namunalarining hajmidagi nikel atomlarining konsentratsiyasi $\sim (1\div 2)\cdot 10^{17} \text{ sm}^{-3}$, nikel birikmalari o'lchami $\sim 6\div 8 \text{ mkm}$ va ularning konsentratsiyasi $\sim (5\div 8)\cdot 10^3 \text{ sm}^{-2}$ teng ekanligi aniqlangan;

termik ishlov haroratini 450°C dan 1200°C gacha oshirilganda, o'stirish jarayonida nikel atomlari bilan legirlangan mono-Si sirtidagi nikel kirishma

atomlari konsentratsiyasi mos ravishda $1,05 \cdot 10^{11} \text{ sm}^{-2}$ dan $5,07 \cdot 10^{12} \text{ sm}^{-2}$ gacha oshib borishi aniqlangan.

Tadqiqotning amaliy natijalari:

nikel kirishma atomlari bilan legirlash harorati oshishi bilan, mono-Si asosidagi FElar parametrlarining radiatsion turg'unligi oshishi aniqlangan;

gamma-nurlanish dozasi 10^6 rad dan $3 \cdot 10^8$ rad gacha oshishi bilan, o'stirish jarayonida nikel kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy namunalariidagi birikmalar o'lchami va namunaning solishtirma qarshiligi kamayishi aniqlangan;

kremniydagi elektroaktiv nikel atomlari konsentratsiyasini oshirishning texnologik usuli sifatida nikel bilan legirlangan kremniy namunalari ^{60}Co gamma-kvantlari bilan nurlantirishdan foydalanish bo'yicha tavsiyalar ishlab chiqilgan;

legirlash usuliga bog'liq bo'lmagan ravishda nikel atomlarining kremniyda mavjudligi 450°C da termik ishlov berishda hosil bo'luvchi termodonorlarning, tez sovutish bilan yakunlanadigan termik ishlovda hosil bo'ladigan termonuqsonlarning hamda gamma-nurlanish ta'sirida hosil bo'ladigan radiatsion nuqsonlarning hosil bo'lishiga to'sqinlik qilishi aniqlangan.

Tadqiqot natijalarining ishonchligi zamonaviy o'lchash vositalari va tadqiqot usullarining qo'llanilganligi, tajribada olingan va hisoblangan ma'lumotlarning boshqa mualliflarning nazariy natijalari bilan muvofiqligi, shuningdek olingan natijalarning zamonaviy fizik modellar asosida tavsiflanganligi bilan asoslangan.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.

Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati shundan iboratki, olingan natijalar nikel kirishma atomlari bilan legirlangan mono-Si va poli-Si dagi gamma-nurlanish va temperatura ta'sirida sodir bo'ladigan hodisalar mexanizmini yoritib berishga imkon beradi. Olingan natijalarni, poli-Si da nikel kirishma atomlari birikmalari hosil bo'lishining o'ziga xos tomonlarini tushuntirishda ishlatish mumkin.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati, radiatsiyaga chidamli FElar olish uchun, nikel kirishma atomlari bilan legirlashning texnologiyasini asoslash, elektrofaol nikel kirishma atomlarining konsentratsiyasini oshirishda radiatsion texnologiyani ishlab chiqish, kosmik elektronika uchun radiatsiyaga chidamli yarimo'tkazgichli asboblari ishlab chiqishdan iborat. Olingan natijalar, harorat va radiatsiyaga turg'un parametrlari, legirlangan kremniy asosidagi yarimo'tkazgichli asboblari (*p-n* strukturalari) olishga asos bo'ladi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi.

Nikel kirishma atomlari bilan legirlangan mono-Si va poli-Si hamda ular asosidagi FElar parametrlariga termik ishlov va gamma-nurlanish ta'sirining o'ziga xos tomonlarini o'rganish asosida:

nikel bilan diffuziyaviy legirlangan poli-Si namunalariining yuzasidagi nikel atomlarining konsentratsiyasi mono-Si namunalariidagiga nisbatan $\sim 3\div 4$ marta katta ekanligidan, namunalar yuzasidagi nikel atomlarining konsentratsiyasi diffuziya harorati oshishi bilan kamayib borishidan, shuningdek TI harorati 450°C

dan 1200 °C gacha oshishi bilan (TI vaqti 2 soat), o‘stirish jarayonida nikel kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy sirtidagi nikel kirishma atomlari konsentratsiyasi mos ravishda $1,05 \cdot 10^{11}$ dan $5,07 \cdot 10^{12} \text{ sm}^{-2}$ gacha oshib borishidan «FOTON» aksiyadorlik jamiyatida poli-Si va mono-Si ning TI va gamma-nurlanishga chidamliligini oshirish uchun optimal texnologik yechimni aniqlashda foydalanilgan (“Uzeltexsanoat” uyushmasining 2022-yil 28-dekabrda 04-3/1894-son ma’lumotnomasi). Ilmiy natijalardan foydalanish, jahon analoglari natijalariga mos va gamma-nurlanishga chidamli bo‘lgan tajriba namunalari ishlab chiqarish imkonini bergan;

diffuziya usulida legirlangan poli-Si da, elektrofaol nikel atomlari konsentratsiyasi, mono-Si dagi elektrofaol nikel atomlari konsentratsiyasidan bir tartibga kichik va diffuziya harorati 1200 °C bo‘lganda qiymati $\sim 4 \cdot 10^{13} \text{ sm}^{-3}$ ga tengligidan, diffuziya harorati oshishi bilan ($T > 1000 \text{ °C}$), nikel kirishma atomlari bilan legirlangan poli-Si asosidagi FElar parametrlari (qisqa tutashuv toki, salt yurish kuchlanishi), nazorat FElari parametrlariga nisbatan oshib borishidan, legirlash usuliga bog‘liq bo‘lmagan ravishda (diffuziya usulida legirlash, o‘stirilayotganda legirlash), nikel atomlarining kremniyda mavjud bo‘lishi, $\sim 450 \text{ °C}$ haroratli TI berishda hosil bo‘luvchi termodononlarning, tez sovutish bilan yakunlanadigan TI da hosil bo‘ladigan termonuqsonlarning hamda gamma-nurlanish ta’sirida hosil bo‘ladigan radiatsion nuqsonlarning hosil bo‘lishiga to‘sqinlik qilishidan, TI (2 soat davomida) harorati 450 °C dan 1200 °C gacha oshishi bilan o‘stirish jarayonida nikel kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy sirtidagi nikel atomlari konsentratsiyasi mos ravishda $1,05 \cdot 10^{11} \text{ sm}^{-2}$ dan $5,07 \cdot 10^{12} \text{ sm}^{-2}$ gacha oshib borishidan “Legirlangan monokristal kremniy yadro transmutatsiyasida radiatsion-stimullangan jarayonlar” mavzusidagi F-2-41 fundamental loyihasini bajarishda foydalanilgan (O‘zR FA ning 2022-yil 12-dekabrda 2/1255-3123-son ma’lumotnomasi). Ilmiy natijalardan foydalanish yadroviy transmutatsiya jarayonida legirlangan namunalarda nikel konsentratsiyasini va namunalarning termik barqarorligini aniqlash imkonini bergan.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Dissertatsiya ishini bajarishda olingan asosiy ilmiy natijalar 7 ta xalqaro, 4 ta respublika miqiyosidagi ilmiy-amaliy anjumanlarda ma’ruza qilingan va muhokamadan o‘tgan.

Tadqiqot natijalarining e’lon qilinganligi. Dissertatsiya mavzusi bo‘yicha jami 22 ilmiy ishlar, shundan O‘zbekiston Respublikasi Oliy Attestatsiya Komissiyasi dissertatsiyalar asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 6 ta maqola e’lon qilingan, ulardan 3 tasi xorijiy jurnallarda chop etilgan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya ishi kirish, to‘rtta bob, ilova va xulosadan iborat bo‘lib, 45 ta rasm, 19 ta jadvalni o‘z ichiga olgan holda 105 betni tashkil etadi.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

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

«Kremniy va kremniyli fotoelementlar parametrlari turg'unligi va kirishma

atomlarining o'rni» deb nomlangan birinchi bobda poli-Si va mono-Si da nikel atomlari diffuziyasining o'ziga xos tomonlari, kremniy va kremniyli FELar xossalari gamma-nurlanish va harorat ta'sirida o'zgarishi ko'rib chiqildi. Mavjud nazariy va tajribada olingan ma'lumotlar tahlili asosida dissertatsiya ishini bajarishda vazifalari aniqlangan.

«Nikel kirishma atomlari bilan legirlash texnologiyasi va tadqiqot metodikasi» deb nomlangan ikkinchi bobda qo'llaniladigan eksperimental qurilmalar tavsifi, nikel kirishma atomlari bilan poli-Si va mono-Si (tigelsiz zonali eritish usuli bilan o'stirilgan – Fz-Si, Choxral usuli bilan o'stirilgan – Cz-Si va o'stirish jarayonida nikel bilan legirlangan kremniy – Si:Ni (1-rasm va 1-jadval)) namunalarini legirlash va ular asosida FELar olish texnologiyasi keltirilgan. Shu bilan birga, materiallarning va FELarning elektrofizik, fotoelektrik va optik parametrlarini o'lchash metodikasi ko'rib chiqilgan.

«Nikel kirishma atomlari bilan legirlangan poli-Si va mono-Si hamda ular asosidagi fotoelementlar parametrlariga termik ishlov berishning ta'siri» deb nomlangan uchinchi bobda Si:Ni namunalarida termodonorlar hosil bo'lishi o'rganildi. 1-rasmda Si:Ni (solishtirma qarshiligi $\rho \sim 70 \text{ Om}\cdot\text{sm}$ (1-jadval)) va nazorat namunalari (Cz-Si) da $T_{\text{TI}}=450 \text{ }^\circ\text{C}$ haroratdagi termodonorlar hosil bo'lish kinetikasini o'rganish natijalari keltirilgan. Termodonorlar konsentratsiyasi $N_{\text{TD}}=p_0-p_{\text{TI}}$ formula orqali hisoblandi, bunda N_{TD} – termodonorlar konsentratsiyasi, p_{TI} – TI dan keyingi kovaklar konsentratsiyasi, p_0 – TI dan oldingi kovaklar konsentratsiyasi.

1-rasmdan ko'rinadiki Si:Ni namunalari $T_{\text{TI}}=450 \text{ }^\circ\text{C}$ haroratdagi TI davomiyligidan qat'iy nazar o'zining dastlabki parametrlarini saqlab qoladi. Nazorat namunalari (1-jadval) parametrlari bo'lsa TI vaqti oshishi bilan sezilarli o'zgarib boradi, va 12 soatdan ortiq TI dan keyin o'tkazuvchanlik tipi o'zgaradi, ya'ni namunalar o'tkazuvchanligi n – tipga va solishtirma qarshiligi esa $\rho \sim 6,6 \cdot 10^3 \text{ Om}\cdot\text{sm}$ ga teng bo'ladi. Nazorat namunalarining o'tkazuvchanlik tipi

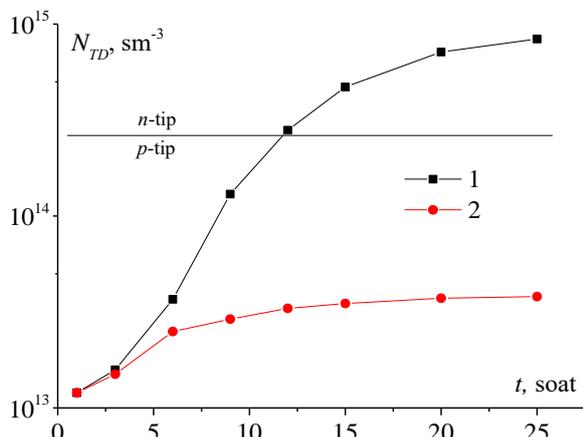
1-jadval

Dastlabki kremniy namunalarining parametrlari

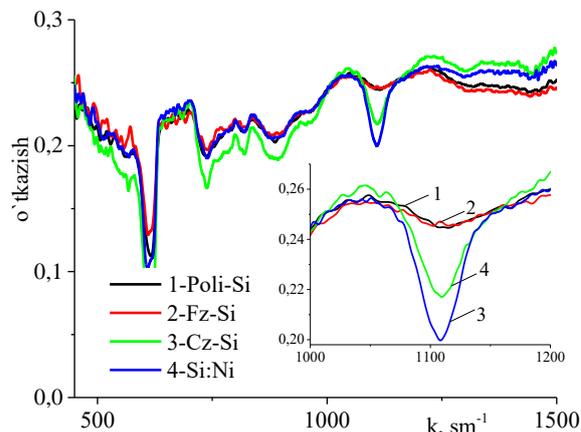
Namuna	tip	N_n, N_p, sm^{-3}
poli-Si	n	$(2 \div 5) \cdot 10^{13}$
Fz-Si	n	$(2 \div 5) \cdot 10^{13}$
Si:Ni:	p	$(2 \div 3) \cdot 10^{14}$
Cz-Si	p	$(2 \div 3) \cdot 10^{14}$

o'zgargandan so'ng, termodonorlar konsentratsiyasi $N_{TD}=p_0+p_{TI}$ ga muvofiq hisoblandi.

Namunalar o'tkazish spektrini o'lchash orqali (2-rasm) Cz-Si va Si:Ni namunalaridagi kislorod konsentratsiyasi, Fz-Si va poli-Si ga nisbatan katta ekanligi aniqlandi. Si:Ni dagi optik faol kislorod konsentratsiyasi, Cz-Si namunalariga nisbatan 25÷30% kichik (2-rasm) bo'lib, bu nikel atomlari kislorod atomlarini getterlashi bilan tushuntirildi.



1-rasm. Nazorat namunalari Cz-Si (1) va Si:Ni (2) da termodonorlar ($T_{TI}=450$ °C) hosil bo'lish kinetikasi



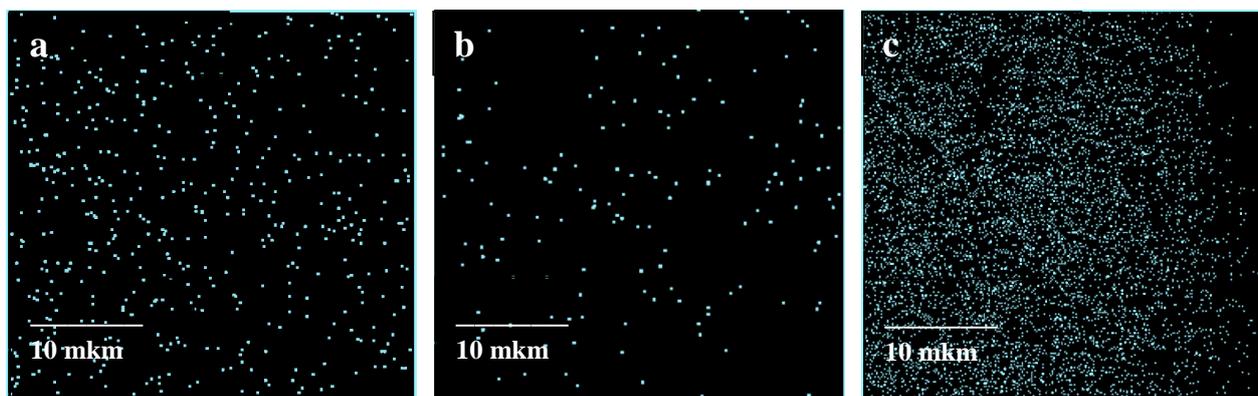
2-rasm. Dastlabki namunalarning o'tkazish spektri

2-jadval

Tez sovutish bilan yakunlanuvchi TI dan keyingi Si:Ni va nazorat namunalarning elektrik parametrlari

TI harorati, °C	TI vaqti, soat	Namuna parametrlari			
		Nazorat		Si:Ni	
		Tip	ρ , Om·sm	Tip	ρ , Om·sm
1000	2	<i>p</i>	$2 \cdot 10^2$	<i>p</i>	75
1100	2	<i>p</i>	10^4	<i>p</i>	90
1150	2	<i>n</i>	10^3	<i>p</i>	100
1200	2	<i>n</i>	330	<i>p</i>	120
1300	2	<i>n</i>	300	<i>p</i>	200

Si:Ni namunalarida, TI haroratining $T_{TI}=1000\div 1300$ °C intervalida, tez sovutish natijasida (texnik yog'da) termonuqsonlar hosil bo'lishi o'rganildi. Si:Ni namunalarning elektrik parametrlari barcha TI larda, nazorat namunalariga nisbatan nafaqat o'tkazuvchanlik tipi, elektr parametrlarining kattaligi ham saqlanib qolishi aniqlandi. Nazorat namunalarning o'tkazuvchanlik tipi va elektrik parametrlari sezilarli darajada o'zgaradi (2-jadval). Oligan natijalardan xulosa qilish mumkinki, yuqori haroratli TI larda ham, o'stirish jarayonida kiritilgan nikel kirishma atomlarining mavjudligi, materialning elektr parametrlarining turg'unligini ta'minlaydi, ya'ni nikel kirishma atomlari tez sovutish natijasida termik nuqsonlar hosil bo'lishiga to'sqinlik qiladi.



3-rasm. SIMS da olingan, Ni⁺ ionlari uchun, Si:Ni namunalari yuzasi. a) TI dan oldin, b) 450 °C haroratli TI dan keyin, c) 1200 °C haroratli TI dan keyin

Ikkilamchi ionli mass-spektrometr (SIMS) dan olingan natijalardan aniqlandiki, (3-rasm va 3-jadval) Si:Ni namunalari yuzasidagi nikel konsentratsiyasi $3,79 \cdot 10^{11} \text{ sm}^{-2}$ ga teng. Agar nikel konsentratsiyasi butun hajmda bir xil deb hisoblasak, $N_{Ni} = 1,25 \cdot 10^{17} \text{ sm}^{-3}$ deb olishimiz mumkin, ya'ni nikel kirishma atomlari konsentratsiyasi yetarlicha yuqori hajmiy eruvchanlikka ega. TI (2 soat davomida) harorati $T_{TI} = 450 \text{ }^\circ\text{C}$ dan $T_{TI} = 1200 \text{ }^\circ\text{C}$ gacha oshishi bilan namunalari yuzasidagi nikel konsentratsiyasi $1,05 \cdot 10^{11} \text{ sm}^{-2}$ dan $5,07 \cdot 10^{12} \text{ sm}^{-2}$ gacha oshishi aniqlandi.

Diffuziya usuli bilan legirlangan Fz-Si va poli-Si (donadorlik o'lchami $\sim 10 \div 500 \text{ mkm}$) namunalari sirtida nikel bilan boyitilgan soha hosil bo'lishi aniqlandi (4-rasm). Ikkala namuna yuzasidagi nikel atomlarining konsentratsiyasi diffuziya harorati 800 °C dan 1200 °C gacha oshishi bilan kamayib boradi. Poli-Si namunalari yuzasi qismidagi nikel atomlari konsentratsiyasi, Fz-Si namunalari nisbatan $\sim 3 \div 4$ marta katta bo'lishi aniqlandi.

3-jadval

Har xil haroratli TI dan keyingi, Si:Ni namunalari yuzasidagi nikel atomlari konsentratsiyasi

$T_{TI}, \text{ }^\circ\text{C}$	450	550	650	700	800	950	1200
Nikel konsentratsiyasi, 10^{11} sm^{-2}	1,05	3,13	3,22	5,76	6,52	21,8	50,7

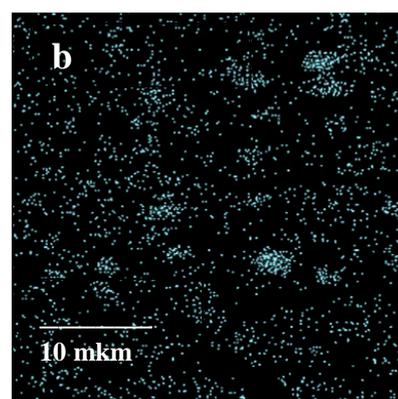
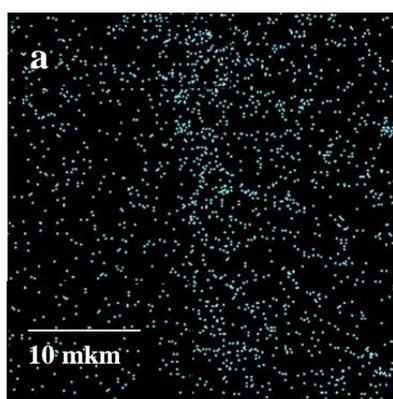
Infraqizil mikroskop yordamida, nikel kirishma atomlari bilan legirlangan namunalarda, tarkibiga nikel kiruvchi birikmalarga tegishli bo'lgan, qora nuqtalar kuzatildi (5-rasm). Fz-Si<Ni>, Cz-Si<Ni> va poli-Si<Ni> namunalarda birikmalar konsentratsiyasi va o'lchami bir biridan farq qiladi. Fz-Si va Cz-Si namunalardagi farq (5-rasm), ulardagi kislorod konsentratsiyasining farqi bilan tushuntirildi. Infraqizil mikroskop yordamida poli-Si da nikel kirishma atomlarining birikmalarini kuzatish imkoni bo'lmadi (2, c rasm). AFM yordamida, nikel kirishma atomlari bilan legirlangan namunalarda, o'lchami $0,1 \div 0,2 \text{ mkm}$ dan oshmaydigan yorug' nuqtalar kuzatildi (6-rasm). Agar bunday yorug' nuqtalarning nikelsiz nazorat namunalari kuzatilmaganligini hisobga olsak, bu nuqtalarni Ni

atomlarining mavjudligi bilan bog`liq (tarkibida nikel mavjud birikmalar) deb hisoblashimiz mumkin.

4-jadval

Har xil haroratdagi diffuziyaviy TI dan keyingi, Fz-Si<Ni> va poli-Si<Ni> namunalar yuzasidagi nikel atomlarining konsentratsiyasi

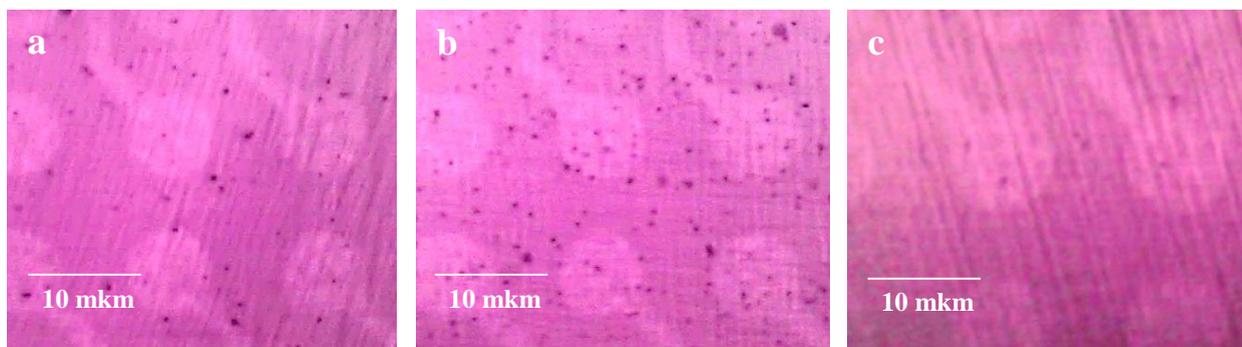
T_{diff} , °C		800	950	1200
Nikel konsentratsiyasi, sm^{-2}	Fz-Si<Ni>	$3,74 \cdot 10^{13}$	$3,1 \cdot 10^{13}$	$4,52 \cdot 10^{12}$
	poli-Si<Ni>	$9,45 \cdot 10^{13}$	$9,18 \cdot 10^{13}$	$1,2 \cdot 10^{13}$



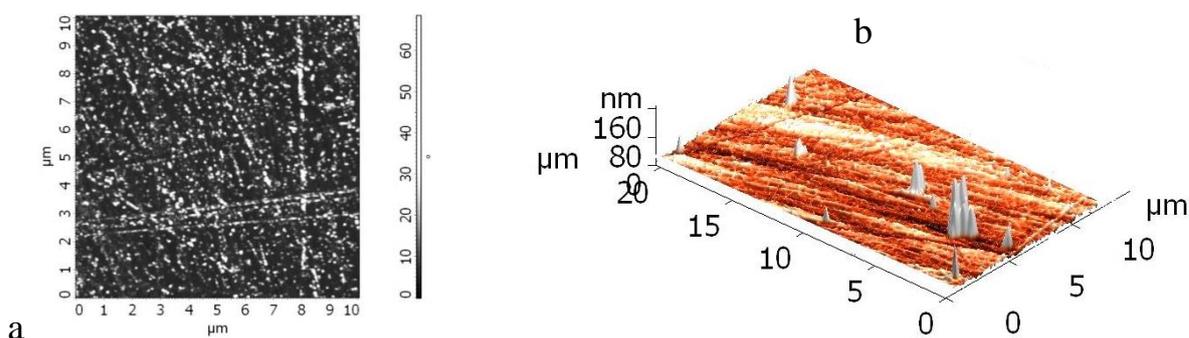
4-rasm. Nikel kirishma atomlari bilan 1200 °C haroratda legirlangan Fz-Si (a) va poli-Si (b) namunalar yuzasi

Nikelning diffuziya harorati ortishi bilan, Fz-Si<Ni> va poli-Si<Ni> namunalarda zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasi kamayishi aniqlandi (7-rasm). Bu kovaklar konsentratsiyasi oshishiga olib keluvchi, elektrofaol nikel atomlarining konsentratsiyasi oshishi bilan tushuntiriladi. $T_{diff} \approx 1250$ °C haroratli diffuziyadan so`ng Fz-Si<Ni> namunalari p -tip o`tkazuvchanlikka ega bo`ldi. poli-Si namunalari nikel bilan legirlash, elektronlar konsentratsiyasiga sezilarli ta`sir ko`rsatmasligi aniqlandi va bu kirishma atomlarining (shulardan nikel atomlarining) donadorlik chegaralariga segregatsiyasi bilan tushuntiriladi. Kirishmalarning kristallitlar chegarasiga segregatsiyasi kirishma atomlarini elektr jihatdan faol bo`lmagan holatga o`tkazadi. Namunalardagi elektrofaol nikel atomlari konsentratsiyasi o`zgarishidan, poli-Si namunalarda elektrofaol nikel atomlari konsentratsiyasi $\sim 4 \cdot 10^{13} sm^{-3}$ dan oshmasligi aniqlandi. Bu mono-Si dagi, $T_{diff} \approx 1200$ °C haroratli diffuziyaviy TI dan keyin $10^{14} sm^{-3}$ ga yetuvchi, elektrofaol nikel atomlari konsentratsiyasidan sezilarli darajada kichik.

Nikel kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy namunalari, o`lchami $d_{cl} \sim 6 \div 8$ mkm va sirtiy konsentratsiyasi $N_{cl} \sim (5 \div 8) \cdot 10^3 sm^{-2}$ tartibida bo`lgan birikmalar hosil bo`lishi kuzatildi (8-a rasm). $T_{TI} = 450$ °C haroratli TI dan keyin, birikmalar yiriklashishi, ya`ni ularning o`lchami kattalashib, konsentratsiyasi kamayishi aniqlandi (8-b rasm). Tez sovutish bilan yakunlanadigan, yuqori haroratli TI dan keyin (2-jadval) nikel kirishma atomlari birikmalari kuzatilmadi, ya`ni ular to`liq parchalanadi yoki o`lchami sezilarli darajada kichrayadi (8-c rasm).



5-rasm. $T_{diff}=1200$ °C haroratda diffuziya usuli bilan legirlangan, Cz-Si (a), Fz-Si (b) va poli-Si (c) namunalarda nikel kirishma atomlari birikmalari



6-rasm. AFM da olingan, nikel kirishma atomlari bilan legirlangan poli-Si yuzasi. a) fazaviy rejim, b) 3D rejim

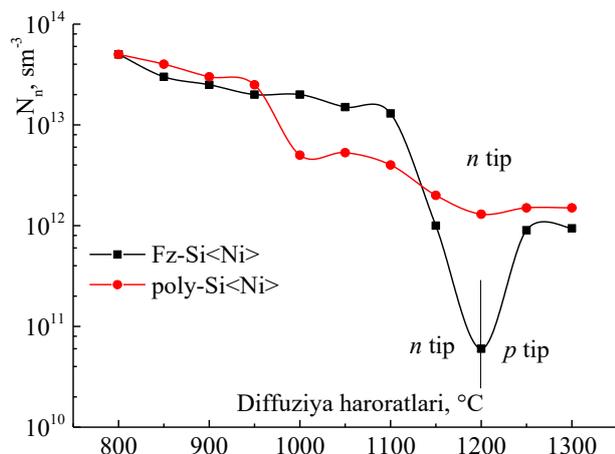
Diffuziya usuli bilan va o‘stirish jarayonida legirlangan kremniy asosidagi FE parametrlari o‘rganildi. FE tayyorlashda fosfor diffuziyasi $T_{diff}=1000$ °C haroratda $t_{diff}=30$ min davomida amalga oshirildi. Bunda $p-n$ o‘tish chuqurligi $\sim 0,6 \div 0,8$ mkm ni tashkil qildi. Cz-Si namunalariga nikel diffuziyasi (vakuumda purkalgan nikel qatlamdan) $T_{diff}=850$ °C haroratda, fosfor diffuziyasi nikel purkalgan tomonidan amalga oshirildi.

Qo‘shimcha TI $T_{TI}=800$ °C haroratda amalga oshirildi. Nikel kirishma atomlari bilan o‘stirish jarayonida legirlangan kremniy asosidagi FE parametrlari, qo‘shimcha TI keyin, diffuziya usulida legirlangan FE parametrlariga nisbatan ortishi aniqlandi (5-jadval).

«Nikel kirishma atomlari bilan legirlangan poli-Si va mono-Si kremniy hamda ular asosidagi FElar parametrlariga gamma-nurlanishning ta’siri» deb nomlangan to‘rtinchi bobda tadqiq qilinayotgan namunalar hususiyatlariga gamma-nurlanishning ta’sirini o‘rganish natijalari keltirilgan. Gamma-nurlanish dozasi oshishi bilan, Si:Ni namunalardagi nikel kirishma atomlari birikmalari o‘lchami kichirayadi va $\Phi=3 \cdot 10^8$ rad dozada ularning o‘lchami $d_{cr} \sim 4 \div 6$ mkm ga teng bo‘lishi, birikmalar sirtiy konsentratsiyasi o‘zgarmasdan qolishi aniqlandi (9-rasm).

$\Phi=3 \cdot 10^6$ rad dozali gamma-nurlanishdan keyin, nazorat namunalarining (Cz-Si) solishtirma qarshiligi ortib boradi va $\Phi=3 \cdot 10^8$ rad dozali nurlanishdan keyin ~ 7 marta o‘zgarishi aniqlandi (9-rasm, bu yerda: ρ_0 va ρ – namunalarning nurlanishdan oldingi va keyingi solishtirma qarshiligi). Shu bilan birga,

gamma-nurlanish dozasi $\Phi=3 \cdot 10^8$ rad gacha oshishi bilan Si:Ni namunalarning qarshiligi $\sim 30\%$ ga kamayadi.

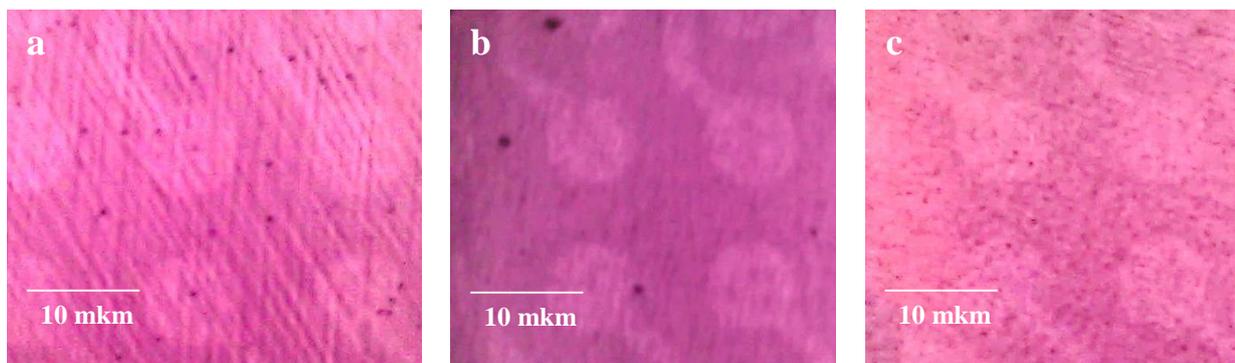


7-rasm. Zaryad tashuvchilar konsentratsiyasining diffuziya haroratiga bog‘liqligi

5-jadval

Cz-Si<Ni> va Si:Ni asosidagi FE parametrlari

FE	Cz-Si<Ni>	Si:Ni
$T_{diff}=1000\text{ }^\circ\text{C}$ dagi fosfor diffuziyasidan keyin		
J_{sc} , mA/sm ²	18,2	17,8
U_{oc} , mV	397	400
P_{peak} , mVt/sm ²	7,2	7,1
$T_{TI}=800\text{ }^\circ\text{C}$ haroratli TI dan keyin		
J_{sc} , mA/sm ²	19,7	19,3
U_{oc} , mV	412	423
P_{peak} , mVt/sm ²	8,1	8,2



8-rasm. Si:Ni namunalariidagi nikel kirishma atomlari birikmalari.

a) TI dan oldin, b) $T_{TI}=450\text{ }^\circ\text{C}$ haroratli TI dan keyin, c) tez sovutish bilan yakunlanadigan $T_{TI}=1200\text{ }^\circ\text{C}$ haroratli TI dan keyin

Material solishtirma qarshiligining kamayishi harakatchanlikning oshishi yoki qo‘shimcha zaryad tashuvchilarning generatsiyasi bilan bog‘liq bo‘ladi. Nurlanish davomida nuqsonlar soni ortishini hisobga olsak, harakatchanlikning ortish ehtimoli kam. Qo‘shimcha zaryad tashuvchilarning generatsiya mexanizmi tugunlararo joylashgan nikel atomlarining tugunga o‘tishi bilan tushuntiriladi. Bu holatda nikel atomlari *p*-tipdagi zaryad tashuvchilarni hosil qilib, elektrofaol holatga o‘tadi. Nikel birikmalari bo‘lsa, nurlanish sharoitida, vakansiyalar (birlamchi radiatsion nuqsonlar) bilan oson o‘zaro ta’sirlashuvchi, tugunlararo nikel atomlarining generatsiyasi uchun deyarli cheksiz manba hisoblanadi.

Namunalarda $\Phi=3 \cdot 10^8$ rad dozali gamma-nurlanishdan keyin, $\Delta T=100\text{ }^\circ\text{C}$ qadam bilan, $100\text{ }^\circ\text{C}$ dan $600\text{ }^\circ\text{C}$ gacha oshib boruvchi bosqichli (har bir bosqich $t_{TI}=10$ min.) TI berildi. Har bir bosqichdan keyin Xoll koeffitsiyenti va namunalarning solishtirma qarshiligi o‘lchandi. Olingan natijalardan o‘zgarishsiz qolgan nuqsonlar ulushi $f=(p_0-p_{TI})/(p_0-p_\gamma)$ hisoblandi, bu yerda: p_0 , p_γ , p_{TI} – mos

ravishda, nurlanishdan oldin, $\Phi=3 \cdot 10^8$ rad dozali nurlanishdan keyin va TI ning har bir bosqichidan keyingi namunalardagi kovaklar konsentratsiyasi.

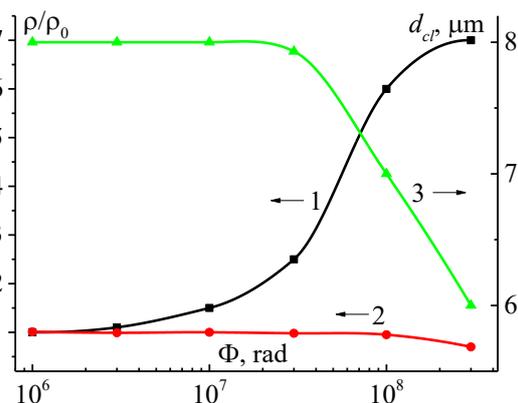
$T_{TI}=600$ °C haroratli TI dan keyin nazorat namunalarning parametrlari dastlabki parametrlari bilan mos tushadi, ya'ni nurlanishda hosil bo'lgan barcha radiatsion nuqsonlar yo'qoldi (10-rasm). Shu bilan birga, TI Si:Ni namunalari parametrlariga ta'sir qilmasligi aniqlandi. Bu esa o'z navbatida, nurlanish davomida bunday materiallarda radiatsion nuqsonlar konsentratsiyasi kam ekanligidan dalolat bersa, qo'shimcha hosil bo'lgan zaryad tashuvchilarning yo'qolmasligi bo'lsa, ularning turg'unligi yuqori ekanligidan dalolat beradi. Bu gamma-nurlanishga uchragan Si:Ni namunalari elektrofizik parametrlarining o'zgarishini tushuntiruvchi tavsiya qilingan mexanizmning to'g'riligini tasdiqlaydi.

Olingan tajriba natijalaridan ko'rinadiki, nikel atomlarining mavjud bo'lishi kremniyning radiatsion turg'unligini oshiradi. Nikel atomlari bilan o'stirish jarayonida legirlash, diffuziyaviy usulda legirlashga nisbatan texnologik jihatdan qulay va arzonligi tufayli, radiatsion turg'unligi yuqori bo'lgan kremniy asosidagi asboblarni yaratishda yangi imkoniyatlarni ochib beradi.

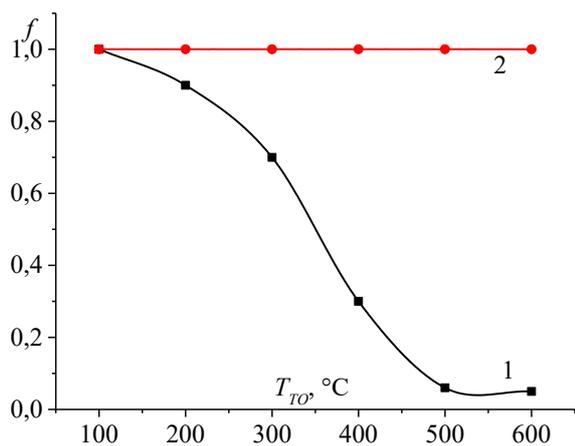
Poli-Si namunalari parametrlarining radiatsiya ta'sirida o'zgarishiga nikel atomlarining ta'siri o'rganildi. 11-rasmda nikel kirishma atomlari bilan $T_{diff}=1200$ °C haroratda legirlangan poli-Si va nazorat namunalardagi, zaryad tashuvchilar konsentratsiyasining gamma-nurlanish dozasi bog'liq ravishda kamayishi ($\Delta n=n_\gamma-n_0$) ko'rsatilgan, bu yerda: n_0 va n_γ nurlanishdan oldingi va keyingi zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi.

Olingan natijalardan ko'rinadiki, nikel bilan legirlangan namunalarda zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasi nazorat namunalariga nisbatan $\sim 7 \div 8$ marta kamroq kamayadi. Nikel kirishma atomlari bilan legirlangan poli-Si parametrlarini, gamma-nurlanishdan keyin o'lchash orqali, zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasi kamayishi diffuziya haroratiga bog'liqligi aniqlandi. Nikel atomlarining diffuziya harorati oshishi bilan poli-Si parametrlarining radiatsion turg'unligi oshib boradi (6-jadval).

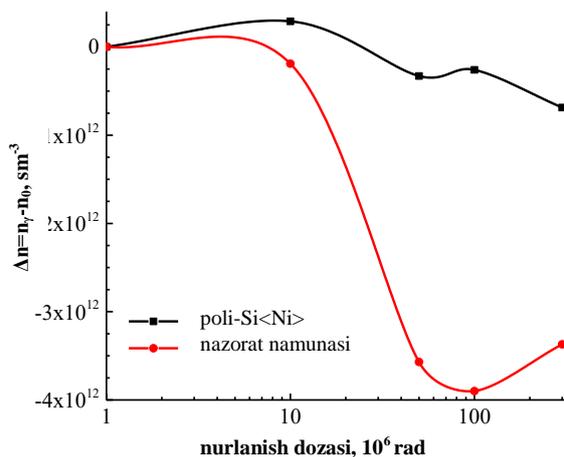
Nikel bilan legirlangan mono-Si asosidagi FE parametrlariga gamma-nurlanishning ta'sirini o'rganish maqsadida, dastlabki material sifatida, p -tip o'tkazuvchanlikka ega, solishtirma qarshiligi $\rho=0,5$ Om·sm bo'lgan kremniy plastinkalari tanlab olindi.



9-rasm. Solishtirma qarshilikning (1-Cz-Si, 2-Si:Ni) va birikmalar o'lchamining (3) gamma-nurlanish dozasi bog'liqligi



10-rasm. Nazorat (1) va Si:Ni (2) namunalardagi nuqsonlarning o'zgarishi



11-rasm. Zaryad tashuvchilar konsentratsiyasining gamma-nurlanish dozasi bog'liq ravishda o'zgarishi

Ushbu namunalar asosida, nikel atomlari bilan legirlangan (Ni guruh) va nikel atomlarisiz (C guruh) FE olindi. Nikel diffuziyasi $T_{diff}=1200, 1000, 850$ °C haroratda, mos ravishda $t_{diff}=3, 10, 30$ min davomida amalga oshirildi. Keyin $T_{diff}=1000$ °C haroratda, $t_{diff}=30$ min davomida, fosfor atomlarini diffuziya (nikel purkalgan tomonidan) qilish orqali $p-n$ o'tish hosil qilindi. Diffuziyaviy TI dan keyin, $T_{TI}=800 \div 750$ °C optimal haroratda, $t_{TI}=30$ min davomida, qo'shimcha TI berildi. C guruh FELari ham xuddi shu texnologiyada, nikel purkalmasdan amalga oshirildi. FE yuzasida yorug'lik qaytishini kamaytiruvchi qatlam hosil qilinmadi.

6-jadval

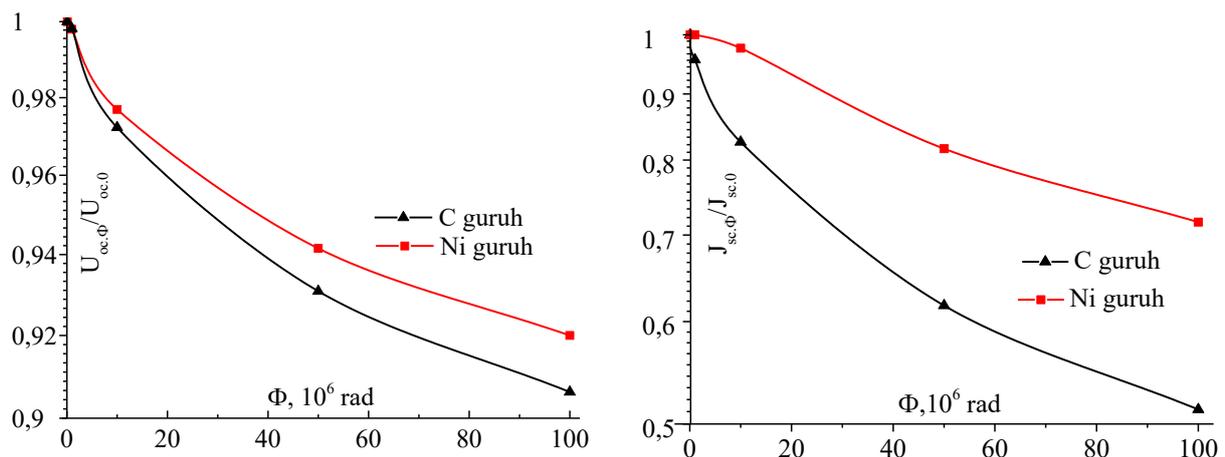
Nikel kirishma atomlari bilan legirlangan poli-Si da zaryad tashuvchilar konsentratsiyasining o'zgarishi

T_{diff} °C		850	900	950	1000	1050	1100	1150	1200
$-\Delta n, \cdot 10^{13} sm^{-3}$	Ni	3,7	2,5	1,3	0,9	0,1	0,08	0,07	0,05
	C	2,6	5,5	8,2	4,3	3,8	3	0,8	0,4

12-rasmda $T_{diff}=1200$ °C haroratda nikel bilan legirlangan FE parametrlarining nisbiy o'zgarishining gamma-nurlanish dozasi bog'liqligi ko'rsatilgan, bu yerda: $U_{oc,\Phi}/U_{oc,0}$ va $J_{sc,\Phi}/J_{sc,0}$ – mos ravishda FE salt yurish kuchlanishining va qisqa tutashuv tokining nisbiy o'zgarishi, $U_{oc,0}$, $J_{sc,0}$, va $U_{oc,\Phi}$, $J_{sc,\Phi}$ – mos ravishda FE parametrlarining nurlanishdan oldingi va keyingi qiymatlari (7-jadval). Gamma-nurlanish dozasi oshishi bilan barcha guruh FE parametrlari kamayib boradi.

$\Phi=10^8$ rad dozada, Ni guruh FE salt yurish kuchlanishi qiymati 542,8 mV (~8% ga) gacha kamayadi, C guruh FE salt yurish kuchlanishi qiymati 490,3 mV (~10% ga) gacha kamayadi. Ni guruh FELari qisqa tutashuv toki 23,64 mA/sm² (~28% ga) gacha, C guruh FELari qisqa tutashuv toki 15,5 mA/sm² (~49% ga) gacha kamayadi. 7-jadvalda gamma-nurlanishdan oldingi va keyingi parametrlari va δ_A qiymati ($\delta_A=A_{Ni}/A_C$ bu yerda: A_{Ni} , A_C – mos ravishda

Ni va C guruh FE parametrlari (U_{oc} , J_{sc} , τ) keltirilgan. Ko‘rinib turibdiki $\delta_r > \delta_j > \delta_U > 1$, ya‘ni Ni guruh FELari C guruh FELariga nisbatan samaraliroq. Gamma-nurlanish dozasi oshishi bilan δ_A qiymati ortib boradi va har doim $\delta_A > 1$ qiymatni qabul qiladi. Bundan ko‘rinadiki Ni guruh FE parametrlari, C guruh FE parametrlariga nisbatan kamroq o‘zgarib boradi. Olingan tajriba natijalaridan ko‘rinadiki, nikel kirishma atomlari bilan legirlash FE parametrlarining radiatsion turg‘unligini oshiradi. Nikel atomlarini legirlash haroratining oshishi bilan FE parametrlari kamayib boradi, lekin δ_A qiymati ortib boradi. Nurlanish dozasi oshishi bilan radiatsion nuqsonlar konsentratsiyasi oshib boradi, $\tau \sim 1/N_r$ bo‘lganligidan (τ – asosiy bo‘lmagan zaryad tashuvchilar yashash vaqti, N_r – rekombinatsiya markazlari konsentratsiyasi), nurlanish dozasi oshishi bilan τ ham kamayishi kerak. Mos ravishda, asosiy bo‘lmagan zaryad tashuvchilarning diffuziya uzunligi ham kamayadi. Shu sababli, FE $p-n$ o‘tish chuqurligigacha yetib boruvchi, asosiy bo‘lmagan zaryad tashuvchilar miqdori kamayadi va FE parametrlari yomonlashadi. Ni guruh FE parametrlari C guruh FE parametrlariga nisbatan sezilarli darajada kamroq o‘zgarishi, bu materiallarda ikkilamchi radiatsion nuqsonlarning paydo bo‘lishiga to‘sqinlik qiluvchi mexanizm borligini ko‘rsatadi.



12-rasm. $T_{diff}=1200^\circ\text{C}$ haroratda nikel bilan legirlangan FE parametrlarining nisbiy o‘zgarishining gamma-nurlanish dozasi ga bog‘liqligi

Nikel atomlarining o‘ziga xos tomoni, ularning o‘zgaruvchan valentlikka egaligi bo‘lib, kimyoviy bog‘lanishda d -elektronlarning qatnashishi bilan tushuntiriladi. Bu bir tomondan ularning kristall panjarada past haroratlarda ham migratsiya tezligining yuqori ekanligini bildirsa, boshqa tomondan ularning panjara nuqsonlari va texnologik kirishmalar bilan ta’sirlashish ehtimolining yuqori ekanligini bildiradi.

Kremniy materialida tugunlararo nikel kirishma atomlarining yuqori konsentratsiyasida, asosan, kirishma atomlari bilan birlamchi radiatsion nuqsonlarning ta’sirlashuvi sodir bo‘ladi. Nikel kirishma atomlari kristall bo‘ylab harakatlanib, radiatsiya tasirida hosil bo‘lgan vakansiyalar bilan intensiv ta’sirlashadi. Vakansiya markazlarining nikel atomlari bilan egallanishi,

«tugundagi» nikel atomlarini hosil qiladi, mos ravishda ikkilamchi radiatsion nuqsonlarning hosil bo‘lishiga to‘sqinlik qilinadi.

7-jadval

Nurlanishdan oldingi va keyingi FE parametrlarining o‘rtacha qiymati

T_{diff} , °C	FE Parametrlari	Dastlabki $\Phi=0$			Nurlanishdan keyin $\Phi=10^8$ rad		
		Guruh		δ_A	Guruh		δ_A
		C	Ni		C	Ni	
1200	U_{oc} , mV	541	590	1,09	490,3	542,8	1,1
	J_{sc} , mA/sm ²	26	33	1,27	15,5	23,64	1,52
	τ , μs	8	14	1,75	5	12	2,4
1000	U_{oc} , mV	570	590	1,04	466	514	1,1
	J_{sc} , mA/sm ²	30	35	1,17	17,56	24,15	1,38
	τ , μs	12	20	1,67	10	16	1,6
850	U_{oc} , mV	590	605	1,03	482	541,4	1,12
	J_{sc} , mA/sm ²	32	38	1,19	18,8	27,74	1,48
	τ , μs	15	30	2	13	21	1,61

XULOSA

1. Diffuziyaviy legirlashda poli-Si da mono-Si kabi namunalar sirtida nikel atomlari bilan boyitilgan soha hosil bo‘ldi. Namunalar sirtidagi nikel atomlarining konsentratsiyasi diffuziya harorati oshishi bilan kamayib bordi. Diffuziyaviy legirlashda poli-Si namunalari sirtidagi nikel kirishma atomlarining mono-Si ga nisbatan 3÷4 marta katta ekanligi, poli-Si namunalarida elektrofaol nikel atomlarining konsentratsiyasi mono-Si ga nisbatan bir tartibga kam ekanligi aniqlandi.

2. Diffuziyaviy legirlashda poli-Si da mono-Si dagi kabi nikel kirishma atomlari birikmalari hosil bo‘ldi. poli-Si namunalaridagi birikmalar o‘lchami mono-Si ga nisbatan ikki tartibga kichik, birikmalar konsentratsiyasi esa 10^3 marta katta bo‘ladi.

3. Nikel kirishma atomlari bilan diffuziya usulida legirlangan, mono-Si asosidagi FElar parametrlariga $\Phi=10^5\div 10^8$ rad doza intervalidagi gamma-nurlanish (nurlanish harorati ~ 27 °C) ta’siri o‘rganildi. Nikel atomlarining diffuziya harorati oshishi bilan FE parametrlarining radiatsiyaga turg‘unligi oshib borishi aniqlandi.

4. Nikel kirishma atomlari bilan o‘stirish jarayonida legirlangan kremniyning elektrofizik va optik parametrlari o‘rganildi. Bunday materiallarda birikmalar o‘lchami $\sim 6\div 8$ mkm ga, birikmalar konsentratsiyasi $\sim (5\div 8)\cdot 10^3$ sm⁻² ga teng bo‘lishi tajribada aniqlandi. Kremniyni o‘stirish jarayonida nikel atomlari bilan legirlash optik faol kislorod konsentratsiyasini $\sim 25\div 30$ % kamaytiradi.

5. Legirlash usuliga bog‘liq bo‘lmagan ravishda (diffuziya usulida, o‘stirish jarayonida) kremniyda nikel atomlarining mavjud bo‘lishi, 450 °C da

termodonorlarning hosil bo'lishiga, tez sovutish natijasida termonuqsonlarning hosil bo'lishiga va gamma-nurlanish ta'sirida radiatsion nuqsonlarning hosil bo'lishiga to'sqinlik qilishi aniqlandi. TI harorati 450 °C dan 1200 °C gacha oshishi bilan, nikel kirishma atomlari bilan o'stirish jarayonida legirlangan kremniy sirtidagi nikel kirishma atomlarining konsentratsiyasi mos ravishda $1,05 \cdot 10^{11} \text{ sm}^{-2}$ dan $5,07 \cdot 10^{12} \text{ sm}^{-2}$ gacha oshib boradi.

6. Gamma-nurlanish dozasi oshishi bilan, nikel kirishma atomlari bilan o'stirish jarayonida legirlangan kremniydagi birikmalar o'lchami va material solishtirma qarshiligi kamayib boradi. Nikel atomlari bilan legirlangan kremniy gamma-kvantlari bilan nurlantirish, elektrofaol nikel atomlari konsentratsiyasini oshirishda texnologik usul sifatida tavsiya qilindi. Nikel kirishma atomlari bilan o'stirish jarayonida legirlash gamma-nurlanishga turg'un parametrli kremniy olishda optimal texnologik usul sifatida tavsiya qilindi.

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

**КАРАКАЛПАКСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

КОСБЕРГЕНОВ ЕРНАЗАР ЖУСИПБАЙ УЛЫ

**ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ГАММА ОБЛУЧЕНИЯ НА
ПАРАМЕТРЫ КРЕМНИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО НИКЕЛЕМ И
ФОТОЭЛЕМЕНТОВ НА ЕГО ОСНОВЕ**

01.04.10 – Физика полупроводников

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

Ташкент-2023

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за номером B2022.4.PhD/FM769

Диссертация выполнена в Каракалпакском государственном университете и Ташкентском государственном техническом университете.

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

Научный руководитель: Исмаилов Канатбай Абдреймович
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: Тургунов Нозимжон Абдуманнопович
доктор физико-математических наук, доцент

Юлчиев Шахриёр Хусанович
доктор физико-математических наук, профессор

Ведущая организация: Наманганский государственный университет

Защита диссертации состоится « 07 » « 09 » 2023 г. в 12-00 часов на заседании Научного совета DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 при Научно-исследовательском институте физики полупроводников и микроэлектроники Национального университета Узбекистана (Адрес: 100057, Узбекистан, г. Ташкент, ул. Янги Алмазар, дом 20. Тел: (+99871)248-79-94, факс: (+99871) 248-79-92, e-mail: info@ispm.uz.

С диссертацией можно ознакомиться в отделе внедрения цифровых образовательных технологий института (зарегистрирована за № 54) по адресу: 100057, Узбекистан, г. Ташкент, ул. Янги Алмазар, дом 20. Тел: (+99871)248-79-59.

Автореферат диссертации разослан « 25 » « 08 » 2023 г.
(реестер протокола рассылки № 54 от « 25 » « 08 » 2023 г.).



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

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

Н.А. Тургунов,
председатель научного семинара
при научном совете по присуждению
ученых степеней, д. ф.-м. н., доцент

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (Phd))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время в мире фотоэлементы (ФЭ) на основе кремния широко используются, в связи с растущим спросом на дополнительные энергоресурсы. Среди них ФЭ на основе монокристаллического кремния (моно-Si) и поликристаллического кремния (поли-Si) обладают высокой чувствительностью к внешним воздействиям. Поэтому изучение влияния температуры и радиации на параметры, прочность и стабильность работы ФЭ является актуальным.

На мировом уровне в ведущих научных центрах разрабатываются высокоэффективные многокаскадные ФЭ на основе полупроводниковых соединений. Однако технология их изготовления достаточно сложная и требует наличия дорогостоящего сырья и оборудования. На мировом рынке по производству доля ФЭ на основе поли-Si составляют - 52,9 %, доля ФЭ на основе моно-Si составляют - 33,2 %, доля ФЭ на основе аморфного кремния составляют - 13,9 %. В связи с относительной дешевизной, создание полупроводниковых приборов и ФЭ на основе поли-Si занимают лидирующие позиции в мире. Поэтому важно разработать ФЭ на основе поли-Si с высокой эффективностью.

В нашей республике достигаются определенные результаты в развитии отрасли физики полупроводников, в частности, в создании недорогих ФЭ и полупроводниковых приборов, отвечающих требованиям мировых стандартов, а также в исследовании их параметров. В связи с этим растет потребность увеличения времени жизни неосновных носителей заряда, термической и радиационной стабильности кремния, путем геттерирования скоплениями никеля. А также полностью не установлен физический механизм формирования скоплений и не разработаны технологические методы получения материала со скоплениями. Таким образом, создание сравнительно дешевого с экономической точки зрения и стойкого к термообработкам (ТО) и радиационному облучению ФЭ, путем легирования кремния примесными атомами никеля, является актуальной задачей.

Данное диссертационное исследование в определенной мере служат выполнению задач, поставленных в законе Республики Узбекистан № ЗРУ-539 «Об использовании возобновляемых источников энергии» от 21 мая 2019 года, в постановление Президента Республики Узбекистан № ПП-5032 «О мерах по повышению качества образования и развитию научных исследований в области физики» от 19 марта 2021 года и в постановлениях Президента Республики Узбекистан № ПП-57 «О мерах по ускорению внедрения возобновляемых источников энергии и энергосберегающих технологий» от 16 февраля 2023 года, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

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

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

Степень изученности проблемы. До настоящего времени механизмы диффузии атомов никеля, их состояние в кристаллической решетке, влияние на электрические параметры моно-Si, свойства скоплений примесных атомов никеля, а также физические механизмы образования скоплений исследовались многими зарубежными учеными - такими как: Н. Kitagawa, А. Istratov, М. Yoshida, Н. Aalberts, J. Lindroos, S. Tanaka и другие зарубежные ученые.

Образование комплексов примесных атомов никеля с другими примесями в кремнии и физические свойства комплексов, влияние температуры и радиации на электрофизические параметры кремния и кремниевых ФЭ исследовались в работах Ф. Коршунова, В. Просоловича, И. Медведева.

В ведущих мировых научно-исследовательских центрах (Япония, Словакия, Китай, Германия, Южная Корея, США, Россия), институтах и университетах, проводятся изыскания по разработке новых технологий получения поли-Si, предназначенного для фотоэнергетики и микроэлектроники. Определены атомарные структуры области межзеренных границ, изучены процессы сегрегации и диффузии в поли-Si. К. Boubaker, R. Hopkins, J. Davis, P. Rai-Chaudhury и другие проводили полномасштабные исследования по увеличению эффективности ФЭ на основе поли-Si.

В Узбекистане академиками М. Бахадирхоновым, С. Зайнабиддиновым, Р. Муминовым, А. Мамадалимовым, профессорами К. Абдурахмоновым, Ш. Утамурадовой и их учениками изучено взаимодействие различных примесных атомов с радиационными и термическими дефектами, а также их влияние на рекомбинационные свойства кремния. Академик М. Саидов, профессора А. Саидов, А. Каримов, Р. Алиев, И. Атабаев провели исследования по повышению эффективности полупроводниковых приборов и ФЭ на основе поли-Si. Несмотря на то, что по изучению параметров кремния, легированного никелем, достигнуто много научных результатов, влияние гамма-излучения и температуры на параметры поли-Si и моно-Si, легированных никелем, при выращивании не полностью изучены.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнялась на кафедре ТГТУ «Цифровая электроника и микроэлектроника» и на кафедре КГУ «Физика полупроводников» согласно программе государственного гранта: ОТ-Ф2-50 «Разработка научных основ формирования элементарных ячеек $A^{II}B^{IV}$ и $A^{III}B^V$ в решетке кремния – новый подход в получении перспективных материалов для фотоэнергетики и фотоники», в 2017-2020 гг.

Целью исследования является изучение особенностей влияния температуры и гамма-облучения на параметры моно-Si и поли-Si, легированного примесными атомами никеля, а также фотоэлементов на их основе.

Задачи исследования:

изучение влияния легирования примесными атомами никеля на электрофизические параметры поли-Si (в сравнении с образцами моно-Si);

исследование параметров ФЭ на основе поли-Si, диффузионно легированного примесными атомами никеля;

исследование влияния гамма-облучения на электрофизические параметры моно-Si и поли-Si, диффузионно легированного атомами никеля и на ФЭ, полученные с использованием этих материалов;

изучение влияния температурных обработок и гамма-облучения на электрофизические параметры моно-Si, легированного примесными атомами никеля в процессе роста кристалла;

проведение сравнительных исследований электрофизических параметров ФЭ на основе моно-Si, легированного примесными атомами никеля методом диффузии и при выращивании;

Объектом исследования являются моно-Si, выращенный методом Чохральского (Cz-Si, *p*-типа проводимости, с концентрацией дырок $N_p=(2\div3)\cdot 10^{14}$ см⁻³); моно-Si, выращенный методом бестигельной зонной плавки (Fz-Si, *n*-типа проводимости, с концентрацией электронов $N_n=(2\div5)\cdot 10^{13}$ см⁻³); поли-Si (размером зерна 10÷500 мкм, *n*-типа проводимости, с концентрацией электронов $N_n=(2\div5)\cdot 10^{13}$ см⁻³); моно-Si, легированного примесными атомами никеля при выращивании (*p*-типа проводимости, с концентрацией дырок $N_p=(2\div3)\cdot 10^{14}$ см⁻³); промышленно изготовленные ФЭ на основе поли-Si и моно-Si имеющие *p*⁺-*p*-*n*⁺ структуру.

Предметом исследования являются изменения электрических, фотоэлектрических и оптических свойств поли-Si и моно-Si, легированных примесными атомами никеля и ФЭ на их основе под воздействием облучения гамма-квантами ⁶⁰Co и термообработок.

Методы исследований: методы масс-спектрометрии вторичных ионов и энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия, атомно-силовая микроскопия, сканирующая электронная микроскопия, метод эффекта Холла, инфракрасная Фурье-спектроскопия, инфракрасная микроскопия.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

впервые обнаружено, что в образцах поли-Si, диффузионно легированных никелем в интервале температур 850÷1200 °С, поверхностная концентрация примесных атомов никеля ~3÷4 раза больше, чем в образцах моно-Si;

установлено, что с увеличением температуры диффузии от 850 °С до 1200 °С поверхностная концентрация никеля в образцах поли-Si, легированных примесными атомами никеля, уменьшается от $9,43\cdot 10^{13}$ см⁻² до $1,2\cdot 10^{13}$ см⁻²;

впервые показано, что концентрация электроактивных атомов никеля в образцах поли-Si при температуре диффузии 1200 °С составляет $\sim 4\cdot 10^{13}$ см⁻³ и это значение на порядок меньше, чем в образцах моно-Si;

впервые установлено, что размер скоплений примесных атомов никеля в образцах поли-Si в $\sim 10^2$ раза меньше, а их концентрация в $\sim 10^3$ раза больше, чем в образцах моно-Si;

установлено, что в образцах моно-Si, легированного никелем при выращивании концентрация атомов никеля в объеме составляет $\sim(1\div 2)\cdot 10^{17}$ см⁻³, размер скоплений никеля составляет $\sim 6\div 8$ мкм, а их концентрация равна $\sim(5\div 8)\cdot 10^3$ см⁻²;

показано, что в образцах моно-Si, легированного никелем при выращивании с увеличением температуры термообработки от 450 °С до 1200 °С поверхностная концентрация примесных атомов никеля увеличивается от $1,05\cdot 10^{11}$ см⁻² до $5,07\cdot 10^{12}$ см⁻² соответственно.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

установлено, что с увеличением температуры легирования примесными атомами никеля увеличивается радиационная стойкость параметров ФЭ на основе моно-Si;

обнаружено, что с увеличением дозы гамма-облучения от 10^6 рад до $3\cdot 10^8$ рад, в образцах кремния, легированных примесными атомами никеля при выращивании, размеры скоплений и удельное сопротивление образца уменьшаются;

разработаны рекомендации по использованию облучения гамма-квантами ⁶⁰Со, образцов кремния, легированных никелем в качестве технологического способа увеличения концентрации электроактивных атомов никеля в кремнии;

установлено, что не зависимо от способа легирования наличие атомов никеля в кремнии способствует подавлению генерации термодоноров, образующихся при термообработке при 450 °С, закалочных термодиффектов, а также радиационных дефектов, образующихся при гамма-облучении.

Достоверность результатов исследований обосновывается применением современных измерительных приборов и методов исследования, соответствием экспериментальных и расчетных данных с теоретическими результатами других авторов, а также трактовкой полученных результатов на основе современных физических моделей.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследования заключается в возможности раскрытия механизмов явлений, происходящих в моно-Si и поли-Si, легированном примесными атомами никеля, при воздействии гамма-облучения и ТО. Полученные результаты можно использовать для объяснения особенностей формирования скоплений примесных атомов никеля в поли-Si.

Практическая значимость результатов исследования заключается в обосновании технологии легирования примесными атомами никеля, которые позволяют получать радиационно-стойкие ФЭ, разработке радиационной технологии увеличения электроактивной концентрации примеси никеля, создания радиационно-стойких полупроводниковых приборов для космической электроники. Результаты являются основой для создания полупроводниковых приборов (*p-n* структур) с радиационно-стойкими параметрами, на основе кремния, легированного никелем.

Внедрение результатов исследования.

На основе полученных результатов изучения особенностей влияния термообработок и гамма-облучения на параметры поли-Si и моно-Si, легированного примесными атомами никеля и ФЭ на их основе:

воспользуюсь тем, что в образцах поли-Si диффузионно легированных никелем, поверхностная концентрация атомов никеля $\sim 3\div 4$ раза больше, чем в образцах моно-Si, поверхностная концентрация никеля в обоих образцах уменьшается с увеличением температуры диффузионной ТО, в образцах кремния, легированного никелем при выращивании, с увеличением температуры ТО от 450 °С до 1200 °С (время ТО – 2 часа) поверхностная концентрация примесных атомов никеля увеличивается соответственно от $1,05 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ до $5,07 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, определено оптимальное технологическое решение для повышения стойкости к ТО и гамма-облучению поли-Si и моно-Si (Справка № 04-3/1894 ассоциации “Uzeltexsanoat” от 28 декабря 2022 года). Использование полученных результатов позволило изготовить опытные образцы, которые соответствуют результатам мировых аналогов, и являются устойчивыми к гамма-облучению;

в процессе выполнения фундаментального проекта Ф-2-41 «Радиационно стимулированные процессы, в ядерной трансмутации легированного кремния», были использованы нижеприведенные результаты: концентрация электроактивных атомов никеля в образцах поли-Si на порядок меньше, чем в образцах моно-Si и при температуре диффузионной ТО 1200 °С составляет $\sim 4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$; с увеличением температуры диффузионной ТО ($T_{ТО} > 1000 \text{ °С}$) основные параметры ФЭ (ток короткого замыкания, напряжение холостого хода) на основе поли-Si, легированного примесными атомами никеля, увеличиваются относительно параметров контрольных ФЭ; не зависимо от способа легирования (как диффузией, так и в процессе выращивания) наличие атомов никеля в кремнии способствует подавлению генерации термодоноров, образующихся при ТО при 450 °С, закалочных термодфектов, а также радиационных дефектов, образующихся при гамма-облучении; в образцах кремния, легированного никелем при выращивании, с увеличением температуры ТО от 450 °С до 1200 °С (время ТО – 2 часа) поверхностная концентрация примесных атомов никеля увеличивается от $1,05 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ до $5,07 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, соответственно (Справка № 2/1255-3123 Академия наук РУз от 12 декабря 2022 года). Использование научных результатов позволило определить концентрации никеля и термостойкости образцов, легированных в процессе ядерной трансмутации.

Апробация результатов исследования. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 7 международных и 4 республиканских научно-практических конференциях.

Публикации результатов исследований. Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 22 научных трудах, из них 6 статей в научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертаций, в том

числе 3 статьи в зарубежных международных журналах.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Текст диссертации изложен на 105 страницах, включая 45 рисунков и 19 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

В первой главе диссертации под названием «**Стабильность**

параметров кремния и кремниевых фотоэлементов и роль примесных атомов» рассмотрены особенности диффузии примесных атомов никеля в поли-Si и моно-Si, изменение свойств кремния и кремниевых ФЭ под действием гамма-лучей и температуры. На основе анализа имеющихся теоретических и экспериментальных данных сформулированы задачи диссертационной работы.

Во второй главе диссертации под названием «**Технология легирования примесными атомами никеля и методики исследований**» описываются используемые экспериментальные приборы, технология легирования примесными атомами никеля поли-Si и моно-Si (выращенного методом без тигельной зонной плавки – Fz-Si, выращенный методом Чохралского – Cz-Si и кремний легированного никелем при выращивании - Si:Ni (табл. 1 и рис. 2)), а также технология получения ФЭ на их основе. В этой же главе рассматриваются методики исследования электрофизических, фотоэлектрических и оптических параметров материалов и ФЭ.

В третьей главе диссертации под названием «**Влияние термообработок на параметры поли-Si и моно-Si, легированного примесными атомами никеля и фотоэлементов на их основе**» приведены результаты исследований образования термодоноров в образцах Si:Ni. На рис. 1 показана кинетика образования термодоноров (ТД) в образцах Si:Ni и контрольных образцах (Cz-Si) при $T_{TO}=450$ °С. Концентрацию ТД рассчитывали по формуле $N_{ТД}=p_0-p_{ТО}$, где: $N_{ТД}$ – концентрация термодоноров, $p_{ТО}$ – концентрация дырок в образце после ТО, p_0 – концентрация дырок в образце до ТО.

Установлено, что электрические параметры образцов Si:Ni (удельном

Таблица 1

Параметры исходных образцов кремния

Образец	ТП	$N_n, N_p, \text{см}^{-3}$
поли-Si	<i>n</i>	$(2\div 5)\cdot 10^{13}$
Fz-Si	<i>n</i>	$(2\div 5)\cdot 10^{13}$
Si:Ni	<i>p</i>	$(2\div 3)\cdot 10^{14}$
Cz-Si	<i>p</i>	$(2\div 3)\cdot 10^{14}$

сопротивлением $\rho \sim 70 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ (табл. 1)) практически сохраняют свои исходные значения независимо от длительности ТО при $T_{ТО}=450 \text{ }^\circ\text{C}$. В тоже время, параметры контрольных образцов (см. табл. 1) существенно меняются с увеличением времени ТО, а при времени ТО более 12 часов меняется тип проводимости, то есть образцы приобретают n – тип проводимости с удельным сопротивлением $\rho \sim 6,6 \cdot 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. После изменения типа проводимости контрольного образца, концентрация ТД в контрольных образцах определялась по формуле $N_{ТД} = p_0 + p_{ТО}$.

Измерением спектра пропускания образцов определено, что концентрация кислорода в Cz-Si и Si:Ni значительно выше, чем в образцах Fz-Si и поли-Si (рис. 2). Однако в Si:Ni концентрация оптически активного кислорода в 25÷30% меньше чем Cz-Si (рис. 2). Это объясняется тем, что никель геттерирует оптически активный кислород в образцах Si:Ni.

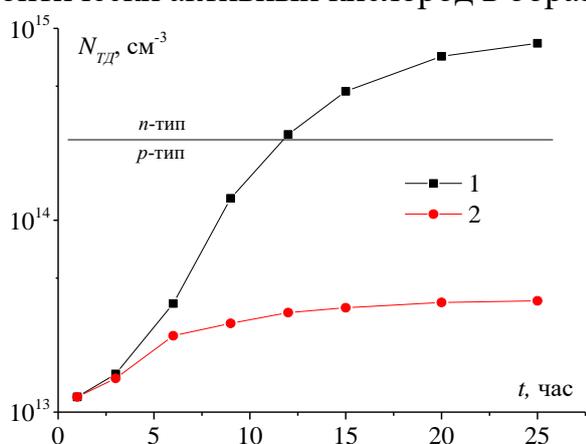


Рис. 1. Кинетика образования термодоноров (при $T_{ТО}=450 \text{ }^\circ\text{C}$) в контрольных образцах Cz-Si (1) и в образцах Si:Ni (2)

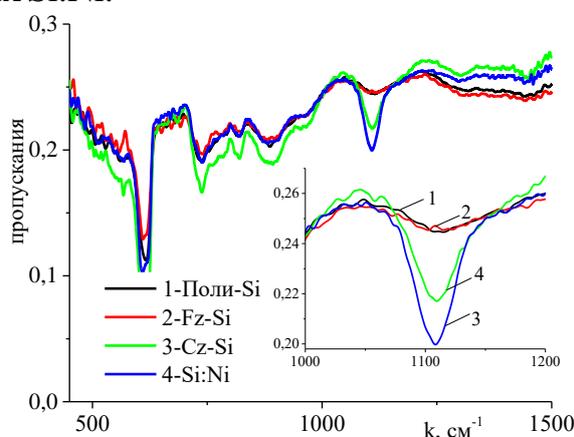


Рис. 2. Спектр пропускания исходных образцов

Таблица 2

Электрические параметры Si:Ni и контрольных образцов после ТО с последующей закалкой

Температура ТО, $^\circ\text{C}$	Время ТО, час	Параметры образцов			
		Контроль		Si:Ni	
		Тип	ρ , Ом·см	Тип	ρ , Ом·см
1000	2	p	$2 \cdot 10^2$	p	75
1100	2	p	10^4	p	90
1150	2	n	10^3	p	100
1200	2	n	330	p	120
1300	2	n	300	p	200

Исследовано образование закалочных термодиффектов, в образцах Si:Ni, в интервале температур ТО $T_{ТО}=1000 \div 1300 \text{ }^\circ\text{C}$ (охлаждение проводилось в техническом масле). Электрические параметры образцов Si:Ni при всех ТО сохраняют не только тип проводимости, но и величину электрических

параметров, в отличие от контрольных образцов, в которых электрические параметры существенно изменяется, доходя до изменения типа проводимости материала (табл. 2). Полученные данные позволяет сделать вывод о том, что даже при быстрой закалке дефектов, наличие атомов никеля, введенного в процессе выращивания в моно-Si, обеспечивает стабильность электрических параметров материала, то есть генерация закалочных термодфектов подавляется примесными атомами Ni.

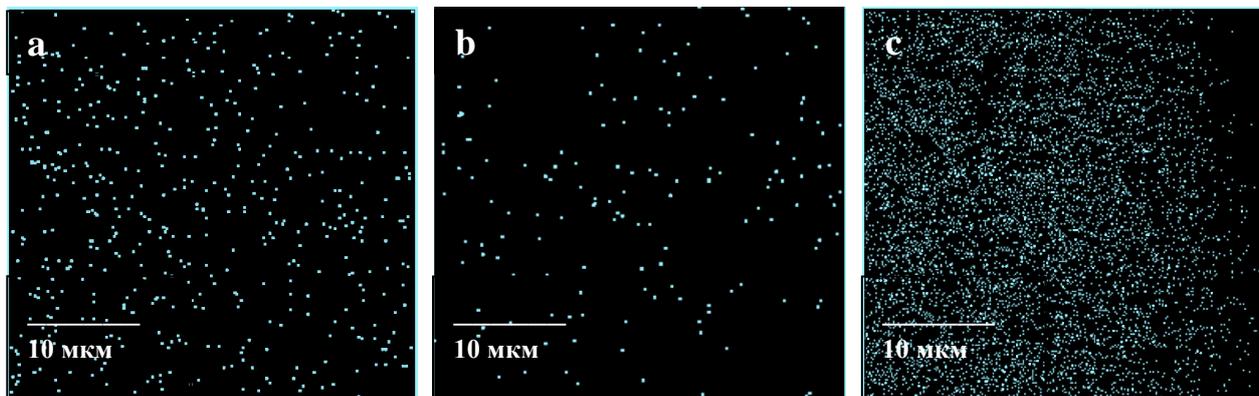


Рис. 3. Изображение поверхности образцов Si:Ni, полученных в SIMS для ионов Ni⁺. а) до ТО, б) после ТО при 450 °С, с) после ТО при 1200 °С

На основе результатов полученных в SIMS (Вторичная ионная масс-спектрометрия) (рис. 3 и табл. 3) определено, что в образцах Si:Ni поверхностная концентрация никеля составляет $3,79 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Если допустить, что концентрация Ni во всем объеме материала одинакова, тогда $N_{Ni} = 1,25 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, т.е. примесные атомы никеля имеют достаточно высокую объемную растворимость. С увеличением температуры ТО от $T_{ТО} = 450 \text{ °С}$ до $T_{ТО} = 1200 \text{ °С}$ (в течение 2 часа) увеличивается поверхностная концентрация никеля от $1,05 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ до $5,07 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

Таблица 3

Поверхностная концентрация атомов никеля в образцах Si:Ni, отожженных при разных температурах ТО

$T_{ТО}, \text{ °С}$	450	550	650	700	800	950	1200
Поверхностная концентрация никеля, 10^{11} см^{-2}	1,05	3,13	3,22	5,76	6,52	21,8	50,7

Определено, что в образцах Fz-Si и поли-Si (размер зерна $\sim 10 \div 500 \text{ мкм}$) при легировании диффузионном методом, в поверхностной области образцов появляется слой обогащённым никелем (рис. 4). С увеличением температуры диффузионной ТО от 800 °С до 1200 °С , поверхностная концентрация никеля в обоих образцах уменьшается. Установлено что поверхностная концентрация примесных атомов никеля в образцах поли-Si, $\sim 3 \div 4$ раз больше, чем в образцах Fz-Si.

Из результатов полученных методом ИК микроскопии обнаружено, что в

образцах легированного примесными атомами никеля, наблюдаются тёмные точки, представляющие собой, очевидно, никельсодержащие скопления (рис. 5). Размеры и концентрация скоплений в образцах Fz-Si<Ni>, Cz-Si<Ni> и поли-Si<Ni> отличается друг от друга. Разница параметрами скоплений, между образцами Fz-Si и Cz-Si (рис. 5) может быть объяснена разницей концентрации кислорода в этих материалах (рис. 2). Разрешающая способность прибора слишком мала, для наблюдения скоплений примесных атомов никеля в поли-Si (рис. 2, с). Из результатов полученных AFM (рис. 6) видно, что в образцах поли-Si<Ni> наблюдаются яркие точки, имеющие размер не более $0,1 \div 0,2$ мкм, Если учесть что отсутствие таких точек в контрольных образцах без никеля, то можно утверждать, что эти точки связаны с присутствием атомов Ni (представляющие собой никельсодержащие скопления)

Таблица 4

Поверхностная концентрация атомов никеля в образцов Fz-Si<Ni> и поли-Si<Ni>, полученных при разных температурах диффузионной ТО

$T_{дифф}$, °C		800	950	1200
Поверхностная концентрация никеля, см ⁻²	Fz-Si<Ni>	$3,74 \cdot 10^{13}$	$3,1 \cdot 10^{13}$	$4,52 \cdot 10^{12}$
	Поли-Si<Ni>	$9,45 \cdot 10^{13}$	$9,18 \cdot 10^{13}$	$1,2 \cdot 10^{13}$

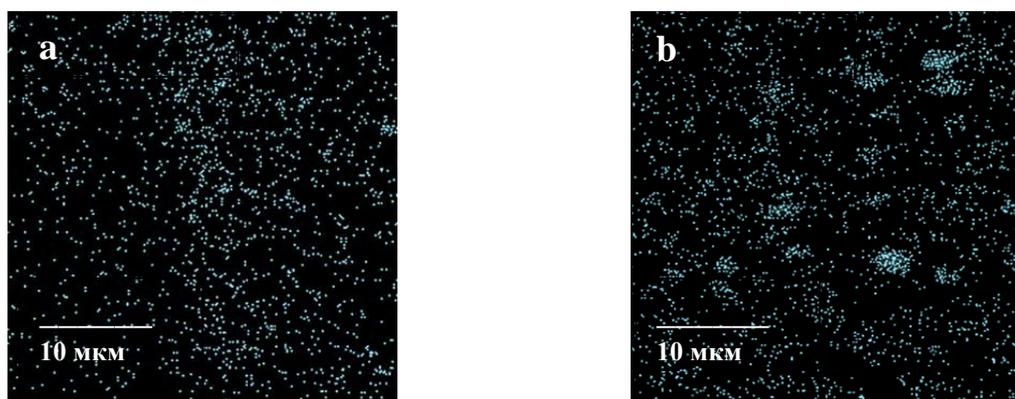


Рис. 4. Снимок поверхности образцов Fz-Si (a) и поли-Si (b), легированного примесными атомами Ni при температурах 1200 °C

С увеличением температуры диффузии никеля, в образцах Fz-Si<Ni> и поли-Si<Ni>, концентрация носителей заряда уменьшается (рис. 7). Это объясняется увеличением концентрации электроактивных атомов никеля, которая приводит к увеличению концентрации дырок. При температурах диффузии $T_{дифф} \approx 1250$ °C образцы Fz-Si<Ni> имеют *p*-тип проводимости. В тоже время, легирование поли-Si никелем, слабо влияет на концентрацию электронов, что объясняется сегрегацией примесей (в том числе никеля) на границах зерен. Сегрегация примесей на границах кристаллитов переводит примесь в электрически неактивное состояние. Изменение концентрации электронов в исследуемых образцах соответствует концентрации электроактивных атомов никеля в поли-Si, не превышающей $\sim 10^{13}$ см⁻³. Эта

концентрация существенно меньше, чем концентрация электроактивных атомов никеля в моно-Si, в котором она достигает 10^{14} см^{-3} при температуре диффузионной ТО $T_{\text{дифф}} \approx 1200 \text{ }^\circ\text{C}$.

Обнаружено, что в образцах кремния, легированного при выращивании, наблюдаются скопления (рис. 8, а) размером $d_{\text{ср}} \sim 6 \div 8 \text{ мкм}$, при этом их поверхностная концентрация составляет $N_{\text{ср}} \sim (5 \div 8) \cdot 10^3 \text{ см}^{-2}$. После ТО при $T_{\text{ТО}} = 450 \text{ }^\circ\text{C}$ наблюдается укрупнение скоплений, то есть их размер увеличивается, а их концентрация соответственно уменьшается (рис. 8, б). После высокотемпературной ТО (табл. 2) с последующей закалкой скопления не наблюдается, то есть идет полное разрушение или существенное уменьшение размеров скоплений атомов Ni (рис. 8, в).

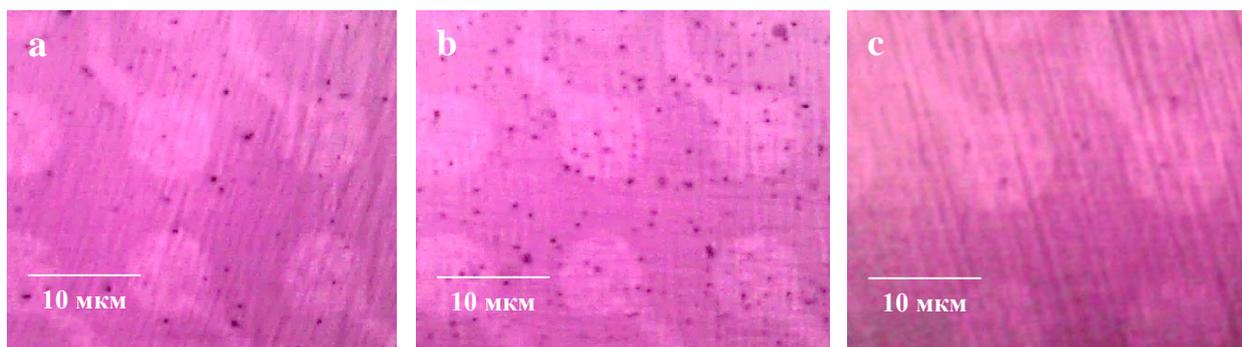


Рис. 5. Скопления примесных атомов Ni в образцах Cz-Si (а), Fz-Si (б) и поли-Si (с), диффузионно легированных при $T_{\text{дифф}} = 1200 \text{ }^\circ\text{C}$

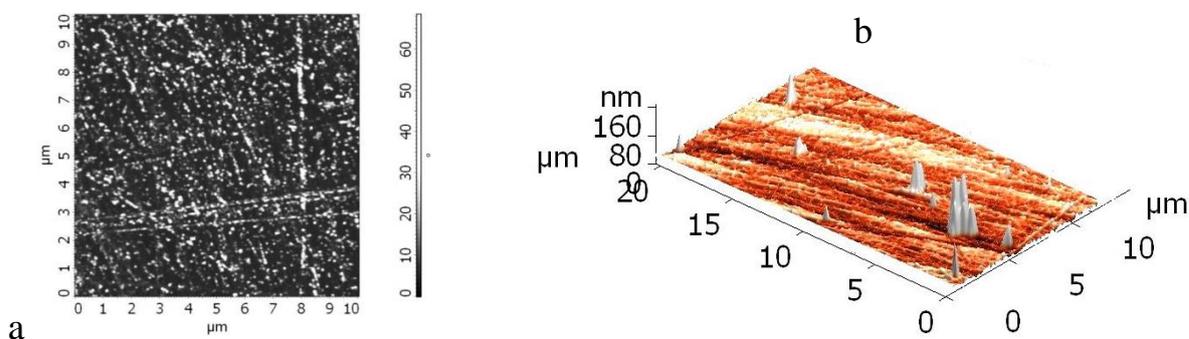


Рис. 6. АСМ изображения поверхности образцов поли-Si легированного примесными атомами никеля. а) фазовый контраст, б) 3D режим

Исследовано параметры ФЭ на основе кремния легированного никелем при выращивании и методом диффузии. При изготовлении ФЭ диффузия фосфора осуществлялась при $T_{\text{дифф}} = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение $t_{\text{дифф}} = 30 \text{ мин}$, при этом глубина p - n – перехода составляла $\sim 0,6 \div 0,8 \text{ мкм}$. В ФЭ, легированных диффузионным методом диффузия никеля проводилась из напыленного слоя никеля в вакууме при температуре $T_{\text{дифф}} = 850 \text{ }^\circ\text{C}$, а диффузия фосфора проводилась со стороны, на которую напылялся никель.

Дополнительная ТО проводилась при температуре $800 \text{ }^\circ\text{C}$. Установлено, что в ФЭ, легированных примесными атомами Ni при выращивании с дальнейшей дополнительной ТО, происходит улучшение их основных

параметров (табл. 5) относительно ФЭ, легированных диффузионным методом.

В четвертой главе диссертации под названием «Влияние гамма-облучения на параметры поли-Si и моно-Si легированного примесными атомами никеля и фотоэлементов на их основе» приведены результаты изучения влияния гамма-облучения на свойства исследуемых образцов. Установлено, что в образцах Si:Ni с увеличением дозы гамма-облучения размеры скоплений примесных атомов никеля уменьшаются и при дозе $\Phi=3\cdot 10^8$ рад их размер составляет $d_{cr}\sim 4\div 6$ мкм, а поверхностная концентрация скоплений остаётся практически неизменной (рис. 9).

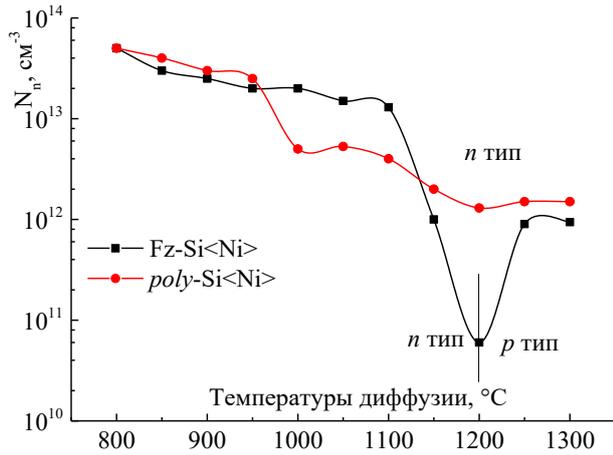


Рис. 7. Зависимость концентрации носителей заряда от температуры диффузионной ТО

**Таблица 5
Параметры ФЭ на основе Cz-Si<Ni> и Si:Ni**

ФЭ	Cz-Si<Ni>	Si:Ni
После диффузии фосфора при $T_{дифф}=1000$ °С		
$J_{кз}$, мА/см ²	18,2	17,8
U_{xx} , мВ	397	400
$P_{пик}$, мВт/см ²	7,2	7,1
После ТО при $T_{ТО}=800$ °С		
$J_{кз}$, мА/см ²	19,7	19,3
U_{xx} , мВ	412	423
$P_{пик}$, мВт/см ²	8,1	8,2

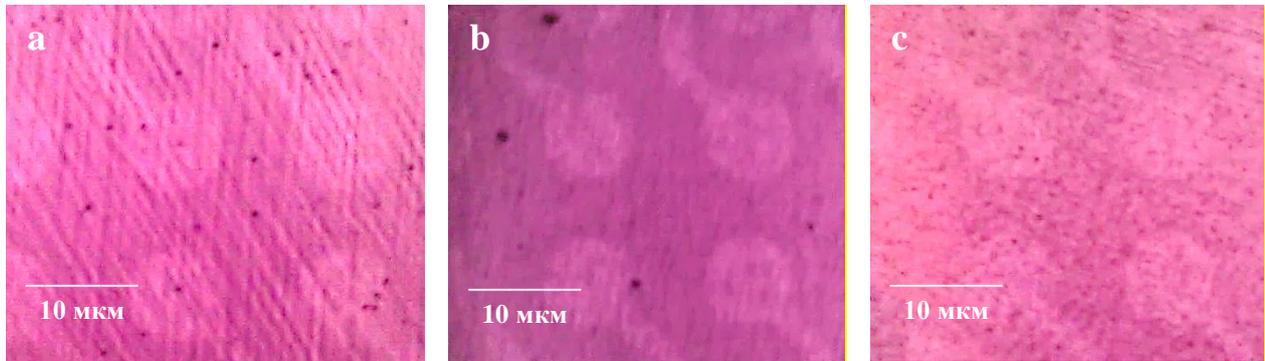


Рис. 8. Скопления примесных атомов никеля в Si:Ni.
а) до ТО, б) после ТО при температуре $T_{ТО}=450$ °С, в) после ТО при температуре $T_{ТО}=1200$ °С с последующей закалкой

Определено, что в контрольных образцах (Cz-Si) при дозе гамма-облучения $\Phi=3\cdot 10^6$ рад начинается увеличение удельного сопротивления, которое при дозе $\Phi=3\cdot 10^8$ рад изменяется в ~ 7 раз (рис. 9, где: ρ_0 и ρ – удельное сопротивление образцов до и после облучения соответственно). В то же время, при увеличении дозы гамма-облучения до $\Phi=3\cdot 10^8$ рад удельное сопротивление образцов Si:Ni уменьшается на ~ 30 %.

Уменьшение удельного сопротивления материала возможно за счет роста

подвижности или генерации дополнительных носителей заряда. Рост подвижности весьма мало вероятен, так как дефектность кристалла растет с дозой облучения. Механизм генерации дополнительных носителей заряда объясняется переходом межузельных атомов никеля в узлы, за счет заполнения радиационных вакансий атомами никеля. При этом никель становится электрически активным, формируя носители p -типа. Скопления никеля в условиях облучения являются практически бесконечным резервуаром для генерации межузельных атомов никеля, которые легко взаимодействуют с вакансиями (первичными радиационными дефектами).

После гамма - облучения образцов дозой $\Phi = 3 \cdot 10^8$ рад, проводился их поэтапный ($t_{TO}=10$ мин. для каждого этапа) ТО с последовательным увеличением температуры от 100°C до 600°C с шагом $\Delta T=100^\circ\text{C}$. После каждого этапа измерялись коэффициент Холла и удельное сопротивление образцов. Из полученных данных была рассчитана доля не отождённых дефектов $f=(p_0-p_{TO})/(p_0-p_\gamma)$, где: p_0 , p_γ , p_{TO} – концентрация дырок до облучения, после облучения дозой $\Phi=3 \cdot 10^8$ Рад и после каждого этапа ТО, соответственно.

Обнаружено, что после ТО при $T_{TO}=600^\circ\text{C}$ электрофизические параметры контрольных образцов соответствуют исходному Si, то есть, практически все радиационные дефекты, образованные при облучении, отжигаются (рис. 10). В то же время, ТО не влияет на параметры облученного Si:Ni. Это свидетельствует о том, что в таких кремниевых материалах при облучении концентрация вторичных РД мала, а возникшие дополнительные носители заряда не исчезают при отжиге, что говорит об их высокой устойчивости. Это подтверждает предложенный механизм изменения электрофизических параметров образцов Si:Ni при гамма-облучении.

Из анализа полученных экспериментальных результатов можно сказать, что наличие примесных атомов никеля увеличивает радиационную стойкость кремния. Легирование атомами Ni при выращивании в отличие от диффузионного способа является более технологичным и дешевым, что открывает новые возможности для создания кремниевых приборов с повышенной радиационной стойкостью.

Изучено, влияние примесных атомов никеля на радиационные изменение параметров поли-Si. На рис. 11 показано уменьшение концентрации ($\Delta n=n_\gamma-n_0$) носителей заряда в зависимости от дозы гамма-облучения в поли-Si,

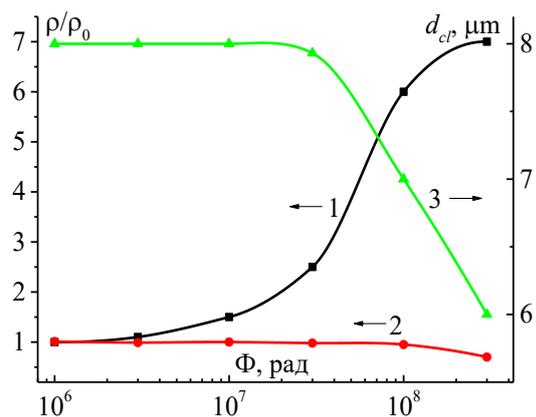


Рис. 9. Зависимость относительного удельного сопротивления (1-Cz-Si, 2-Si:Ni) и размер скоплений (3) от дозы гамма-облучения

легированного никелем при температуре 1200 °С и в контрольном поли-Si, где: n_0 и n_γ – концентрация носителей заряда до и после облучения. Из полученных данных видно, что в образцах поли-Si, легированном никелем, концентрация носителей заряда уменьшается, но при этом в $\sim 7\div 8$ раз меньше, чем в контрольном образце.

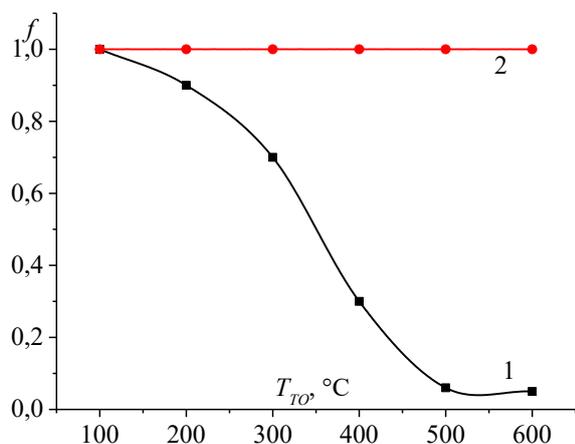


Рис. 10. Отжиг РД в контрольных образцах кремния (1) и в образцах Si:Ni (2)

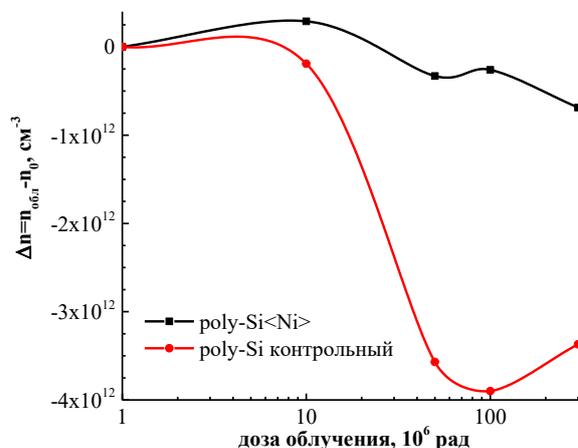


Рис. 11. Изменение концентрации носителей заряда в зависимости от дозы гамма-облучения

Исследование параметров поли-Si, легированного примесными атомами никеля и облученного гамма-квантами, показывает, что изменение концентрации носителей заряда зависит от температуры диффузии. С увеличением температуры диффузии атомов никеля радиационная стойкость параметров поли-Si увеличивается (табл. 6).

Таблица 6

Изменения концентрации носителей заряда в образцах поли-Si, легированного примесными атомами никеля

$T_{дифф}$, °C		850	900	950	1000	1050	1100	1150	1200
$-\Delta n$, 10^{13} см $^{-3}$	Ni	3,7	2,5	1,3	0,9	0,1	0,08	0,07	0,05
	C	2,6	5,5	8,2	4,3	3,8	3	0,8	0,4

Для исследования влияния гамма-облучения на параметры ФЭ на основе моно-Si, легированного никелем в качестве исходного материала использовались кремниевые пластины p -типа проводимости, с удельным сопротивлением $\rho=0,5$ Ом·см. На основе этих образцов, были получены ФЭ без примесных атомов никеля (группа-С) и легированные атомами никеля (группа-Ni). Диффузия Ni проводилась при $T_{дифф}=1200, 1000, 850$ °С в течение $t_{дифф}=3, 10, 30$ мин, соответственно, из напыленного в вакууме слоя. Затем создавался p - n -переход диффузией атомов фосфора (со стороны, на которую напылялся никель) при температуре $T_{дифф}=1000$ °С в течение $t_{дифф}=30$ мин. После диффузионной ТО проводилась дополнительная ТО при температуре $T_{ТО}=800\div 750$ °С в течение $t_{ТО}=30$ мин. ФЭ группы-С изготавливались по той же

технологии, исключая напыление Ni. Просветляющее покрытие на поверхности ФЭ отсутствовало.

На рис. 12 показана зависимость относительные изменения параметров ФЭ, легированных никелем при температуре $T_{дифф}=1200$ °С, от дозы гамма-облучения. где: $U_{xx,Ф}/U_{xx,0}$, $J_{кз,Ф}/J_{кз,0}$ – относительное изменение напряжение холостого хода и плотности тока короткого замыкания ФЭ, соответственно. $U_{xx,0}$, $J_{кз,0}$, и $U_{xx,Ф}$, $J_{кз,Ф}$ – значения параметров ФЭ до и после облучения, соответственно (табл. 7). С увеличением дозы гамма-облучения параметры ФЭ всех групп уменьшается.

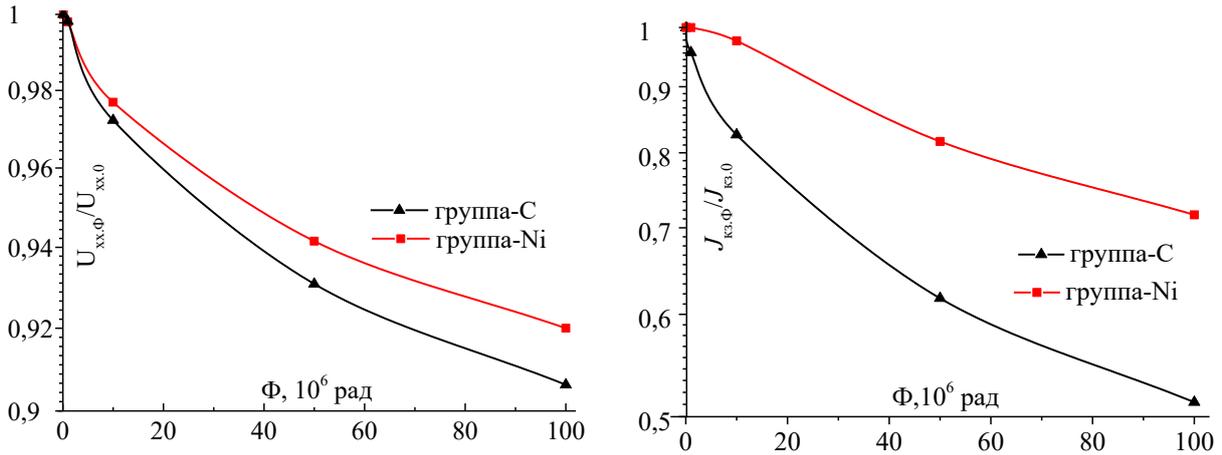


Рис. 12. Зависимость относительных изменений параметров ФЭ, легированных Ni при температуре $T_{дифф}=1200$ °С, от дозы облучения

При дозе $\Phi=10^8$ рад, значение U_{xx} ФЭ, легированных примесными атомами Ni при температуре $T_{дифф}=1200$ °С, уменьшается до 542,8 мВ (на ~8%), ФЭ группы-С до 490,3 мВ (на ~10%). Значение $J_{кз}$ для ФЭ группы-Ni уменьшается до 23,64 мА/см² (на ~28%), а у ФЭ группы-С до 15,5 мА/см² (на ~49%). В таблице 7 показаны параметры ФЭ до и после гамма-облучения и значения δ_A ($\delta_A=A_{Ni}/A_C$, где: A – параметры ФЭ (U_{xx} , $J_{кз}$, τ); A_{Ni} – параметры ФЭ легированного никелем; A_C – параметры контрольных ФЭ, изготовленных по той же технологии). Видно, что величины $\delta_\tau > \delta_J > \delta_U > 1$, то есть ФЭ группы-Ni эффективнее, чем ФЭ группы-С. С увеличением температуры диффузионной ТО никеля параметры ФЭ уменьшается, однако значение δ_A увеличивается и всегда имеют значение $\delta_A > 1$. Это показывает, что параметры ФЭ из группы-Ni меняются заметно меньше, чем параметры ФЭ группы-С. Из полученных экспериментальных результатов видно, что легирование атомами никеля повышает радиационную стабильность параметров ФЭ. С увеличением температуры легирования атомами никеля параметры ФЭ уменьшаются, но величина δ_A увеличивается. С увеличением дозы облучения концентрация вторичных РД в ФЭ увеличивается, а поскольку $\tau \sim 1/N_r$ (где: τ – время жизни неосновных носителей заряда, N_r – концентрация центров рекомбинации), то с увеличением дозы облучения τ должен уменьшаться. Соответственно также уменьшается диффузионная длина неосновных носителей заряда. Вследствие этого в ФЭ снижается количество неосновных носителей заряда, достигающих

p-n-перехода и ухудшаются параметры ФЭ.

Параметры ФЭ из группы-Ni меняются при облучении заметно меньше, чем параметры ФЭ из группы-C, что свидетельствует о существовании механизма подавления образования вторичных радиационных дефектов в этом материале.

Особенностью атомов никеля является наличие у них переменной валентности, что объясняется участием в химической связи *d*-электронов. Это, с одной стороны, определяет их высокие скорости миграции в решетке даже при низких температурах, а с другой – высокую вероятность их взаимодействия с дефектами решетки и технологическими примесями.

Таблица 7

Средние значения параметров ФЭ до и после облучения

Температура диффузии никеля, $T_{дифф}$, °C	Параметры ФЭ	До облучения ($\Phi=0$)			После облучения ($\Phi=10^8$ Рад)		
		Группа		δ_A	Группа		δ_A
		C	Ni		C	Ni	
1200	$U_{хв}$, мВ	541	590	1,09	490,3	542,8	1,1
	$J_{кз}$, мА/см ²	26	33	1,27	15,5	23,64	1,52
	τ , μs	8	14	1,75	5	12	2,4
1000	$U_{хв}$, мВ	570	590	1,04	466	514	1,1
	$J_{кз}$, мА/см ²	30	35	1,17	17,56	24,15	1,38
	τ , μs	12	20	1,67	10	17	1,7
850	$U_{хв}$, мВ	590	605	1,03	482	541,4	1,12
	$J_{кз}$, мА/см ²	32	38	1,19	18,8	27,74	1,48
	τ , μs	15	24	1,6	13	21	1,62

При высокой концентрации межузельных примесных атомов Ni в кремниевом материале основным будет процесс взаимодействия примесных атомов с первичными радиационными дефектами. Перемещаясь по кристаллу, межузельные атомы Ni интенсивно взаимодействует с радиационно генерируемыми вакансиями. Замещение никелем вакансионного центра генерирует «узельные» атомы Ni и, следовательно, образование вторичных радиационных дефектов подавляется.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При диффузионном легировании образцов поли-Si, как и моно-Si образуется поверхностный обогащённый никелем слой. Поверхностная концентрация никеля в обоих образцах уменьшается с увеличением температуры диффузионной ТО. Показано, что при диффузионном легировании концентрация атомов никеля в приповерхностной области образцов поли-Si в 3÷4 раза больше, чем в образцах моно-Si, а концентрация электроактивных атомов никеля в поли-Si на порядок меньше, чем в моно-Si.

2. При диффузионном легировании как поли-Si, так и моно-Si образуются никелевые скопления. Размер никелевых скоплений в образцах поли-Si на два

порядка меньше, а концентрация скоплений в 10^3 раза больше, чем в образцах моно-Si.

3. Изучено влияние гамма-облучения (температура облучения ~ 27 °C) в интервале доз $\Phi = 10^5 \div 10^8$ рад на параметры ФЭ на основе моно-Si, диффузионно легированного примесными атомами никеля. Определено, что с увеличением температуры диффузии атомов никеля увеличивается радиационная стойкость параметров ФЭ.

4. Исследованы электрофизические и оптические свойства кремния, легированного никелем при выращивании. Экспериментально выявлено, что в таких материалах размер скоплений составляет $\sim 6 \div 8$ мкм, а их концентрация составляет $\sim (5 \div 8) \cdot 10^3$ см⁻². Легирование никелем кремния при выращивании кристалла уменьшает концентрацию оптически активного кислорода на $\sim 25 \div 30$ %.

5. Установлено, что не зависимо от способа легирования (как диффузией, так и в процессе выращивания), наличие никеля в кремнии способствует подавлению генерации термодоноров, образующихся при 450 °C, закалочных термодфектов, а также радиационных дефектов, образующихся при гамма-облучении. В образцах кремния, легированного никелем при выращивании, с увеличением температуры ТО от 450 °C до 1200 °C поверхностная концентрация примесных атомов никеля увеличивается от $1,05 \cdot 10^{11}$ см⁻² до $5,07 \cdot 10^{12}$ см⁻², соответственно.

6. В кремнии, легированном примесными атомами никеля при выращивании, с увеличением дозы гамма-облучения, размер никелевых скоплений и удельное сопротивление образца уменьшаются. Облучение гамма-квантами образцов кремния, легированных примесными атомами никеля, рекомендуется как технологический способ увеличения концентрации электроактивных атомов никеля в кремнии. Легирование примесными атомами никеля при выращивании, рекомендовано как оптимальный технологический способ для получения кремния с радиационно-стойкими параметрами при гамма-облучении.

**SCIENTIFIC COUNCIL No. DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 FOR THE
AWARD OF ACADEMIC DEGREES AT THE SCIENTIFIC RESEARCH
INSTITUTE OF SEMICONDUCTOR PHYSICS AND
MICROELECTRONICS OF THE NATIONAL UNIVERSITY OF
UZBEKISTAN**

**KARAKALPAK STATE UNIVERSITY
TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY**

KOSBERGENOV ERNAZAR JUSIPBAY ULY

**INFLUENCE OF TEMPERATURE AND GAMMA IRRADIATION ON
THE PARAMETERS OF SILICON DOPED WITH NICKEL AND
PHOTOCELLS BASED ON IT**

01.04.10-Physics of semiconductors

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

Tashkent-2023

The theme of the doctoral dissertation (PhD) was registered by the Supreme Attestation commission under the Ministry of higher education, science and innovation of the Republic of Uzbekistan under No. B2022.4.PhD/FM769

Dissertation has been prepared at Karakalpak State University and Tashkent State Technical University.

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

Scientific supervisor: **Ismaylov Qanatbay Abreymovich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor.

Official opponents: **Turgunov Nozimjon Abdumannopovich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Ass. Professor

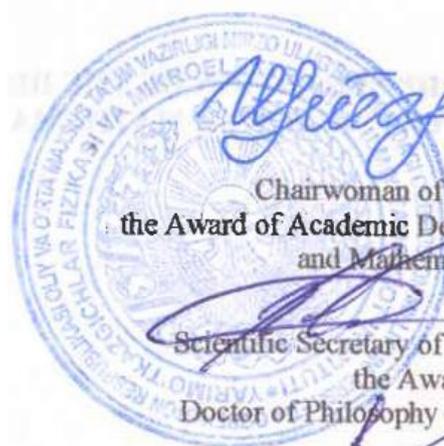
Yulchiev Shakhriyor Khusanovich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor.

Leading organization: **Namangan State University**

The dissertation will be defended on « 07 » 09 2023, at 12-00 at the meeting of the Scientific Council No. DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 at the Research Institute of Semiconductor Physics and Microelectronics of the National University of Uzbekistan at the address: 100057, Tashkent, st. Yangi Almazar, house 20. Tel./Fax: (+99871) 248-79-91 / (+99871) 248-79-92, e-mail: info@ispm.uz.

The dissertation can be found in the Department of Implementation of Digital Educational Technologies of the Institute (registered under No. 54) at the address: 100057, Uzbekistan, Tashkent, st. Yangi Almazar, house 20. Tel: (+99871) 248-79-59.

The abstract of the dissertation was sent out « 25 » 08 2023
(distribution protocol No. 54 dated « 25 » 08 2023)



Sh.B. Utamurodova,
Chairwoman of the Scientific Council for
the Award of Academic Degrees, Doctor of Physical
and Mathematical Sciences, Professor

J.J. Khamdamov,
Scientific Secretary of the Scientific Council for
the Award of Academic Degrees,
Doctor of Philosophy (PhD), Senior Researcher

N.A. Turgunov,
Chairman of the Scientific Seminar at the
Scientific Council for the Award of Academic
Degrees, Doctor of Physics and Mathematics,
Associate Professor

INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

The aim of the research work is to determine the effect of temperature and gamma-irradiation on the parameters of poly-Si and mono-Si doped with impurity nickel atoms, as well as photocells based on them.

The object of the research work – mono-Si grown by Czochralski method (Cz-Si, *p*-type conductivity, with hole concentration $N_p=(2\div3)\cdot 10^{14}$ cm⁻³); mono-Si grown by float zone melting (Fz-Si, *n*-type conductivity, with electron concentration $N_n=(2\div5)\cdot 10^{13}$ cm⁻³); poly-Si (grain size 10÷500 μm, *n*-type conductivity, with electron concentration $N_n=(2\div5)\cdot 10^{13}$ cm⁻³); mono-Si doped with impurity nickel atoms during growth (*p*-type conductivity, with hole concentration $N_p=(2\div3)\cdot 10^{14}$ cm⁻³); industrially manufactured photocells based on poly-Si and mono-Si having a $p^+ - p - n^+$ structure.

The subject of the research work are changes in the electrical, photovoltaic and optical properties of poly-Si and mono-Si doped with impurity nickel atoms and photovoltaic cells based on them after exposure to ⁶⁰Co gamma-quanta irradiation and thermal treatments.

Scientific novelty of the research is as follows:

it has been determined that surface concentration of impurity atoms of nickel in poly-Si samples diffusively alloyed with nickel in the temperature range 850÷1200 °C is ~3÷4 times higher than in mono-Si samples;

it is determined that surface concentration of nickel in the samples of poly-Si alloyed with the impurity nickel atoms decreases from $9,43\cdot 10^{13}$ cm⁻² to $1,2\cdot 10^{13}$ cm⁻² with increasing diffusion heat treatment temperature from 850 °C to 1200 °C;

it was found that the concentration of electroactive nickel atoms in poly-Si samples at diffusion temperature of 1200 °C is $\sim 4\cdot 10^{13}$ cm⁻³ and this value is an order of magnitude lower than that in mono-Si samples;

using the infrared microscopy method, it was found that the size of impurity nickel atom clusters in poly-Si samples is $\sim 10^2$ times smaller and their concentration is $\sim 10^3$ times larger than in mono-Si samples;

the infrared microscopy method revealed that in the samples of mono-Si doped with nickel during growth, the size of nickel clusters is $\sim 6\div 8$ μm, and their concentration reaches $\sim (5\div 8)\cdot 10^3$ cm⁻². Using the secondary mass spectroscopy method it was determined that the concentration of nickel atoms in the volume of these samples is $\sim (1\div 2)\cdot 10^{17}$ cm⁻³;

it is determined that in mono-Si samples alloyed with nickel during growth, with increase of temperature of thermal treatment from 450 °C to 1200 °C surface concentration of impurity atoms of nickel is increased from $1,05\cdot 10^{11}$ cm⁻² up to $5,07\cdot 10^{12}$ cm⁻² correspondingly.

Implementation of research results.

On the basis of the received results of study of features of influence of thermal treatments and gamma-irradiation on parameters of poly-Si and mono-Si doped with impurity atoms of nickel and photocells on their basis:

the surface nickel concentration in poly-Si samples diffusively doped with

nickel is $\sim 3\div 4$ times higher than in mono-Si samples, the surface nickel concentration in both samples decreases with increasing diffusion heat treatment temperature, in silicon samples doped with nickel during growth, with increase in temperature of heat treatment from 450 °C to 1200 °C (time of heat treatment – 2 hours) surface concentration of impurity atoms of nickel increases from $1,05 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ to $5,07 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, optimum technological solution for increasing resistance to heat treatment and gamma-irradiation of poly-Si and mono-Si has been determined (Reference № 04-3/1894 of Uzeltexsanoat Association, 28 December 2022). The use of the obtained results made it possible to manufacture prototypes that correspond to the results of the world analogues and are resistant to gamma-irradiation;

in the process of implementation of fundamental project F-2-41 “Radiation stimulated processes in nuclear transmutation of doped silicon” the following results were used: The concentration of electroactive nickel atoms in poly-Si samples is an order of magnitude lower than in mono-Si samples and is $\sim 4 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ at 1200 °C diffusion heat treatment temperature; with increasing diffusion heat treatment temperature ($T > 1000 \text{ °C}$) the main photocells parameters (short-circuit current, open-circuit voltage) based on poly-Si alloyed with impurity nickel atoms increase relative to those of control photocells; regardless of alloying method (both by diffusion and in the process of growing) the presence of nickel atoms in the silicon contributes to suppression of generation of thermodeflectors formed during thermal treatment at 450 °C, quenching thermodeflects and radiation defects formed during gamma-irradiation; In silicon samples doped with nickel during growth, with increasing of heat-treatment temperature from 450 °C to 1200 °C (time of heat-treatment – 2 hours), surface concentration of impurity atoms of nickel increases from $1,05 \cdot 10^{11}$ to $5,07 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, respectively (Reference № 2/1255-3123 Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan dated December 12, 2022). Use of the obtained results made it possible to determine nickel concentrations and thermal stability of samples alloyed in the process of nuclear transmutation.

Approbation of the results of the study. The main scientific results of the dissertation work were reported and discussed at 7 international and 4 Republican scientific and practical conferences.

Publication of the research results. On the topic of the dissertation, 22 scientific works were published, including 6 articles in scientific journals recommended for publication of scientific results of doctoral dissertations at the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan, 3 of them foreign journals.

Structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, five chapters, a conclusion, a list of references and applications. The thesis contains 105 pages including 45 figures, 19 tables.

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

I bo'lim (I часть; part I)

1. Bakhadyrkhanov M. K., Ismailov K. A., Kosbergenov E. Zh. Thermal stability of electrical parameters of silicon crystal doped with nickel during growth // *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 2022. Vol. 25, No. 1. -pp. 6-9. (№ 3 Scopus, CiteScore: 0,8)
2. Ismailov K. A., Kenzhaev Z. T., Koveshnikov S. V., Kosbergenov E. Zh., Ismaylov B. K. Radiation Stability of Nickel Doped Solar Cells // *Physics of the Solid State*, 2022. Vol. 64, No. 3. -pp. 154–156. (№ 3 Scopus, IF: 0,848)
3. Ismailov K. A., Zikrillaev N. F., Koveshnikov S. V., Kosbergenov E. J. Comparative study of photocells based on silicon doped with nickel by various methods // *Semiconductors*, 2022, Vol. 56, No. 4. –pp. 306-308. (№ 11 Springer, IF: 0,848)
4. Исмайлов К. А., Косбергенов Е. Ж. Исследование деградации солнечных элементов на основе поликристаллического кремния // *Ilm ha'm ja'miyet*, 2020. №4. –С. 9-11. (01.00.00. № 15)
5. Ismailov K. A., Kosbergenov E. J. Generation of thermodonors in silicon doped with nickel during growth // *Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering*, 2021. Vol. 3, No. 2. –pp. 16-19. (01.00.00. № 16)
6. Ismailov K. A., Kosbergenov E. J. Radiation resistance of nickel-doped polycrystalline silicon // *Science and Education in Karakalpakstan*, 2021. No. 4/3. –pp. 28-30. (01.00.00. № 11)

II bo'lim (II часть; part II)

7. Косбергенов Е. Ж. Влияние атомов никеля на радиационную и термическую стойкость поликристаллического кремния // *Приборы*, 2021. № 9 (255). -С. 40-43.
8. Ismailov K. A., Kosbergenov E. J. Temperature dependence of diode parameters based on nickel-doped silicon during growing // *International Workshop "Functional materials for energy applications"*, Urgench 2021. -С. 30-31.
9. Ismailov K. A., Kosbergenov E. J. Influence of temperature on the parameters of polycrystalline silicon solar elements doped with nickel // *VII international conference structural relaxation in solids*, Vinnitsa 2021. -pp. 101-104.
10. Исмайлов К. А., Илиев Х. М., Косбергенов Е. Ж. Миркомилова М., Маджитов М. Х. Радиационная стойкость поликристаллического кремния, легированного никелем // *Наноструктурные полупроводниковые материалы в фотоэнергетике*, II Международная научная конференция, Ташкент 2021. -С. 416-418.

11. Бахадырханов М. К., Исмаилов К. А., Косбергенов Е. Ж., Олламбергенов Ш. З. Эффективность солнечных элементов на основе кремния легированного никелем при выращивании // “Фундаментальные и прикладные проблемы физики полупроводников, микро- и наноэлектроники I Международная конференция, Ташкент 2021. -С. 190-192.

12. Исмаилов К. А., Ковешников С. В., Косбергенов Е. Ж., Аскарлов М. А., Мавлонов А. Установка для измерения температурных характеристик фотоэлементов // Республиканская научно-практическая конференция на тему “Актуальные проблемы физики полупроводников, микро- и наноэлектроники”, Ташкент 2022, -С.123-126.

13. Косбергенов Е. Ж. Влияние облучения гамма-квантами на свойства кремния, легированного никелем при выращивании // Республиканская научно-практическая конференция на тему «Роль и место физики в области техники», Нукус 2021. -С. 124-127.

14. Косбергенов Е. Ж. Ускорение исследования световой деградации фотоэлементов // Республиканская научно-практическая конференция на тему «Роль и место физики в области техники», Нукус 2021. -С. 112-116.

15. Косбергенов Е. Ж. Генерация термодоноров в кремнии легированного никелем при выращивании // Материалы Международной научной конференции «Тенденции развития физики конденсированных сред» Фергана 2021. -С. 210-212.

16. Исмаилов К. А., Исмаилов Б. К., Косбергенов Е. Ж., Раджабова Г. К. Влияние температуры на параметры поликристаллических солнечных элементов легированных никелем // Республиканская научно – техническая конференция “физика полупроводников, микро- и наноэлектроника: перспективы интеграции науки, образования и производства” Ташкент 2021. -С. 67-70.

17. Косбергенов Е. Ж. Выбор примесей для создания радиационно-стойкого кремния // Республиканская научно-техническая конференция “физика полупроводников, микро - и наноэлектроника: перспективы интеграции науки, образования и производства”, Ташкент 2021. -С. 48-53.

18. Исмаилов К. А., Тачилин С. А., Косбергенов Е. Ж., Кенжаев З. Т. Кремний легированный никелем при выращивании кристалла, как перспективный материал для солнечных элементов // Международная научно-техническая конференция: «Тенденции развития альтернативной и возобновляемой энергетики: проблемы и решения», Ташкент, 17-18 Май, 2021. -С. 271-274.

19. Косбергенов Е. Ж., Исмаилов Б. К., Ковешников С. В., Асанов Д. Ж. Методика сравнительного исследования световой деградации фотоэлементов // Международная научно-техническая конференция: «Тенденции развития альтернативной и возобновляемой энергетики: проблемы и решения», Ташкент 2021. -С. 198-202.

20. Косбергенов Е. Ж., Эгамбердиева З. А., Раджабова Г. К. Изучение влияния легирования никелем солнечных элементов на основе

поликристаллического кремния // I Республиканскую научную конференцию молодых ученых и студентов-физиков (РНКМУСФ–I). Ташкент 2021, -С. 200-202.

21. Исмаилов К. А., Кенжаев З. Т., Косбергенов Е. Ж., Олламбергенов Ш.З. Повышения эффективности кремниевых фотоэлементов легированием никелем // I Республиканскую научную конференцию молодых ученых и студентов-физиков (РНКМУСФ–I), Ташкент 2021, -С. 163-165.

22. Исмаилов К. А., Кенжаев З. Т., Косбергенов Е. Ж. Деградационные свойства фотоэлементов на основе поликристаллического кремния, дополнительно легированного никелем // Материалы международной научной конференции «Наноструктурные полупроводниковые материалы в фотоэнергетике» Ташкент, 9-10 Октября, 2020, -С. 263-265.

Avtoreferat “Til va adabiyot ta’limi” jurnali taxririya-tadqiqotida taxrirdan o‘tkazildi va o‘zbek, rus va ingliz tillaridagi matnlarini mosligi tekshirildi (28.07.2023).

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

Shartli bosma tabog‘i: 3. Adadi 60. Buyurtma № 50.

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.

