

**YADRO FIZIKASI INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR
BERUVCHI DSC.02/30.12.2019.FM/T.33.01 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

YADRO FIZIKASI INSTITUTI

ERDONOV MUZAFFAR NAZAROVICH

**MONOKRISTAL KREMNIYNING XOSSALARINI KOBALT VA
RADIASIYAVIY NUQSONLAR KIRITISH ORQALI
TAKOMILLASHTIRISH**

01.04.07 – Kondensirlangan holat fizikasi

**fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi
AVTOREFERATI**

Toshkent – 2025

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

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

**Content of the dissertation abstract of the doctor of philosophy (PhD)
on physical and mathematical sciences**

Erdonov Muzaffar Nazarovich

Monokristal kremniyning xossalarini kobalt va radiasiyaviy nuqsonlar kiritish orqali takomillashtirish 5

.....

Эрдонов Музаффар Назарович

Модификация свойств монокристаллического кремния путем введения примеси кобальта и радиационных дефектов..... 23

Erdonov Muzaffar Nazarovich

Modification of silicon single crystal properties by doping with cobalt and radiation defects..... 42

.....

E‘lon qilingan ishlar ro‘yxati

Список опубликованных работ

List of 44

publications.....

**YADRO FIZIKASI INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR
BERUVCHI DSC.02/30.12.2019.FM/T.33.01 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

YADRO FIZIKASI INSTITUTI

ERDONOV MUZAFFAR NAZAROVICH

**MONOKRISTAL KREMNIYNING XOSSALARINI KOBALT VA
RADIASIVAVIY NUQSONLAR KIRITISH ORQALI
TAKOMILLASHTIRISH**

01.04.07 – Kondensirlangan holat fizikasi

**fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi
AVTOREFERATI**

Toshkent – 2025

Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida № B2024.2. PhD/FM1110 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya O'zbekiston Respublikasi Fanlar Akademiyasi Yadro fizikasi institutida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengash veb-sahifasida (www.inp.uz) va "Ziyonet" axborot-ta'lim tarmog'ida (www.ziyonet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar:

Maxkamov Shermaxmat

fizika-matematika fanlari nomzodi, katta ilmiy xodim

Rasmiy opponentlar:

Rajapov Sali Ashirovich

fizika-matematika fanlari doktori, katta ilmiy xodim

Muxtarov Adil Pozilovich.

fizika-matematika fanlari nomzodi, katta ilmiy xodim

Yetakchi tashkilot:

Mirzo Ulug'bek nomidagi O'zbekiston Milliy universiteti qoshidagi Yarimo'tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti

Dissertatsiya himoyasi Yadro fizikasi instituti huzuridagi DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 raqamli Ilmiy kengashning 2025-yil _____ soat _____ dagi majlisida bo'lib o'tadi (Manzil: 100214, Toshkent shahri, Ulug'bek qo'rg'oni, Yadro fizikasi instituti. Tel.: (+99871) 289-31-41; faks: (+99871) 289-36-65; e-mail: info@inp.uz).

Dissertatsiya bilan Yadro fizikasi institutining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (_____ raqami bilan ro'yxatga olingan). Manzil: 100214, Toshkent shahri, Ulug'bek qo'rg'oni, Yadro fizikasi instituti. Tel.: (+99871) 289-31-19.

Dissertatsiya avtoreferati 2025-yil "____" _____ kuni tarqatildi.

(2025-yil "____" _____ dagi _____ raqamli reyestr bayonnomasi).

M.Yu.Tashmetov

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

O.R.Tojiboyev

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash
ilmiy kotibi, f.-m.f. PhD, katta ilmiy xodim

S.B.Igamov

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash qoshidagi
ilmiy seminar raisi, f.-m.f.d., katta ilmiy xodim

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Hozirgi vaqtda zamonaviy qattiq jism mikroelektronikasining rivojlanishi va uning qo'llanilishi dunyoda shunday tez sur'atlar bilan amalga oshirilmoqda-ki, bu tadqiqotchilar va ishlab chiquvchilardan yarimo'tkazgichli materiallarning xususiyatlarini maqsadli boshqarishni talab qiladi. Yarimo'tkazgichli mahsulotlarning integratsiya darajasini oshirish va funksional maqsadini kengaytirish muqarrar ravishda faol elementlar hajmini nano masshtabli o'lchamlarga kamaytirishga olib keladi. Natijada asosiy kristalning ta'qiqlangan zonasida elektr faol energiya markazlarini tashkil etuvchi strukturaviy nuqson markazlarini shakllantirish bilan bog'liq fundamental va amaliy muammolar paydo bo'ladi. Kristalli strukturaning bir jinsligini oshirish va yarimo'tkazgichli materialning xususiyatlarini boshqarish qattiq jism nanoelektronikasining eng muhim muammolaridan biridir.

Zamonaviy qattiq jismlar elektronikasi sohasida olib borilgan tadqiqotlar va yutuqlar kristallarning xususiyatlarini nafaqat chuqur tozalash, balki kirishmalar yoki radiatsiya nuqsonlarini nazorat ostida kiritish orqali ham nazorat qilish imkoniyatlarini ko'rsatdi. Yarimo'tkazgichli materiallar va ularga asoslangan mahsulotlarning xususiyatlarini kristalning ta'qiqlangan zonasida ma'lum elektron darajalarni hosil qiladigan rekombinatsion nuqson markazlarini yaraish orqali o'zgartirish turli funksional maqsadlarga yo'naltirilgan qattiq jismlar mikroelektronika qurilmalarini ishlab chiqish uchun mustaqil yondashuvga aylandi.

Yadro fizikasi ob'ektlarining mavjudligi va muvaffaqiyatli ishlashi, shuningdek, O'zbekiston Respublikasi Fanlar Akademiyasi yadro fizikasi instituti ilmiy laboratoriyalari tomonidan taqdim etilgan jihozlar darajasini hisobga olgan holda, zamonaviy yarimo'tkazgichlar mikroelektronikasining asosiy materialining xususiyatlarini o'zgartirish bo'yicha qo'yilgan vazifalar samarali hal qilinishi mumkin bo'lgan monokristalli kremniy asosida amalga oshiriladi. Mamlakatimizda ilm-fanni rivojlantirish va uni keng qo'llash uchun zarur bo'lgan ushbu fundamental va amaliy tadqiqotlarning yo'nalishlari yangi O'zbekistonning 2022-2026-yillarga mo'ljallangan rivojlanish strategiyasida o'z aksini topgan.

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-son "2022-2026-yillarga mo'ljallangan yangi O'zbekistonning taraqqiyot Strategiyasi to'g'risida"gi farmoni, 2018-yil 27-apreldagi PQ-3682-son "Innovatsion g'oyalar, texnologiyalar va loyihalarni amaliy joriy etish tizimini yanada takomillashtirish chora-tadbirlari to'g'risida", 2018-yil 7-maydagi PQ-3698-son "Iqtisodiyot tarmoqlari va sohalariga innovatsiyalarni joriy etish mexanizmlarini takomillashtirish bo'yicha qo'shimcha chora-tadbirlar to'g'risida", 2019-yil 7-fevraldagi PQ-4165-son "2019-2029-yillarda O'zbekiston Respublikasida atom energetikasini rivojlantirish konsepsiyasini tasdiqlash to'g'risida"gi qarorlari hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa normativ-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiya muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga mosligi. Mazkur tadqiqot ishi respublika fan va texnologiyalari

rivojlanishining II. “Energetika, energiya va resurs tejamligi” ustuvor yo‘nalishiga muvofiq bajarilgan.

Muammoning o‘rganilganlik darajasi. Legirlangan yarimo‘tkazgichlar va ko‘rsatilgan materiallarda kirishmali va radiatsiyaviy strukturaviy nuqsonlarning hosil bo‘lishining radiatsiya bilan stimulyatsiyalangan jarayonlari sohasida eksperimental va nazariy tadqiqotlar ko‘plab xorijiy hamda mahalliy olimlar tomonidan taniqli ilmiy markazlarda, masalan, AQSH (Watkins G.D., Corbett J.M., Sah C.T., Hal K.H., Lang D.V., Bourgoin J., Jonson N.M.), Rossiya (Лебедев А.А., Шуман В.Б., Фистул В.И., Болтакс Б.И., Смирнов Г.С., Вавилов В.С., Емцев В.В., Козловский В.В.), O‘zbekiston (Муминов Р.А., Бахадырханов М.С., Мамадалимов А.Т., Зайнабидинов С., Абдурахманов К.П., Утамуратова Ш.Б., Юнусов М.С., Каримов М.) va boshqalar tomonidan tadqiq qilingan.

Chet ellik va bizning olimlarimiz tomonidan monokristalli kremniyning xossalarini kirishmali va radiatsiyaviy nuqsonlarni kiritish orqali o‘zgartirish sohasida olib borilgan tadqiqotlar issiqlik diffuziya usuli bilan legirlashda hajmga tez tarqaladigan kirishmalarning turlarini, ularning eruvchanligi va diffuziya koeffitsiyentini, energiya spektrlarini va boshqa nuqsonlarning ta‘sirini o‘rganishga hamda yarimo‘tkazgich materiallarning xossalari bo‘yicha radiatsiya texnologiyasidan foydalanish imkoniyatlarini aniqlash va yaxshilangan strukturaviy parametrlari hamda elektrofizik xususiyatlariga ega yadroviy-transmutatsion kremniy olish imkonini berdi.

Biroq kremniyning chuqur sathli strukturaviy nuqsonlarini shakllantirish bo‘yicha aniq eksperimental ma‘lumotlar mavjudligiga qaramasdan, kirishmali va radiatsiya nuqsonlarini kiritish orqali legirlangan yarimo‘tkazgichlarning xususiyatlarini maqsadli o‘zgartirish bilan bog‘liq bir qator masalalar noaniqligicha qolmoqda. Bu, birinchi navbatda, chuqur energiya sathini yaratadigan nuqson markazlarining parametrlarini aniqlashda ishonchli nazariy yondashuvlarning yo‘qligi bilan bog‘liq. Ikkinchidan, adabiyotlarda bir qator kirishmalaridagi eruvchanlik qiymati bo‘yicha nomuvofiqlik hamda kirishmali va radiatsiya nuqsonlari tufayli yuzaga kelgan chuqur sathlarning energiya spektrlari, radiatsiyaviy ishlov berish jarayonida materiallar va ular asosidagi qurilmalarda hosil bo‘lgan strukturaviy nuqsonlar markazlari turi konsentratsiyasi bo‘yicha nomuvofiqlik mavjud. Shuningdek, legirlangan kristallardagi kirishmali nurlanish nuqsonlarining o‘zaro ta‘siri mexanizmi va termoradiatsiya ta‘siri ostida strukturaviy o‘zgarishlar hamda yarimo‘tkazgich materialining modifikatsiyasiga ta‘sir qiluvchi bir qator boshqa omillar aniq emas.

Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan ilmiy tadqiqot muassasasining ilmiy tadqiqot ishlari rejalari bilan bog‘liqligi. Dissertatsiya tadqiqoti O‘zbekiston Respublikasi Fanlar Akademiyasi Yadro fizikasi instituti ilmiy-tadqiqot ishlari rejasining OT-F2-20 “Legirlangan kremniyda radiatsiya ta‘sirida yuz beradigan kichik o‘lchamli struktura o‘zgarishlari va ularning monokristall xossalariga ta‘siri” (2017-2020) mavzusidagi loyihasi hamda O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2019-yil 21-noyabrdagi PQ-4526-son qarori asosida “Legirlangan monokristalli kremniy yadro transmutatsiyasida radiatsion- stimullangan jarayonlar” (2020-2024) mavzusidagi ilmiy tadqiqot ishlari dasturi doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi kremniyning xususiyatlarini va kobalt kirishmali hamda radiatsiyaviy elektr faol nuqson markazlari bilan kompensatsiyalangan kremniy $p^+ - n - n^+$ diodli tuzilmalarning xususiyatlarini boshqarishdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

bir kristalli n -tipli kremniy kobalt kirishmalari bilan legirlashning termal diffuziya texnologiyasini o'zlashtirish va kobalt eruvchanligining haroratga bog'liqligini va kirishmali qattiq eritmaning kremniy namunalari hajmida taqsimlanishini aniqlash;

kobaltning elektr faol kirishma markazlarining turi, konsentratsiyasini, ularning elektrofizik, rekombinatsiya parametrlari va legirlangan kremniyning mikroqattiqligiga ta'sirini aniqlash;

yuqori energiyali yadro zarralarining legirlangan namunalarda xossalari va ular asosidagi mahsulotlarning xarakteristikasiga ta'sirini o'rganish;

diffuzion p^+ qatlarning chuqurligiga qarab $p^+ - n - n^+$ tuzilmalarida radiatsiya nuqsoni markazlarining hosil bo'lishining kinetik jarayonlarini o'rganish;

harorat va nurlanish bir vaqtning o'zida ta'sir qilganda radiatsiyaviy nuqsonlar markazlarining turlari va shakllanish samaradorligini aniqlash;

kobaltning chuqur sathli nuqson markazlarining va radiatsiyaviy nuqsonlarining kremniy diodlarning ishlash tezkorligiga ta'sirini aniqlash.

Tadqiqotning obyekti sifatida kobalt kirishmali n -tipli monokristal kremniy namunalari va diffuziya qilingan $p^+ - n - n^+$ diod tuzilmalar olingan.

Tadqiqotning predmeti deb kobalt kirishmali va radiatsiya ta'sirida hosil qilingan elektr faol nuqson markazlari bo'lgan monokristalli kremniyning xususiyatlarini boshqarish hamda optimallashtirish jarayonlari olingan.

Tadqiqotning usullari: chuqur sathlar noturg'un sig'imli spektroskopiyasi (DLTS); Xoll konstantasining haroratga bog'liqlik usuli, neytron faollashuvi tahlili, Vikers mikroqattiqligi sinovi va $p - n$ tuzilmalarining teskari qarshiligini tiklash vaqtini o'lchash.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

termal diffuziya usuli bilan legirlash paytida kremniydagi kobalt konsentratsiyasining taqsimot profili aniqlangan, va birinchi marta reaktor neytronlarini faollashtirish tahlili usuli bilan kobalt aralashmalari va uning ^{59}Co hamda ^{56}Co radionuklidining kremniydagi eruvchanlik konsentratsiyasidagi farq aniqlangan; Si dagi Co ning eruvchanligining haroratga bog'liqligini tavsiflovchi empirik ifodalar olingan;

birinchi marta ionlanish energiyasi $E_c - 0,41$ eV va $E_c - 0,55$ eV bo'lgan diodlarning tayanch hududida, kobaltning akseptor tipidagi chuqur sathli kompensatsion elektr faol rekombinatsiya markazlarini shakllantirish orqali n -Si diffuziya diodlarining ishlash tezligini oshirish imkoniyati ko'rsatilgan;

birinchi marta kremniy $p^+ - n - n^+$ diodli konstruksiyalarning teskari qarshiligini tiklash vaqtini kobalt kirishmani kiritish va hosil bo'lgan diffuziya p^+ qatlarning chuqurligiga qarab elektron, proton hamda gamma-nurlar bilan nurlantirish vaqtida kompensatsion nurlanish nuqson markazlarini shakllantirish orqali tartibga solish imkoniyati taklif etilgan;

termostabil (450 °C gacha) rekombinatsion nurlanish nuqsonlari markazlarini yaratish uchun termo-radiatsiya texnologiyasi ishlab chiqilgan bo'lib, u keng diapazonda $p^+ - n - n^+$ tuzilmalarining diffuziya tezligini tartibga solish imkoniyatini bergan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

termal diffuziya yo'li bilan bir hil legirlangan n -tipli kremniy Co kirishma bilan olishning optimal usullari, Si:Co qattiq eritmasida kirishma konsentratsiyasining taqsimlanishini nazorat qilishning yadroviy analitik usuli taklif etilgan va joriy qilingan;

Aniqlanishicha, n -tipli kremniy namunalarning radiatsiya sezgirligini kompensatsiya qiluvchi kobalt kirishma markazlarini joriy etish orqali akseptor elektr faol markazlari konsentratsiyasini oshirish mumkinligi aniqlangan;

n -Si diodlarining tezligini ikki tartibgacha oshirishning texnologik imkoniyatlari aniqlangan, buning uchun Co bilan legirlangan kremniyda $E_c - 0,41$ eV va $E_c - 0,53$ eV energiya darajasida joylashgan elektr faoligi yuqori bo'lgan chuqur rekombinatsiya sathlarini yaratiladi;

diffuziya diodlarida radiatsiya nuqsonlari hosil bo'lish samaradorligining p^+ -qatlam hosil qilinish chuqurligiga bog'liqligi aniqlangan, bu esa diodlarning teskari qarshiligini tiklanish vaqtini keng diapazonda tartibga solish hamda yuqori vaqtiga ega diodlarni olish imkonini beradi.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi ma'lumotlari sinovdan o'tgan eksperimental usullar va nazariy yondashuvlar majmuasidan foydalanish, olingan natijalarni boshqa tadqiqotchilar ma'lumotlari bilan taqqoslash va ularga asoslangan natijalar hamda xulosalarning mavjud umumiy fizikaviy tushunchalar va qonuniyatlarga zid kelmasligi bilan tasdiqlanadi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati shundan iboratki, ilmiy ahamiyati fizik jarayonlarni, nuqson holatlarining o'zaro ta'sirini aniqlash va kirishma, radiatsiya, o'ziga xos va boshqa tuzilmaviy nuqsonlar ishtirokida sodir bo'ladigan kvazi-kimyoviy reaksiyalarni aniqlash, ularning komplekslarini hosil qilish mexanizmini o'rnatish, yarimo'tkazgich konstruksiyalarning xossalari nazorat qilish usulini ishlab chiqishdan iborat.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati nuqsonlar muhandisligidan foydalangan holda yarimo'tkazgich materiallari, ular asosidagi mahsulotlarning xossalari va xususiyatlarini nazorat qilish usullarini ishlab chiqishdadir.

Tadqiqot natijalarini joriy qilinishi. Kirishma va radiatsiyaviy nuqson markazlarining kobalt bilan legirlangan kremniyga o'tishi va parchalanishi va yuqori energiyali yadro zarralari ta'sirining shakllanishi jarayonlarini o'rganish natijalariga ko'ra:

p^+ - qatlamining chuqurligiga, kompensatsion nurlanish nuqsonlari markazlarining tarkibi va turiga qarab radiatsiya texnologiyasi bo'yicha diffuziya $p^+ - n - n^+$ diodlarining teskari qarshiligini tiklash vaqtini nazorat qilish natijalari "UZELTEXSANOAT" AK qoshidagi "FOTON" AJ tomonidan qo'llanilgan. ("UZELTEXSANOAT" Akning 2024-yil 22-iyuldagi №04-3/1215-sonli xati hamda FOTON AJning 2024-yil 11-iyuldagi 132-sonli guvohnomasi). Natijalardan

foydalanish tezlashtirilgan elektronlar bilan nurlatish yo‘li bilan n-Si dan yasalgan diodlarning parametrlari va xarakteristikalarini optimallashtirish imkonini bergan;

kremniy plastinalarini kobalt kirishmalari bilan termal diffuziyali legirlashning ishlab chiqilgan usuli FOTON” AJ tomonidan qo‘llanilgan (“UZELTEXSANOAT” Akning 2024-yil 22-iyuldagi №04-3/1215-sonli xati hamda FOTON AJning 2024-yil 11-iyuldagi 132-sonli guvohnomasi). Natijalardan foydalanish n-Si da kobaltning rekombinatsion qabul qiluvchi markazlarini yaratish yo‘li bilan diffuziya diodlarining unumdorligini oshirish imkonini bergan;

2-4 MeV energiyali elektronlar bilan nurlanganda kremniy p+-n-n+ tuzilmalarida 450 °C haroratgacha termostabil bo‘lgan rekombinatsion nurlanish nuqsonlari markazlarini joriy qilish uchun ishlab chiqilgan termoradiatsiya usuli FOTON” AJ tomonidan qo‘llanilgan (“UZELTEXSANOAT” Akning 2024-yil 22-iyuldagi №04-3/1215-sonli xati hamda FOTON AJning 2024-yil 11-iyuldagi 132-sonli guvohnomasi). Natijalardan foydalanish kremniyli diodlari unumdorligini ikki baravargacha oshirish imkonini bergan.

“U-003” elektron tezlatkichida kremniy diodli konstruksiyalarning xarakteristikalari va parametrlarini o‘zgartirish uchun radiatsiya texnologiyasidan foydalanish bo‘yicha olingan ma‘lumotlar asosida Yadro fizikasi instituti va “FOTON” AJ orasida ikki tomonlama hamkorlik shartnomalari tuzildi.

Tadqiqot natijalarini aprobatsiyasi. Tadqiqot natijalari 9 ta xalqaro va respublika ilmiy-amaliy anjumanlarida muhokamadan o‘tkazilgan.

Tadqiqot natijalarining e‘lon qilinishi. Dissertatsiya mavzusi bo‘yicha jami 14 ta ilmiy ish chop qilingan, shulardan 5 tasi Oliy attestatsiya komissiyasining doktorlik dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish uchun tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda, jumladan, 4 tasi xorijiy jurnallarda.

Dissertatsiya tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya kirish, to‘rtta bob, xulosa va foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxatidan iborat. Dissertatsiyaning umumiy hajmi 112 betdan iborat.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

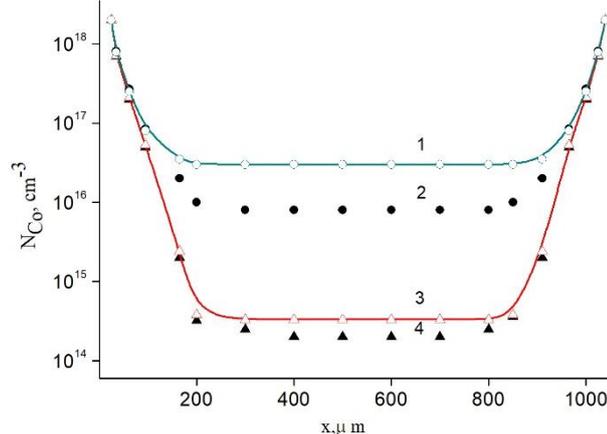
Kirish qismida olib borilayotgan tadqiqotning dolzarbligi va talabi asoslanadi, dissertatsiya mavzusi bo‘yicha olib borilayotgan tadqiqotlarning hozirgi holati ko‘rsatiladi, tadqiqotning maqsad va vazifalari belgilanadi, tadqiqotning yangiligi va amaliy natijalari taqdim etiladi, olingan natijalarning ilmiy va amaliy ahamiyati ochib beriladi, nashr etilgan ishlar, shuningdek, dissertatsiyaning tuzilishi haqida ma‘lumot beriladi.

Dissertatsiyaning “**Kobalt bilan legirlangan va radiatsiya ta‘siriga uchragan n-Si kremniyda chuqur sathlarning shakllanishi**” deb nomlangan birinchi bobida kobalt bilan legirlangan va ionlashtiruvchi nurlanish ta‘siriga uchragan yagona kristalli n-tipli kremniyda chuqur sathlarni hosil qiluvchi kirishmali va radiatsiyani kompensatsiya qiluvchi nuqson markazlariga bag‘ishlangan adabiyot ma‘lumotlarini ko‘rib chiqadi. Kremniydagi kobalt kirishmalarining xususiyatlari, jumladan, diffuziya mexanizmlari, eruvchanligi, ta‘qiqlangan zonadagi energiya darajasi va

kristalning elektr xususiyatlariga ta'siri to'g'risidagi ma'lumotlar tizimlashtirilgan. Nurlanish ta'sirida n -Si da paydo bo'ladigan elektr faol nurlanish nuqsonlari: ularning energiya parametrlari, zaryad holatlari, haroratning barqarorligi va rekombinatsiya jarayonlariga ta'siri ko'rib chiqildi. Nuqson markazlarini va miqdorini aniqlash uchun qo'llanadigan asosiy eksperimental usullar, masalan, Holl effekti, DLTS, tiklanish vaqtini o'lchash, mikroqattqlik va neytron faollashuv tahlili tavsiflangan. Bir kristalli n -Si asosidagi diodli konstruktsiyalarni ishlab chiqarish texnologiyasi taqdim etilgan. Legirlangan Si xossalarini, shuningdek, n -tipli kremniydagi kirishma va radiatsiya nuqson markazlarining parametrlarini tahlil qilish asosida dissertatsiyaning maqsadi va vazifalari shakllantirildi.

Dissertatsiyaning **“Yuqori haroratli diffuziya vaqtida kobalt bilan legirlangan n -Si ning xossalari va parametrlarini o'rganish”** deb nomlangan ikkinchi bobida n -tipli kremniyni yuqori haroratda legirlash jarayonida kobalt kirishmalarining diffuziya xususiyatlarini o'rganish natijalari keltirilgan. Kobaltning eruvchanligi, diffuziya koeffitsiyenti, legirlangan namunalar chuqurligi bo'yicha kirishmalarining tarqalishi, shuningdek, kristallning ta'qiqlangan zonasida chuqur kobalt sathlarining shakllanishi va ularning kremniyning elektrofizik parametrlari hamda fizik-mexanik xususiyatlariga ta'siri bo'yicha eksperimental ma'lumotlar keltirilgan. Kobalt bilan legirlangan kremniyga nurlanish ta'sirida bu xususiyatlarning o'zgarishi xususiyatlari ham ko'rib chiqiladi.

Aniqlanishicha, n -Si namunalarida termal diffuziyadan so'ng umumiy kobalt konsentratsiyasi profilining o'zgarishi U-shaklidagi shaklga ega (1-rasmga qarang) va ikki qismdan iborat: konsentratsiyaning sirdan kristall hajmiga to'rt karra tushish qismi ($N_{Co}(x)$) va kobaltning bir xil taqsimlanish bo'limiga, namunadagi diffuziya harorati $T_d=1050$ va 1250 °C qiymat oralig'ida $N(x)$ ni $2,810^{14}$ dan $9 \cdot 10^{15}$ sm^{-3} gacha oralig'ida o'zgarishi yuz beradi.



1-rasm. $T_d=1250$ °C (1, 2) va 1050 °C (3,4) da 10 soat davomida diffuziyadan so'ng legirlangan kremniyda chuqurligi bo'yicha kobaltning umumiy konsentratsiyasining taqsimlanishi: ●, ▲ – tajriba; o, Δ – hisoblash.

Neytron bilan nurlangan namunalarning gamma-chiziq spektrini tahlil qilish asosida $^{59}Co(n,g) \rightarrow ^{60}Co$ reaksiyasi orqali kremniy qattiq eritmasiga kiritilgan ^{59}Co kirishmasi konsentratsiyasini aniqlash uchun instrumental neytron faollashuvini tahlil

qilish usulidan foydalanish imkoniyati (2-rasmga qarang) aniqlandi, induksiyalangan faollik bilan bog‘liq ifoda:

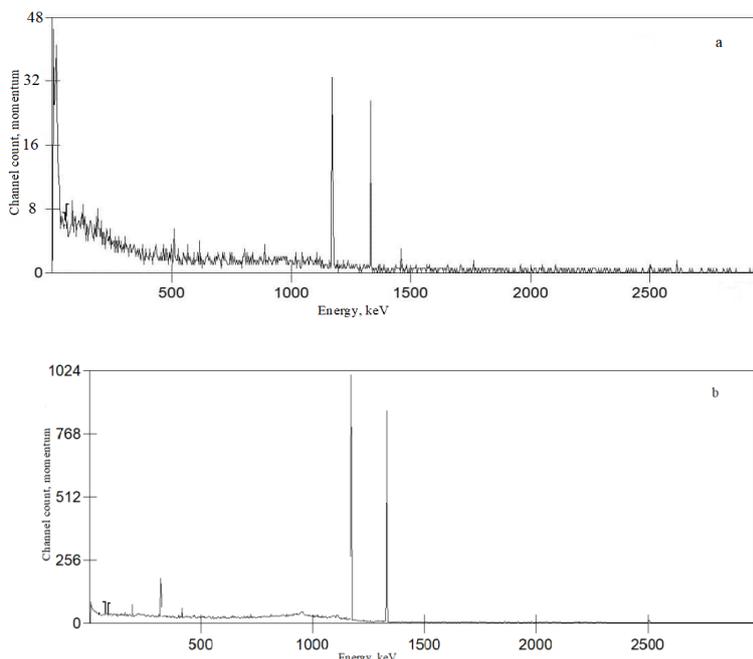
$$I = m_x \frac{0,6 \cdot f \cdot \sigma}{M} (1 - e^{-\lambda \cdot t}) e^{-\lambda \cdot \tau},$$

bunda m_x – kerakli element tarkibi, s – berilgan barqaror izotop uchun yadro reaksiyasining kesmasi, f – neytron oqimining zichligi; $\lambda = \frac{0,693}{T}$ – hosil bo‘lgan radioaktiv izotopning parchalanish konstantasi; t , T , τ – mos ravishda nurlanish vaqti, yarim yemirilish davri va sovutish vaqti, M – nurlangan barqaror izotopning atom og‘irligi.

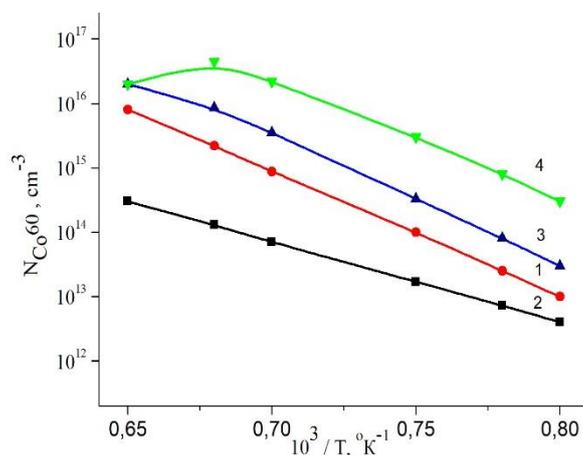
1000-1250 °C diffuziya harorati oralig‘ida instrumental neytron faollashuvi tahlili va Holl effekti asosida olingan n-tipli kremniydagi elektroaktiv kobalt kirshmaning to‘liq eruvchanligi va konsentratsiyasi natijalari 3-rasm (1 va 2 egri chiziqlar) ko‘rsatilgan. Belgilangan harorat oralig‘ida termal diffuziya bilan to‘yingan n -Si<Co> namunalarda radionuklidning umumiy konsentratsiyasi ^{60}Co (egri 1) $2,8 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-3}$ dan $9 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$ oralig‘ida o‘zgarib turishi aniqlandi va nisbat bilan tavsiflanadi:

$$N_{60Co} = 2.76 \cdot 10^{20} \exp\left(-\frac{2.78 \pm 0.04 \text{ eB}}{KT \text{ eB}}\right), \text{ cm}^{-3}$$

va elektr faol konsentratsiyasi 10^{13} sm^{-3} dan $3 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-3}$ gacha o‘zgarib turadi hamda n -Si da kobaltning umumiy eruvchanligining 0,04 %ini tashkil qiladi.



2-rasm. $1,03 \cdot 10^{19} \text{ sm}^{-2}$ oqim chastotasi bilan neytron nurlanishidan so‘ng ^{59}Co bilan legirlangan n-tipli kremniy namunalarning gamma-chiziq spektrlari, legirlash harorati 1000 °C (a), 1250 °C (b)



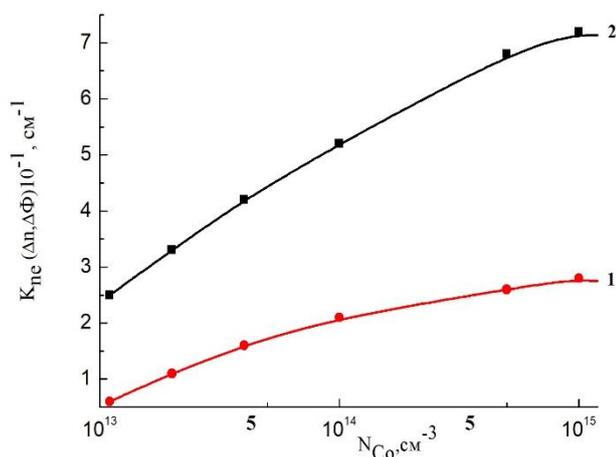
3-rasm. *n*-Si tarkibidagi kobalt kirishmalarining haroratga bog‘liqligi: 1 – umumiy kobalt konsentratsiyasi; 2 – elektr faol kobalt konsentratsiyasi; 3 va 4 – umumiy kobalt konsentratsiyasi bo‘yicha adabiyot ma’lumotlari

Kobaltning Si dagi diffuziya koeffitsiyentining haroratga bog‘liqligi diffuziya harorati $T_d=950 \div 1250$ °C oralig‘ida $5,6 \cdot 10^{-6} \div 1,5 \cdot 10^{-5}$ $sm^2 s^{-1}$ oralig‘ida o‘zgarishi aniqlandi va quyidagi ifoda bilan tavsiflanadi:

$$D(T)=D_o \exp\left(\frac{-Q}{KT}\right).$$

Co va RN aralashmalarining *n*-Si ning elektr xossalariga ta’siri o‘rganildi. Aniqlanishicha, kremniyni kobalt bilan legirlanganda, diffuziya harorati va nurlanish dozasi bilan dastlabki namunaning solishtirma qarshiligi (ρ) ortishi kuzatiladi, bu zaryad tashuvchilarning kompensatsiyasi bilan bog‘liq. Bu kobalt kirishmalari va $E_c-0,17$ eV, $E_c-0,23$ eV, $E_c-0,39$ eV va $E_c-0,39$ eV hamda $E_c-0,4$ eV radiatsiya bilan bog‘liq bo‘lgan markazlar tufayli yuzaga keladigan chuqur sathlardagi $E_c-0,41$ eV va $E_c-0,55$ eV bilan ta’qiqlangan zonaning yuqori yarmida akseptor kirishmasi hamda RN markazlarining shakllanishini ko‘rsatadi. Nurlantirib legirlangan va nazorat namunalarda zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasini taqqoslash shuni ko‘rsatadiki, *n*-Si tarkibiga Co kirishmaning kiritilishi kompensatsiyalangan nurlanish nuqsonlarini hosil qilish samaradorligini oshirishga olib keladi va legirlangan namunalarning elektrofizik ko‘rsatkichlarining degradatsiyasini tezlashtiradi. Erkin zaryad tashuvchilar konsentratsiyasining radiatsiyaviy o‘zgarishi (n_e) radiatsiya degradatsiya koeffitsienti bilan tavsiflanadi: $K_{ne}=\Delta n_e/\Delta\Phi$, bu erda F – ta’sir qiluvchi zarrachalar oqimi.

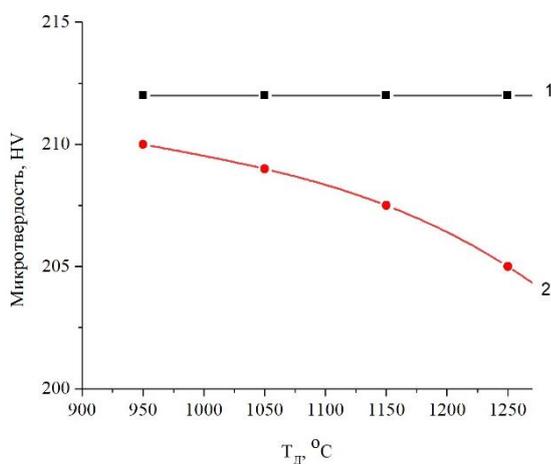
Energiyasi 4 MeV va elektronlar oqimi zichligi $5 \cdot 10^{11}$ sm^{-2} bo‘lgan elektronlar bilan nurlantirishda *n*-Si dagi Co konsentratsiyasiga qarab K_{ne} qiymatlarining o‘zgarishi haqidagi ma’lumotlar 4-rasmda ko‘rsatilgan.



4-rasm. Legirlangan n -Si dagi Δn_e nurlanishdan zararlanish ko'effitsientining elektr faol kobalt markazlari konsentratsiyasiga bog'liqligi: $F_e=5 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-2}$ oqimli elektronlar bilan nurlantirilganda: 1 – Si<P> boshlang'ich, 2 – Si<P,Co>

Elektr faol kobalt markazlari konsentratsiyasining $4 \cdot 10^{13} \text{ sm}^{-3}$ dan $3 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-3}$ gacha ko'tarilishi elektrofizik ko'rsatkichlarning degradatsiya ko'effitsientining legirlanmagan namunalarga nisbatan 3 barobar oshishiga olib kelishi ko'rsatilgan. Bu kobalt bilan legirlanganda kremniyning nurlanish qarshiligining pasayishini ko'rsatadi. Bu ta'sir nurlanish vaqtida Frenkel juftlarining hosil bo'lishi tufayli Co kirishmasining elektr passiv tugunlararo holatidan tugun faol holatiga o'tishi bilan bog'liq bo'lishi mumkin.

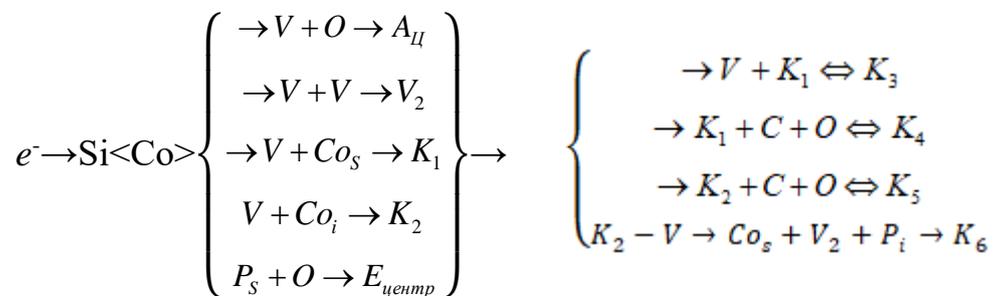
Nurlanishning Si<Co> ning fizik-mexanik xossalariga ta'sirini o'rganish n -Si ning legirlangan va nazorat namunalarida kobaltning diffuziya haroratiga qarab mikroqattqlik (H)ni o'lchash yo'li bilan amalga oshirildi (5-rasmga qarang). Si tarkibidagi Co konsentratsiyasining $3 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$ gacha ko'tarilishi legirlanmagan namunalarga nisbatan H qiymatining 5 %gacha qisman pasayishiga olib kelishi aniqlandi.



5-rasm. n -Si<Co> (2) va issiqlik bilan ishlov berilgan qotishmagan n -Si namunalarida (1) kobaltning diffuziya haroratiga mikroqattqlikning bog'liqligi

Kiritilgan Co konsentratsiyasining oshishi bilan mikroqattqlikning pasayishi, ehtimol, uning Si kristalli panjarasi tugunlarida joylashishi bilan bog‘liq bo‘lib, bu panjara kovalent radiusining oshishiga va atomlararo bog‘lanish energiyasining pasayishiga olib keladi. Aniqlanishicha, 10^{14} dan $5 \cdot 10^{17} \text{ sm}^{-2}$ gacha bo‘lgan oqim diapazonida 4 MeV energiyasiga ega elektron nurlanish legirlangan va legirlanmagan *n*-Si namunalarda mikroqattqlikning oshishiga olib keladi. Bundan tashqari, Si<Co> namunalarda elektron nurlanishda mikroqattqlik o‘shishi samaradorligi legirlanmagan namunalarga nisbatan 1,3 baravar past. Si<Co> qattiq eritmasining nurlanish ta‘sirida parchalanishining kvazi-kimyoviy reaksiyalarining sxemasi taklif qilingan, bu nuqsonli komplekslar atrofida elastik kuchlanishlarning pasayishiga olib keladi, bu esa legirlangan Si<Co> namunalarning mikroqattqligining kuzatilgan ortishi bilan izohlanadi.

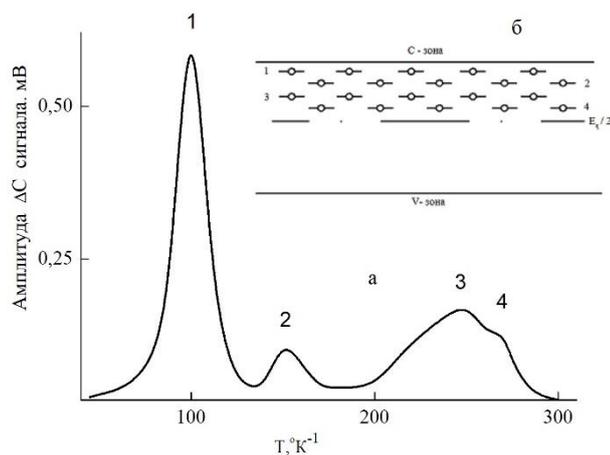
Elektron nurlanishda Si<Co> ning strukturaviy va kirishmali nuqsonlari quyi tizimidagi ketma-ket kvazi-kimyoviy reaksiyaning ehtimoliy sxemasi quyidagi shaklda ifodalanishi mumkin:



bunrda $K1 \div K6$ – parchalanish va hosil bo‘lish mahsulotlari.

Ko‘rinib turibdiki, Si<Co> qattiq eritmasining radiatsiyaviy parchalanish mahsulotlari nurlanish jarayonida O, C, P, Co kirishmalari va hosil bo‘lgan vakansiyalar ishtirokida turli komplekslar hosil bo‘lishining murakkab sxemasiga ega (indekslar *i, s* – oraliq joyda va kristall panjara joyida joylashgan atomlar; mos ravishda K_1 - K_6 – reaksiya mahsulotlari).

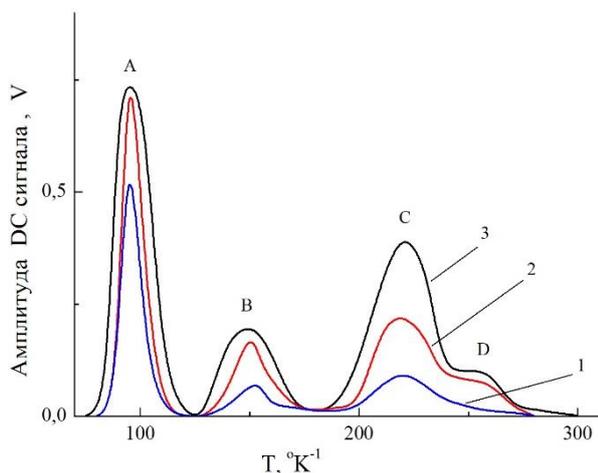
Dissertatsiyaning “**Kremniy diffuziya $p^+ - n - n^+$ tuzilmalarining radiatsiyaviy nuqsonlari**” nomli uchinchi bobida diffuziya kremniyining $p^+ - n - n^+$ tuzilmalarining nurlanish turiga va diodlarda hosil bo‘lgan p^+ -qatlamlarining qalinligiga qarab radiatsiya nuqsonlarini (RN) kiritish samaradorligini o‘rganish natijalari ko‘rib chiqiladi. Ko‘rsatilgandek, diodlarning tayanch hududida harakat qiluvchi yuqori energiyali zarrachalar turidan qat‘i-nazar, kompensatsion RN markazlari hosil bo‘lib, kremniyning ta‘qiqlangan zonasida chuqur energiya sathlarini yaratadi. Chuqur sathlar nostatsionar spektrometriyasi usulidan (DLTS) foydalangan holda, gamma-nurlanish natijasida joylashish energiyasi $E_c - 0,17 \text{ eV}$ (V-O), $E_c - 0,23 \text{ eV}$ va $E_c - 0,39 \text{ eV}$ (har xil zaryad holatidagi divakansiyalar) bo‘lgan uch turdagi RN komplekslari hosil bo‘lishi aniqlandi. 4 MeV energiya bilan elektron nurlanish va 18,7 MeV energiya bilan proton nurlanishi bilan ta‘qiqlangan zonaning yuqori yarmida $E_c - 0,44 \text{ eV}$ (V-P) energiyaga ega qo‘shimcha RN kompleksi hosil bo‘ladi (6-rasmga qarang).



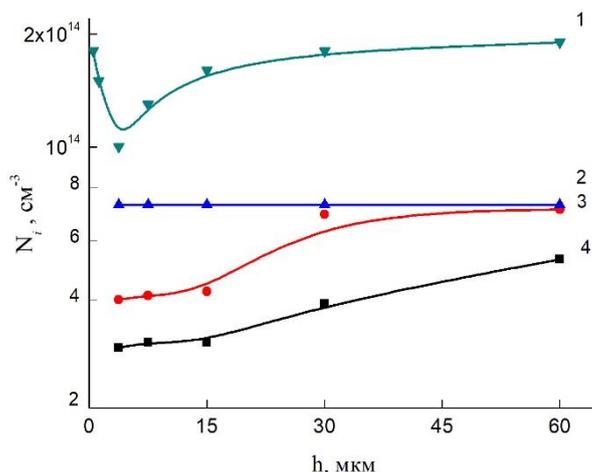
6-rasm. 10^{16} cm^{-2} oqimli elektronlar bilan nurlangan n-Si diffuziya diodlarining DLTS spektri (a). n-Si (b)ning ta'qiqlangan zonasida RN sathlarining joylashishi: 1 – $E_c-0,17 \text{ eV}$ (A-markaz), 2 – $E_c-0,23 \text{ eV}$ (manfiy zaryadlangan divakansiya), 3 – $E_c-0,39 \text{ eV}$ (neytral divakansiya), 4 – $E_c-0,44 \text{ eV}$ (E-markaz)

Aniqlanishicha, barcha RN markazlari qabul qiluvchi xususiyatga ega va kremniyda fon kirishma kislorod (A-markaz) yoki texnologik fosfor kirishmalari (E-markaz)ning vakansiyalar hosil qilgan komplekslaridir. Bundan tashqari, nurlanish turidan qat'i-nazar, nurlanish oqimining oshishi bilan barcha sathlarning konsentratsiyasi ortadi.

Diffuziya p^+-n-n^+ tuzilmalarining p^+ -qatlami qalinligining RN markazlarini shakllantirish samaradorligiga ta'siri o'rganildi. Birinchi marta n-Si asosidagi diodlarda p^+ -qatlami (L) qalinligining oshishi hosil bo'lgan RD markazlarining to'planish tezligi va konsentratsiyasining o'zgarishiga olib kelishi (7-rasmga qarang), n-Si ning ta'qiqlangan zonasida ularning paydo bo'lish energiyasi esa p^+ - qatlam qalinligiga bog'liq emasligi aniqlandi. Protonlar bilan nurlangan p^+-n-n^+ tuzilmalari misolidan foydalanib, p^+ -qatlamning kichik qalinligida ($L < 15 \text{ mkm}$) A-markazni kiritish samaradorligi monoton bo'lmagan tarzda o'zgarishi (8-rasmga qarang), $L = 2 \div 8 \text{ mkm}$ qiymatlarda minimal darajaga yetishi ko'rsatilgan. Qalinligi ($L \geq 10 \text{ mkm}$) yanada ortishi bilan $E_c-0,17 \text{ eV}$, $E_c-0,23 \text{ eV}$ va $E_c-0,39 \text{ eV}$ sathli RN markazlarining konsentratsiyasi $L \geq 35 \text{ mkm}$ qiymatida ortadi hamda barqarorlashadi. Ko'rsatilgan sathlar uchun RN markazlari konsentratsiyasining bunday o'zgarishi kremniy chegarasida bir xil bo'lmagan Al-SiO₂-Si qatlami va kichik qalinlikdagi p^+ qatlam hosil bo'lishi bilan izohlanadi.



7-rasm. ^{60}Co gamma-kvanta (1) va elektronlar (2) bilan nurlangan, $p^+ - n - n^+$ qatlam qalinligi 15 mkm bo'lgan $p^+ - n - n^+$ strukturalarining DLTS spektri mos ravishda $2 \cdot 10^{17} \text{ sm}^{-2}$ va $6 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-2}$ bo'lgan oqim: A – $E_c - 0,17 \text{ eV}$. B – $E_c - 0,23 \text{ eV}$; C – $E_c - 0,39 \text{ eV}$; D – $E_c - 0,44 \text{ eV}$. 3-egri chiziq – elektronlar bilan nurlangan $p^+ - n - n^+$ strukturasi spektri, p^+ -qatlam qalinligi 60 mkm



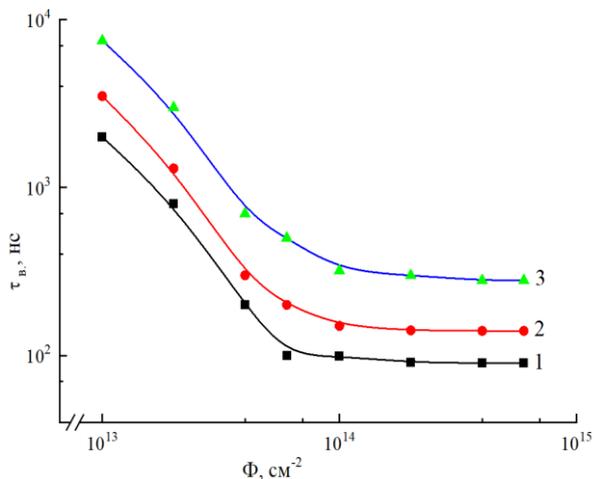
8-rasm. 10^{13} sm^{-2} proton fluentslari bilan nurlanishda p^+ qatlam hosil bo'lish chuqurligidan RN markazlari (1-4) konsentratsiyasining o'zgarishi; eV: 1 – 0,17; 2 – 0,44; 3 – 0,39; 4 – 0,23

Dissertatsiyaning “**Kremniy diffuziya diodlarining ta'sir qilish vaqtini radiatsiya va kirishmali nuqsonlari markazlari tomonidan nazorat qilish**” nomli to'rtinchi bobda kirishmalar va radiatsiya nuqsonlari, shuningdek, nurlanish harorati va p^+ qatlamining chuqurligi diffuziya $p^+ - n - n^+$ strukturasi rekombinatsiya xususiyatlariga ta'sirini o'rganish natijalari keltirilgan.

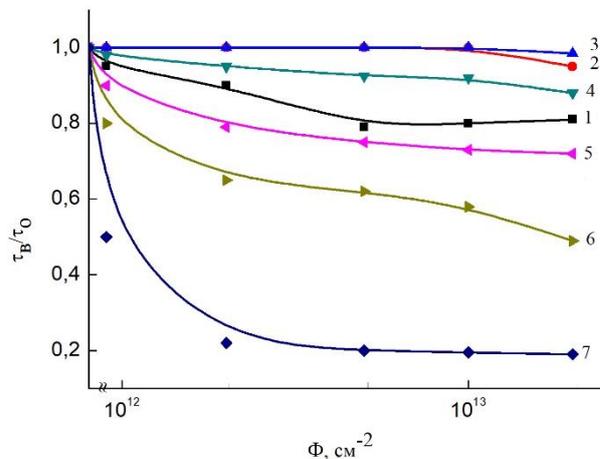
^{60}Co elektronlar, protonlar va gamma kvantlar bilan nurlanish jarayonida p^+ qatlamining harorat va hosil bo'lish chuqurligiga qarab $p^+ - n - n^+$ tuzilmalarida radiatsiya nuqsonlari markazlarining hosil bo'lish samaradorligini aniqlash uchun kremniyning taqiqlangan zonasidagi rekombinatsiya markazlarining energiya darajalari va RN, ularning konsentratsiyasi, shuningdek, qarshiliklarining qayta tiklanish vaqtlari (τ_e) o'rganilgan. n-tipli kremniy tarkibidagi fosfor miqdorini, nurlanish dozasini va p^+ qatlam chuqurligini tanlab, $2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ dan $7 \cdot 10^{-9} \text{ s}$ gacha bo'lgan diapazonda diffuziya diodlarining τ_e qiymatlarini tartibga solish mumkinligi ko'rsatilgan (9-rasmga qarang).

Aniqlanishicha, radiatsiya ta'sirida n-Si asosidagi diodlarning ta'sir qilish vaqtining o'zgarishi τ_e qiymatiga bog'liq va dastlabki n-Si dagi fosfor (N_e) konsentratsiyasi hamda kiritilgan elektr faol RN markazlari (N_p) konsentratsiyasining nisbati bilan belgilanadi. Diodlar $N_e/N_p \approx 3$ nisbatida optimal ishlashga erishadilar. Birinchi marta RN markazlari hosil bo'lish samaradorligining $p^+ - n - n^+$ tuzilmalarida p^+ -qavat chuqurligiga bog'liqligi aniqlandi. Bundan tashqari, τ_e qiymatiga ta'sir etuvchi asosiy rekombinatsiya markazlari $E_c - 0,17 \text{ eV}$ va $E_c - 0,39 \text{ eV}$ bo'lgan chuqur

sathlar bo‘lib, ularning konsentratsiyasi p^+ -qatlamning chuqurlashishi bilan ortadi. Bunday holda, τ_6 qiymati kamayadi, p^+ -qatlam qalinligi ≥ 60 mkm bo‘lgan barqaror holatga yetadi (10-rasmga qarang).



9-rasm. n -Si $N_e \text{ sm}^{-3}$ dagi fosfor tarkibiga qarab elektron nurlanish oqimidan τ_6 ning oʻzgarishi: 1 – $8 \cdot 10^{14}$, 2 – $1,5 \cdot 10^{15}$, 3 – $3 \cdot 10^{15}$



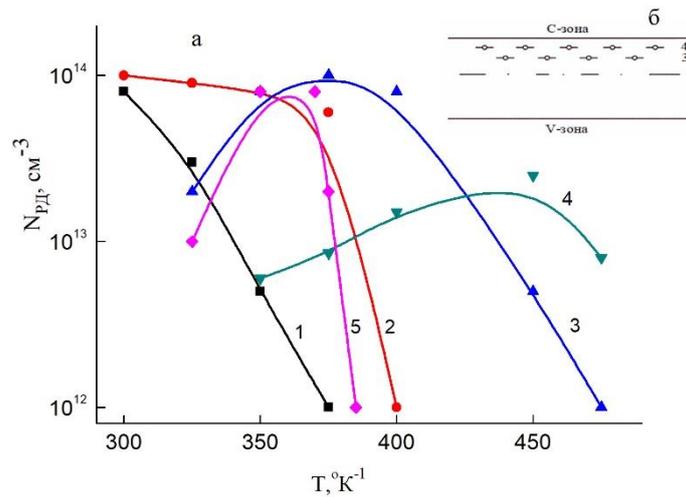
10-rasm. p^+ -qatlam hosil boʻlishining turli chuqurliklarida proton oqimidan diod teskari qarshiligining tiklanish vaqtining nisbiy oʻzgarishi L , mkm; 1-3; 2-5; 3-8; 4-12; 5-15; 6-30; 7-60

τ_6 qiymatining oʻzgarishining nurlanish oqimiga bogʻliqligi tahlilidan radiatsiyaviy zarar koeffitsienti tiklanish vaqtiga (τ_6) ekanligi aniqlandi.

$$K_{\tau_6} = \left(\frac{1}{\tau_6^e} - \frac{1}{\tau_6^o} \right) \Phi^{-1} \text{ (nurlanishdan oldin va keyin, } \Phi \text{ – nurlanish oqimi), bir xil } p^+ \text{-qatlam}$$

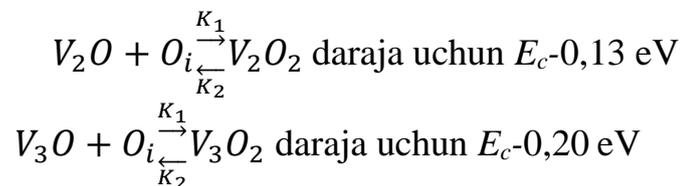
qalinligi uchun protonli nurlanishda elektron va gamma nurlanishga nisbatan kattaroq tartib, p^+ -qatlam chuqurligi 60 mkm boʻlgan diodlar uchun esa u $\sim 1.3 \cdot 10^{-9} \text{ s}^{-1} \text{ sm}^2$ ga yetadi. Bu shuni koʻrsatadi-ki, protonli nurlanishda p^+ qatlamining chuqurligi τ_6 qiymatini oʻzgartirishda hal qiluvchi ahamiyatga ega, yaʼni n -Si dagi fosfor konsentratsiyasini va p^+ qatlamining chuqurligini tartibga solish orqali keng diapazonda diffuziya diodlarining javob vaqtini tartibga solish mumkin.

p^+ - n - n^+ tuzilmalarida termik barqaror RN hosil boʻlish samaradorligiga harorat va nurlanishning birgalikdagi taʼsiri oʻrganildi. Koʻrsatilgan tuzilmalarni $T_{\text{nur}} \approx 325 \div 475 \text{ } ^\circ\text{C}$ hududida isitish bilan elektron nurlantirish natijasida qizdirilmagan namunalardan farqli oʻlaroq, E_c -0,13 eV va E_c -0,20 eV sathli yangi RN markazlari hosil boʻlishi aniqlandi (11 b-rasmga qarang). Aniqlangan RN markazlarining konsentratsiyasi E_c -0,13 eV sathi uchun $T_{\text{nur}} \approx 375 \text{ } ^\circ\text{C}$ va $T_{\text{nur}} \approx 450 \text{ } ^\circ\text{C}$ da E_c -0,20 eV sathida maksimal darajaga etishi aniqlandi (11 a-rasmga qarang).



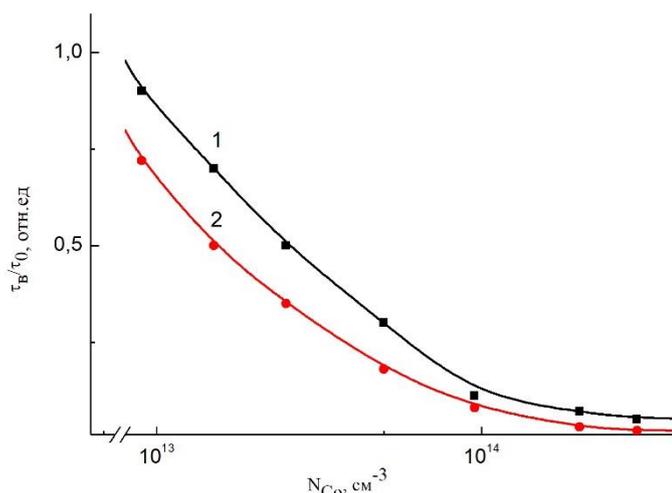
11-rasm. p^+-n-n^+ diodlaridagi RN konsentratsiyasining 10^{16} sm^{-2} oqimdagi nurlanish haroratiga bog‘liqligi: 1 – $E_c-0,39 \text{ eV}$, 2 – $E_c-0,17 \text{ eV}$, 3 – $E_c-0,20 \text{ eV}$, 4 – $E_c-0,52 \text{ eV}$, 5 – $E_c-0,52 \text{ eV}$; $n\text{-Si}$ (b) ning ta’qiqlangan zonasida termal barqaror RN lar: 3 – $E_c-0,20 \text{ eV}$, 4 – $E_c-0,13 \text{ eV}$

$T_{\text{nur}} \approx 375 \text{ }^\circ\text{C}$ da $E_c-0,13 \text{ eV}$ bo‘lgan RN markazini joriy etish samaradorligi $E_c-0,20 \text{ eV}$ nuqsonli markazga nisbatan kattaroq tartibdir. Aniqlanishicha, isitish vaqtida hosil bo‘lgan RN markazlari $450 \text{ }^\circ\text{C}$ haroratgacha termal barqarorlikni namoyon qiladi va diodlarning yuqori tezligini ta’minlab, τ_6 qiymatlarini $150 \div 200 \text{ ns}$ ichida kamaytirishga imkon beradi. Quyidagi shaklda vakansiya-kislorod komplekslarini shakllantirishga asoslangan isitish vaqtida RN markazlarini shakllantirishning ehtimoli eng katta bo‘lgan mexanizmi sxemasi taklif etiladi:



Qizdirish jarayonida olingan natijalarni RN kompleks hosil bo‘lish jarayonlari bo‘yicha adabiyot ma’lumotlari bilan taqqoslab tahlil qilish natijasida ma’lum bo‘ldi ki, nurlanish jarayonida hosil bo‘lgan RN komplekslarining konsentratsiyasi to‘g‘ridan-to‘g‘ri (K_1) va teskari (K_2) reaksiyalarning tezlik konstantalari bilan belgilanadi, $K_1=K_2$ da V_2O_2 va V_3O_2 komplekslarining konsentratsiyasi maksimal darajaga yetadi. Reaksiya tezligining bu tengligi V_2O_2 kompleksi uchun $T_{\text{nur}} \approx 375 \text{ }^\circ\text{C}$ va V_3O_2 uchun $T_{\text{nur}} \approx 450 \text{ }^\circ\text{C}$ da bajariladi.

Silikon diodlarning ta’sir qilish vaqtini tartibga solish uchun kobalt kirishmalari bilan legirlangan kremniydan foydalanish imkoniyati o‘rganildi. $n\text{-Si}\langle\text{Co}\rangle$ ga asoslangan diodlarda $E_c-0,41 \text{ eV}$ va $E_c-0,53 \text{ eV}$ sathli elektr faol akseptor rekombinatsiya markazlarini yaratish orqali ularning javob tezligini ikki baravargacha oshirish mumkin (12-rasmga qarang).



12-rasm. $\rho_{iss} \approx 4 \text{ Ohm} \cdot \text{sm}$ (1) va $\rho \approx 10 \text{ Ohm} \cdot \text{sm}$ (2) bo'lgan n-Si uchun elektr faol rekombinatsiya markazlarining konsentratsiyasiga qarab Si<Co> diodlarining teskari qarshiligining tiklanish vaqtining nisbiy o'zgarishi.

XULOSA

Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) ilmiy darajasini olish uchun "Monokristal kremniyning xossalarini kobalt va radiatsiyaviy nuqsonlar kiritish orqali takomillashtirish" mavzusidagi dissertatsiya bo'yicha olib borilgan tadqiqotlar asosida quyidagi xulosalar taqdim etildi:

1. Kobaltning monokristal kremniyda eruvchanligini o'rganish asosida ma'lum bo'ldi-ki, yuqori haroratli diffuziya jarayonida o'rganilayotgan kremniy namunalarda kobalt kirishmalari konsentratsiyasining tarqalish profili U shaklga ega bo'lib, chuqurligi bir tekis legirlangan hududda harorat va diffuziya vaqti bilan belgilanadi. Ayni paytda, 1050-1250 °C harorat oralig kirishmaning umumiy konsentratsiyasi $2,8 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-3}$ dan $9 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$ gacha, kirishmaning elektr faol konsentratsiyasi 10^{13} sm^{-3} dan $3 \cdot 10^{14} \text{ sm}^{-3}$ gacha o'zgarishi aniqlandi.

2. n-Si ni legirlashda kobalt dastlabki kristalning kompensatsiyasiga olib keladi, buning natijasida ta'qiqlangan zonaning yuqori yarmida akseptor tipidagi $E_c-0,41 \text{ eV}$ va $E_c-0,53 \text{ eV}$ chuqurlikdagi kirishmali rekombinatsiya markazlari hosil bo'ladi. Shakllangan nuqson markazlari elektr faol bo'lib, dastlabki kremniyning qarshiligini oshishiga va asosiy zaryad tashuvchilar konsentratsiyasining pasayishiga olib keladi.

3. Birinchi marta kobalt kiritilgan n-tipli kremniyni elektronlar oqimida nurlantirish RN hosil bo'lish samaradorligini ortishiga va kobalt miqdori ortib borishi bilan qarshilik qiymatlari va asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilar va radiatsiyaviy zararlanish koeffitsientini ortishiga olib kelishi aniqlandi. Kremniyda Co kirishmasining radiatsiya bilan hamda kremniyning xos nuqsonlari bilan o'zaro ta'siriga asoslangan mexanizm taklif etildi.

4. Kobalt kiritilgan kremniyning mikroqattiqligi kirishmaning konsentratsiyasiga bog'liq ekanligi aniqlandi. Si tarkibidagi kobalt miqdorining $9 \cdot 10^{15} \text{ sm}^{-3}$ qiymatlarigacha oshishi dastlabki Si ning mikroqattiqligining 5 %gacha pasayishiga olib keladi va elektronlar oqimida nurlantirish kirishma kiritilganda ham, kiritilmaganda ham kremniyning mikroqattiqligining oshishiga olib keladi. Co

kirishmasi mavjudligi nurlantirilgan Si<Co>da mikroqattqlikning o'sish tezligini bostiradi.

5. Diffuziya qilingan kremniy p^+-n-n^+ tuzilmalarini elektronlar, protonlar va ^{60}Co gamma nurlari bilan nurlantirganda ionlanish energiyalari $E_c-0,17$ eV, $E_c-0,23$ eV, $E_c-0,39$ eV va Yec $E_c-0,44$ eV bo'lgan to'rtta nurlanish nuqsoni markazlari shakllanishi ko'rsatib berilgan. $E_c-0,44$ eV akseptor tipidagi bazaviy mintaqada hosil bo'ladi. Aniqlangan markazlarning konsentratsiyasi diffuzion diodlarining p^+ -qatlaminig chuqurligi oshishi bilan ortib borishi aniqlandi. p^+-n-n^+ tuzilmalarida chuqur sath $E_c-0,17$ eV asosiy rekombinatsiya RN markazi ekanligi dalillandi.

6. Diffuziya qilingan kremniy diodini p^+-n-n^+ strukturalarining ish faoliyatini elektron ta'sir ostida radiatsiyaviy nuqsonlarni kiritish orqali boshqarishning optimal rejimlari nurlanish harorati va diodlarning p^+ - qatlaminig chuqurligiga qarab aniqlandi. Aniqlanishicha, diffuzion p^+-n-n^+ tuzilmalarining protonlar bilan nurlantirish RN hosil bo'lish samaradorligini elektronlar bilan nurlantirishga nisbatan oshiradi va divakansiya tipidagi RN markazlar konsentratsiyasi ortishi p^+ -qatlaminig chuqurligiga qarab aniqlanadi, A-markaz esa notekis o'zgaradi, E-markazga p^+ -qatlaminig chuqurligi ta'sir qilmaydi.

7. Al-Si chegara interfeysida radiatsiya va kirishmali nuqsonlarini yo'q qilishning radiatsiya bilan stimulyatsiya qilingan mexanizmi taklif etildi, bu alyuminiy p^+ - qatlaminig chuqurligining $n\text{-Si}$ ga asoslangan diffuzion p^+-n-n^+ tuzilmalarda RN komplekslarini to'planish samaradorligiga ta'sirini tushuntiradi.

8. p^+ -qatlaminig chuqurligi va hosil bo'lgan RNlarning teskari qarshilik diffuziya qilingan diodlarining radiatsiya koeffitsienti (K_r) tiklanish vaqtining qiymatiga ta'siri aniqlandi. Bundan tashqari, diffuzion kremniy diodlaridagi va τ_v koeffitsienti qiymatlari p^+ -qatlaminig chuqurligi oshgani sayin ortib boradi va o'rganilayotgan chuqurlik chegaralarida ($3\div 70$ mkm) ichida ularning nurlanishga chidamliligi deyarli 10 marta farqlanadi.

9. Kombinatsiyalangan termal nurlantirish bilan ishlov berish Si – p^+-n-n^+ tuzilmalarida qo'shimcha akseptor RN markazlarining shakllanishini rag'batlantirishi aniqlandi. Chuqur RN rekombinatsiya markazlarining ionlanish energiyalari, ularning turlari, hosil bo'lish harorati va termal barqarorligi, shuningdek, kremniy diodlarning ishlash tezkorligiga ta'siri dalillandi. $E_c-0,13$ va $E_c-0,23$ eV sathlarga bog'liq termal jihatdan barqarorroq RN markazlari $350\text{-}500$ °C nurlanish harorati oralig'ida hosil bo'lishi birinchi marta ko'rsatildi. V_2O_2 va V_3O_2 turdagi silikon diodli tuzilmalarda termal barqaror vakansiya-kislorodli RN komplekslarini shakllantirish mexanizmi taklif qilindi.

10. Kobalt qo'shilgan kremniy diodlarining ishlashini dastlabki kristalning qarshilik qiymatlari, kirishma konsentratsiyasi va Fermi sathining kobalt tomonidan hosil bo'lgan rekombinatsiya markazlariga nisbatan holatini tanlash orqali keng diapazonda o'zgartirish mumkinligi ko'rsatilgan $E_c-0,41$ va $E_c-0,53$ eV.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSC.02/30.12.2019.FM/T.33.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ИНСТИТУТЕ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ**

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

ЭРДОНОВ МУЗАФФАР НАЗАРОВИЧ

**МОДИФИКАЦИЯ СВОЙСТВ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ
ПУТЕМ ВВЕДЕНИЯ ПРИМЕСИ КОБАЛЬТА И РАДИАЦИОННЫХ
ДЕФЕКТОВ**

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам

Ташкент – 2025

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 № B2024.2. PhD/FM1110

Диссертация выполнена в Институте ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (www.inp.uz) и информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziynet.uz).

Научный руководитель:

Махкамов Шермахмат

кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник

Официальные оппоненты:

Раджапов Сали Аширович

доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник

Мухтаров Адил Позилович

кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник

Ведущая организация:

Научно-исследовательский институт физики полупроводников и микроэлектроники при Национальном университете Узбекистана имени Мирзо Улугбека

Защита диссертации состоится « ____ » _____ 2025 года в ____ часов на заседании Научного совета DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 при Институте ядерной физики (Адрес: 100214, г. Ташкент, пос. Улугбек, Институт ядерной физики. Тел.: (+99871) 289-31-41; факс: (+99871)289-36-65; e-mail: info@inp.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института ядерной физики (регистрационный номер _____) (Адрес: 100214, г. Ташкент, пос. Улугбек, Институт ядерной физики. Тел. (+99871) 289-31-19).

Автореферат диссертации разослан « ____ » _____ 2025 г.
(протокол рассылки № _____ от « ____ » _____ 2025 г.).

М. Ю. Ташметов

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

О.Р.Тожибоев

ученый секретарь Научного совета
по присуждению ученых степеней, PhD ф.-м.н.,
старший научный сотрудник

С.Б.Игамов

председатель научного семинара
при Научном совете по присуждению
ученых степеней, д.ф.-м.н.,
старший научный сотрудник

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время в мире развитие современной твердотельной микроэлектроники и областей ее применения происходит столь быстрыми темпами, что требует от исследователей и разработчиков целенаправленного управления свойствами полупроводниковых материалов. Увеличение степени интеграции и расширение функционального назначения полупроводниковых изделий неизбежно приводят к уменьшению размеров активных элементов до наноразмеров. В результате возникают как фундаментальные, так и прикладные задачи, связанные с образованием структурных дефектов, формирующих электрически активные энергетические центры в запрещенной зоне базового кристалла. Повышение однородности структуры кристаллов и управление свойствами полупроводникового материала является одной из важнейших проблем твердотельной нанoeлектроники.

Проведенные исследования и достижения в области современной твердотельной электроники показали возможности управления свойствами кристаллов не только их глубокой очистки, но и за счёт контролируемого введения примесей или радиационных дефектов. Модификация свойств полупроводниковых материалов и изделий на их основе путем введения рекомбинационных дефектных центров, создающих определенные электронные уровни в запрещенной зоне кристалла, стала самостоятельным подходом для разработки твердотельных приборов микроэлектроники с различным функциональным назначением.

Учитывая наличие и успешное функционирование ядерно-физических установок, а также степень оснащенности современным оборудованием научных лабораторий Института ядерной физики АН РУз, поставленные задачи по модификации свойств основного материала современной полупроводниковой микроэлектроники могут быть эффективно реализованы на базе монокристаллического кремния. Направления этих фундаментальных и прикладных исследований, имеющих существенное значение для развития науки нашей страны и её широкого применения, отражены в Стратегии развития Нового Узбекистана» на 2022-2026 годы.

Исследования, проведенные в данной диссертационной работе в определенной степени соответствуют задачам, обозначенным в Указе Президента Республики Узбекистан № УП-60 “О Стратегии развития нового Узбекистана на 2022-2026 годы” от 28 января 2022 года, Постановлениях Президента Республики Узбекистан №ПП-3682 “О мерах по дальнейшему совершенствованию системы практического внедрения инновационных идей, технологий и проектов” от 27 апреля 2018 года, №ПП-3698 “О дополнительных мерах по совершенствованию механизмов внедрения инноваций в отрасли и сфере экономики” от 7 мая 2018 года, №ПП-4526 “О мерах по поддержке научно-исследовательской деятельности Института ядерной физики АН РУз” от 21

ноября 2019 года, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данном направлении.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Диссертационная работа выполнена в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий республики: II. «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение и альтернативные источники энергии».

Степень изученности проблемы. Экспериментальные и теоретические исследования в области легированных полупроводников и радиационно стимулированных процессов формирования примесных и радиационных структурных дефектов в указанных материалах проводятся в известных научных центрах многими зарубежными и отечественными учеными, например, американскими (G.D.Watkins, J.M.Corbett, C.T.Sah, K.H.Hal, D.V.Lang, J.Bourgoin, N.M.Jonson), российскими (М.Г.Мильвидский, А.А.Лебедев, В.Б.Шуман, В.И. Фистуль, Б.И.Болтакс, Г.С.Смирнов, В.С.Вавилов, В.В.Емцев, В.В.Козловский), узбекистанскими (Р.А.Муминов, М.С.Бахадырханов, А.Т.Мамадалимов, С.Зайнабидинов, К.П.Абдурахманов, Ш.Б.Утамуратова, М.С.Юнусов, М.Каримов) и другими специалистами.

Проведенные исследования зарубежными и нашими учеными в области модификации свойств монокристаллического кремния путем введения примесных и радиационных дефектов позволили определить виды быстро диффундирующих примесей для легирования термо диффузионным способом, их растворимости, коэффициент диффузии, энергетические спектры дефектных центров и некоторые другие параметры. Вместе с тем, изучение радиационного воздействия на свойства полупроводниковых материалов позволило выявить возможности применения радиационной технологии и получения ядерно-трансмутационного кремния с улучшенными структурными параметрами и электрофизическими свойствами.

Однако, несмотря на наличие конкретных экспериментальных данных по формированию глубоководных структурных дефектов в кремнии, ряд вопросов, связанных с целенаправленным изменением свойств легированных полупроводников путем введения примесных и радиационных дефектов, остается невыясненным. Во-первых, это связано с отсутствием надежных теоретических подходов к определению параметров дефектных центров, создающих глубокие энергетические уровни. Во-вторых, имеются расхождения в данных по растворимости ряда примесей, а также по энергетическим спектрам глубоких уровней, обусловленных примесными и радиационными дефектами. Кроме того, наблюдается несоответствие между концентрацией и типом структурных дефектных центров, сформированных в материалах и приборах на их основе при радиационной обработке. Остается также неясным механизм взаимодействия примесных и радиационных дефектов в легированных кристаллах, а также протекания процесса структурных превращений при терморadiационном воздействии и влияние ряда других факторов на модификацию полупроводникового материала.

Связь темы диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в рамках научно-исследовательского проекта Института ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан по теме: ОТ-Ф2-20 «Низкоразмерные структурные превращения в легированном кремнии при радиационном воздействии и влияние их на свойства монокристалла» (2017-2020 гг.), а также утвержденной Постановлением Президента Республики Узбекистан № ПП-4526 от 21 ноября 2019 года программы научно-исследовательских работ по теме: «Радиационно-стимулированные процессы при ядерной трансмутации легированного монокристаллического кремния» (2020-2024).

Целью исследования является управление свойствами кремния и характеристиками кремниевых p^+-n-n^+ диодных структур легированием примесью кобальта и радиационно-иницированными компенсирующими электрически активными дефектными центрами.

Задачи исследования:

освоить термодиффузионную технологию легирования монокристаллического кремния n -типа проводимости примесью кобальта, определить температурную зависимость растворимости кобальта и распределения примеси в объеме твердого раствора легированных образцов;

выявить тип и концентрацию электрически активных примесных дефектных центров кобальта и их влияние на электрофизические, рекомбинационные параметры и микротвердость легированного кремния;

изучить влияние высокоэнергетических ядерных частиц на свойства легированных образцов и характеристики изделий на их основе;

исследовать кинетические процессы образования радиационных дефектных центров в p^+-n-n^+ структурах в зависимости от глубины залегания диффузионного p^+ -слоя;

выявить эффективность формирования и тип радиационных дефектных центров при одновременном воздействии температуры и облучения;

выявить влияние глубоко уровневых дефектных центров кобальта и радиационных дефектов на быстродействие кремниевых диодов.

Объектом исследования являются образцы монокристаллического кремния n -типа, легированного примесью кобальта и диффузионные p^+-n-n^+ диодные структуры.

Предметом исследования являются процессы управления и оптимизации свойств монокристаллического кремния, легированного кобальтом и радиационными электрически активными дефектными центрами.

Методы исследования: нестационарная емкостная спектроскопия глубоких уровней (DLTS); метод температурной зависимости постоянной Холла, нейтронно-активационный анализ, тестирование микротвёрдости по Виккерсу и методика контроля времени восстановления обратного сопротивления $p-n$ структур.

Научная новизна исследований заключается в следующем:

определен профиль распределения концентрации примеси кобальта в кремнии при легировании термодиффузионным способом, и впервые методом реакторного нейтронно-активационного анализа выявлено различие в концентрации растворимости изотопов ^{59}Co и радионуклида ^{56}Co в кремнии; получено эмпирическое соотношение, описывающее температурную зависимость растворимости Co в Si;

впервые показана возможность повышения быстродействия диффузионных диодов из $n\text{-Si}$ за счет формирования глубоко уровневых компенсирующих электрически активных рекомбинационных центров кобальта в базовой области диодов с энергией ионизации $E_c-0,41$ эВ и $E_c-0,55$ эВ акцепторного типа;

впервые предложена возможность регулирования времени восстановления обратного сопротивления кремниевых $p^+n\text{-}n^+$ диодных структур путем введения примеси кобальта и формирования компенсирующих радиационных дефектных центров при электронном, протонном и гамма облучениях в зависимости от глубины сформированного диффузионного p^+ -слоя;

разработана терморadiационная технология создания термостабильных (до 450°C) рекомбинационных радиационных дефектных центров, обеспечивающая возможность регулирования быстродействия диффузионных $p^+n\text{-}n^+$ структур в широком диапазоне.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

предложены и реализованы оптимальные режимы получения термодиффузионным способом однородного легированного кремния n -типа с примесью Co и ядерно-аналитическая методика контроля распределения концентрации примеси в твердом растворе Si:Co;

установлено, что радиационную чувствительность кремниевых образцов n -типа можно повысить увеличением концентрации акцепторных электрически активных центров путем введения компенсирующих примесных центров кобальта;

выявлены технологические возможности повышения быстродействия диодов, изготовленных из $n\text{-Si}$, до двух порядков за счет создания электрически активных глубоких рекомбинационных уровней $E_c-0,41$ эВ и $E_c-0,53$ эВ в кремнии, легированном Co и радиационными дефектами;

обнаружена зависимость эффективности формирования радиационных дефектов от глубины формирования p^+ -слоя в диффузионных диодах, что обеспечивает возможность регулирования в широких пределах времени восстановления обратного сопротивления диодов и позволяет получать диоды с повышенным быстродействием.

Достоверность результатов исследования подтверждается применением комплекса апробированных информативных экспериментальных методов и теоретических подходов, сопоставлением полученных результатов с данными других исследователей. Полученные результаты не противоречат данным и выводам, основанным на существующих общезначимых представлениях и закономерностях.

Научная и практическая значимость результатов исследования научная значимость заключается в выявлении физических процессов, взаимодействия дефектных состояний и определении квазихимических реакций, протекающих с участием примесных, радиационных, собственных и других структурных дефектов, установлении механизма формирования их комплексов разработки способа управления свойствами кристалла и характеристиками кремниевых полупроводниковых приборы.

Практическая значимость результатов исследования заключается в развитии способов управления свойствами и характеристиками полупроводниковых материалов и изделий на их основе путем применения инженерии дефектов.

Внедрение результатов исследования. По результатам исследования процессов формирования, трансмутации и распада примесных или радиационных дефектных центров в кремнии, легированном кобальтом и воздействием высокоэнергетических ядерных частиц:

результаты по управлению временем восстановления обратного сопротивления диффузионных p^+-n-n^+ диодов радиационной технологией в зависимости от глубины p^+ -слоя, состава и типа компенсирующих радиационных дефектных центров были использованы в АО «FOTON» акционерной компании «UZELTEXSANOAT» (письмо АК «UZELTEXSANOAT» №04-3/1215 от 22 июля 2024 года и справка АО «FOTON» №132 от 11.07.2024 года). Результаты позволили оптимизировать параметры и характеристики диодов из n -Si путем облучения ускоренными электронами;

разработанный способ термодиффузионного легирования пластин кремния примесью кобальта использован в АО «FOTON» (письмо АК «UZELTEXSANOAT» от 22 июля 2024 года и справка АО «FOTON» №132 от 11.07.2024 года). Результаты позволили повысить быстродействие диффузионных диодов путем создания в n -Si рекомбинационных акцепторных центров кобальта;

разработанный терморadiационный способ введения термостабильных до температуры 450 °С рекомбинационных радиационных дефектных центров в кремниевых p^+-n-n^+ структурах при облучении электронами с энергией 2-4 МэВ использован в АО «FOTON» (письмо АК «UZELTEXSANOAT» от 22 июля 2024 года и справка АО «FOTON» №132 от 11.07.2024 года). Использование результатов позволило повысить быстродействие кремниевых диодов до двух порядков.

На основе полученных данных по применению радиационной технологии для модификации характеристик и параметров кремниевых диодных структур на базе «Ускорителя электронов У-003» ИЯФ АНРУз заключены с АО «FOTON» двухсторонние совместные контракты.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 9-ти международных научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 14 научных работ, из них 5 научных статей в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, в том числе 4 в международных научных журналах.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы. Общий объем диссертации составляет 112 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновываются актуальность и востребованность проведенного исследования, показано современное состояние исследований по теме диссертации, определены цели и задачи исследования, изложена новизна и практические результаты исследования, раскрыта научная и практическая значимость полученных результатов, приведены сведения по опубликованным работам, а также о структуре диссертации.

В первой главе «**Формирование глубоких уровней в *n*-Si кремнии при легировании кобальтом и радиационном воздействии**» приведен обзор литературных данных, посвященных примесным и радиационным компенсирующим дефектным центрам, создающим глубокие уровни в монокристаллическом кремнии *n*-типа, легированном кобальтом и подвергнутом воздействию ионизирующего излучения. Систематизированы сведения о свойствах примеси кобальта в кремнии, включая механизмы диффузии, растворимость, энергетические уровни в запрещенной зоне и влияние на электрические свойства кристалла. Рассмотрены электрически активные радиационные дефекты, возникающие в *n*-Si под действием облучения: их энергетические параметры, зарядовые состояния, температурная стабильность и влияние на рекомбинационные процессы. Описаны основные экспериментальные методы, применяемые для идентификации и количественной оценки дефектных центров, такие как эффект Холла, DLTS, измерения времени восстановления, микротвёрдость и нейтронно-активационный анализ. Представлена технология изготовления диодных структур на базе монокристаллического *n*-Si. На основе анализа свойств, легированного Si, а также параметров примесных и радиационных дефектных центров в кремнии *n*-типа сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе «**Исследование свойств и параметров *n*-Si, легированного кобальтом при высокотемпературной диффузии**» представлены результаты исследования диффузионных характеристик примеси кобальта при высокотемпературном легировании кремния *n*-типа. Приведены экспериментальные данные по растворимости кобальта, коэффициенту диффузии, распределению примеси по глубине легированных образцов, а также по образованию глубоких уровней кобальта в запрещенной зоне кристалла и их

влиянию на электрофизические параметры и физико-механические свойства кремния. Рассмотрены также особенности изменения этих свойств под действием радиационного воздействия на кремний, легированный кобальтом.

Определено, что изменение профиля полной концентрации кобальта после термодиффузии в образцах *n*-Si имеет U-образный вид (смотрите Рисунок 1) и состоит из двух участков: участок падения концентрации от поверхности вглубь кристалла ($N_{Co}(x)$) до четырех порядков и однородный участок распределения кобальта в объеме образца, с изменением значения $N(x)$ в пределах от $2,8 \cdot 10^{14}$ до $9 \cdot 10^{15}$ см⁻³ в области температур диффузии $T_d=1050$ и 1250 °С.

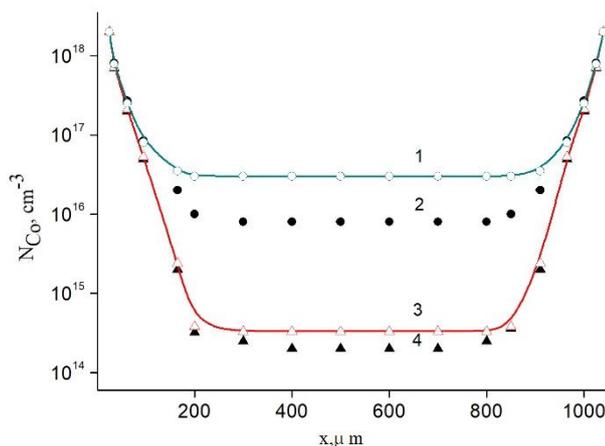


Рис. 1. Распределение полной концентрации кобальта по глубине легированного кремния после диффузии при $T_d=1250$ °С (1, 2) и 1050 °С (3,4) в течение 10 ч: ●, ▲ - эксперимент; ○, △ - расчет

Выявлена возможность использования метода инструментального нейтронно-активационного анализа для определения концентрации введенной примеси ^{59}Co в кремниевом твёрдом растворе по реакции $^{59}\text{Co}(n,\gamma)\rightarrow^{60}\text{Co}$ на основе анализа спектра гамма-линий нейтронно-облученных образцов (смотрите Рисунок 2), с использованием выражения, связанного с наведенной активностью:

$$I = m_x \frac{0,6 \cdot f \cdot \sigma}{M} (1 - e^{-\lambda \cdot t}) e^{-\lambda \cdot \tau},$$

где m_x – искомое содержание элемента, σ – сечение ядерной реакции для данного стабильного изотопа, f – плотность потока нейтронов; $\lambda = \frac{0,693}{T}$ – постоянная распада получаемого радиоактивного изотопа; t , T , τ – время облучения, период полураспада и время остывания соответственно, M – атомный вес облучаемого стабильного изотопа.

Результаты полной растворимости и концентрации электроактивной примеси кобальта в кремнии *n*-типа в интервале температур диффузии 1000 - 1250 °С, полученные на основе инструментального нейтронно-активационного анализа и эффекта Холла, приведены на рисунке 3 (кривые 1 и 2). Установлено, что полная концентрация радионуклида ^{60}Co (кривая 1) в насыщенных термодиффузией образцах *n*-Si<Co> в указанном интервале температур

изменяется в пределах от $2,8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ до $9 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, и описывается соотношением

$$N_{60Co} = 2.76 \cdot 10^{20} \exp\left(-\frac{2.78 \pm 0.04 \text{ эВ}}{KT \text{ эВ}}\right), \text{ см}^{-3}$$

а электрически активная концентрация меняется от 10^{13} см^{-3} до $3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, и составляет 0,04 % от полной растворимости кобальта в *n*-Si.

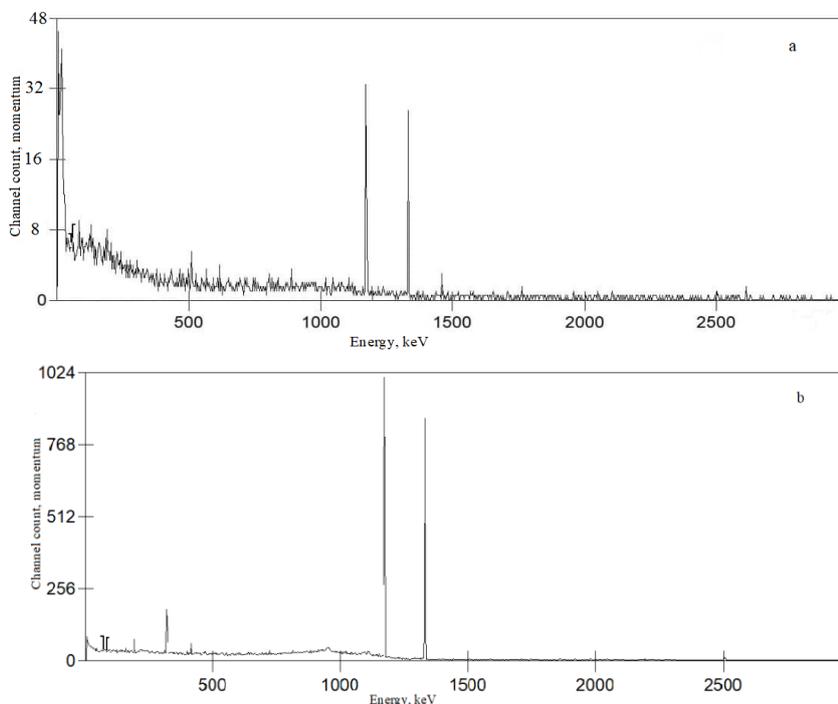


Рис. 2. Спектры гамма линий образцов кремния *n*-типа, легированного ^{59}Co , после облучения нейтронами флюенсом $1.03 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$, температура легирования 1000 °C (а), 1250 °C (б)

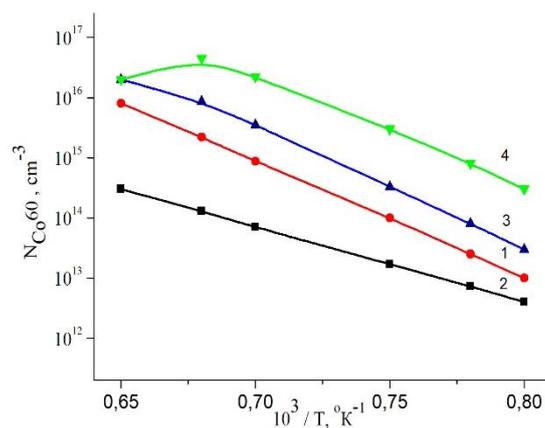


Рис. 3. Температурная зависимость содержания примеси кобальта в *n*-Si: 1 – полная концентрация кобальта; 2 – электрически активная концентрация кобальта; 3 и 4 – литературные данные полной концентрации кобальта

Определено, что температурная зависимость коэффициента диффузии кобальта в Si в пределах температура диффузии $T_d = 950 \div 1250 \text{ °C}$ изменяется в диапазоне $5,6 \cdot 10^{-6} \div 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$ и описывается выражением

$$D(T) = D_0 \exp\left(\frac{-Q}{KT}\right).$$

Изучено влияние примеси Со и РД на электрофизические свойства *n*-Si. Установлено, что при легировании кремния кобальтом с повышением температуры диффузии и дозы облучения наблюдается рост удельного сопротивления (ρ) исходного образца, что связано с компенсацией носителей заряда. Это свидетельствует о формировании акцепторных примесных и РД центров в верхней половине запрещенной зоны с глубокими уровнями $E_c-0,41$ эВ и $E_c-0,55$ эВ, обусловленными примесью кобальта и центрами с уровнями $E_c-0,17$ эВ, $E_c-0,23$ эВ, $E_c-0,39$ эВ и $E_c-0,44$ эВ, связанными с радиационными дефектами. Сопоставление концентраций носителей заряда в легированных и контрольных образцах после облучения показывает, что введение примеси Со в *n*-Si приводит к возрастанию эффективности образования компенсирующих радиационных дефектов и ускоряет деградацию электрофизических параметров легированных образцов. Радиационное изменение концентрации свободных носителей заряда (n_e) характеризуется коэффициентом радиационной деградации: $K_{ne} = \Delta n_e / \Delta \Phi$, где Φ – флюенс воздействующих частиц.

Данные по изменению значений K_{ne} в зависимости от концентрации Со в *n*-Si при электронном облучении с энергией 4 МэВ и плотности тока пучка $5 \cdot 10^{11}$ см⁻² приведены на рисунке 4.

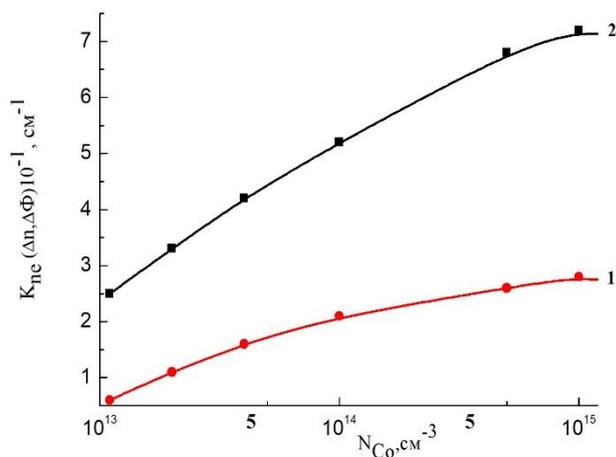


Рис. 4. Зависимость коэффициента радиационного повреждения значения Δn_e в легированном *n*-Si от концентрации электрически активных центров кобальта: при облучении электронами флюенсом $\Phi_0 = 5 \cdot 10^{14}$ см⁻²; 1–Si<P> исходный, 2–Si<P,Co>

Показано, что увеличение концентрации электрически активных центров кобальта от $4 \cdot 10^{13}$ см⁻³ до $3 \cdot 10^{14}$ см⁻³ приводит к возрастанию коэффициента деградации электрофизических параметров в 3 раза по сравнению с нелегированными образцами. Это свидетельствует о снижении радиационной стойкости кремния при легировании кобальтом. Указанный эффект может быть обусловлен переходом примеси Со из электрически пассивного междуузельного

состояния в узловое активное положение вследствие генерации Френкельских пар в процессе облучения.

Исследование влияния облучения на физико-механические свойства $\text{Si}\langle\text{Co}\rangle$ проводилось по измерению микротвердости (H) в зависимости от температуры диффузии кобальта в легированных и контрольных образцах $n\text{-Si}$ (смотрите Рисунок 5). Выявлено, что возрастание концентрации Co в Si до $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ приводит к частичному понижению величины H по сравнению с нелегированными образцами до 5%.

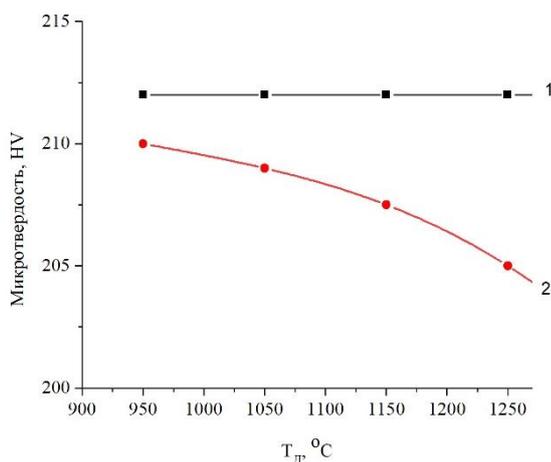
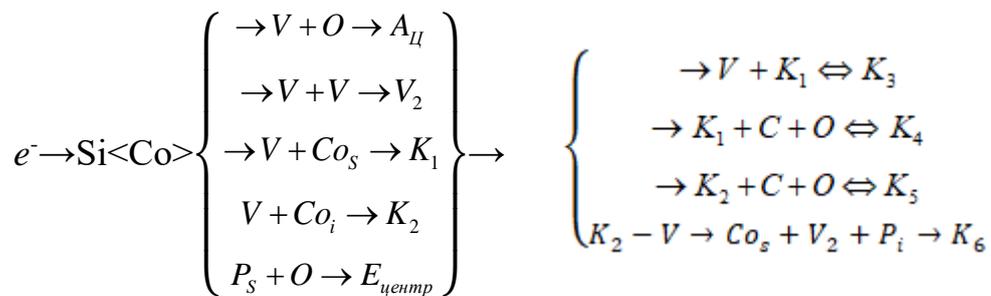


Рис. 5. Зависимость микротвердости от температуры диффузии кобальта в $n\text{-Si}\langle\text{Co}\rangle$ (2) и термообработанных не легированных образцов $n\text{-Si}$ (1)

Процесс снижения микротвердости с ростом концентрации введенного Co , по всей вероятности, связано с его расположением в узлах кристаллической решетки Si , что приводит к увеличению ковалентного радиуса решетки и снижению энергии межатомных связей. Обнаружено, что электронное облучение с энергией 4 МэВ в интервале флюенсов от 10^{14} до $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ приводит к увеличению микротвердости как в легированных, так и в нелегированных образцах $n\text{-Si}$. При этом эффективность роста микротвердости при электронном облучении в образцах $\text{Si}\langle\text{Co}\rangle$ в 1,3 раза ниже по сравнению с нелегированными образцами. Предложена схема квазихимических реакций радиационно-индуцированного распада твердого раствора $\text{Si}\langle\text{Co}\rangle$, приводящего к уменьшению упругих напряжений вокруг дефектных комплексов, что объясняет наблюдаемое повышение микротвердости легированных образцов $\text{Si}\langle\text{Co}\rangle$.

Более вероятную схему последовательной квазихимической реакции в подсистеме структурных и примесных дефектов в $\text{Si}\langle\text{Co}\rangle$ при электронном облучении можно представить в следующем виде:



где $K_1 \div K_6$ – продукты распада и образования.

Как видно, продукты радиационного распада твердого раствора $\text{Si} \langle \text{Co} \rangle$ имеют сложную схему формирования различных комплексов с участием примесей O, C, P, Co и генерируемых вакансий при облучении (индексы i, s – атомы, расположенные в междоузлии и в узле кристаллической решетки, соответственно; $K_1 - K_6$ – продукты реакции).

В третьей главе «**Радиационные дефекты в кремниевых диффузионных $p^+ - n - n^+$ структурах**» рассматриваются результаты исследования эффективности введения радиационных дефектов (РД) в зависимости от вида облучения диффузионных кремниевых $p^+ - n - n^+$ структур и от толщины сформированного p^+ -слоя в диодах на основе кремния n -типа. Показано, что независимо от вида воздействующих высокоэнергетических частиц в базовой области диодов формируются компенсирующие РД центры, создавая глубокие энергетические уровни в запрещенной зоне кремния. Методом емкостной спектроскопии (DLTS) выявлено, что при гамма-облучении формируются три типа РД-комплексов с энергией залегания $E_c - 0,17$ эВ (V-O), $E_c - 0,23$ эВ и $E_c - 0,39$ эВ (дивакансии с различным зарядовым состоянием). При электронном облучении с энергией 4 МэВ и протонном облучении с энергией 18,7 МэВ дополнительно формируется РД комплекс с энергией залегания $E_c - 0,44$ эВ (V-P) в верхней половине запрещенной зоны (смотрите Рисунок 6).

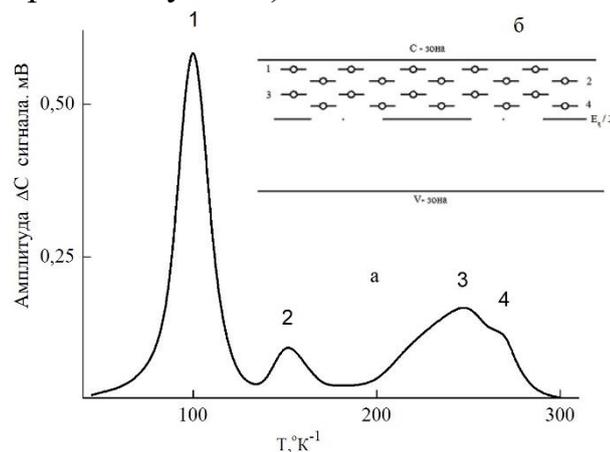


Рис. 6. Спектр DLTS диффузионных диодов из n -Si, облученных электронами флюенсом 10^{16} см^{-2} (а). Расположение уровней РД в запрещенной зоне n -Si (б): 1 – $E_c - 0,17$ эВ (A-центр), 2 – $E_c - 0,23$ эВ (отрицательно заряженная дивакансия), 3 – $E_c - 0,39$ эВ (нейтральная дивакансия), 4 – $E_c - 0,44$ эВ (E-центр)

Установлено, что все РД центры проявляют акцепторные свойства и являются комплексами вакансии с фоновой примесью кислорода (А-центр) или технологической примесью фосфора (Е-центр) в кремнии. Определено, что независимо от вида облучения концентрация всех уровней с повышением флюенса облучения возрастает.

Изучено влияние толщины p^+ -слоя диффузионных p^+n-n^+ структур на эффективность образования РД центров. Впервые обнаружено, что увеличение толщины p^+ -слоя (L) в диодах на основе n -Si приводит к изменению скорости накопления и концентрации формируемых РД центров (смотрите Рисунок 7), при этом энергия их залегания в запрещенной зоне n -Si не зависит от толщины p^+ -слоя. На примере p^+n-n^+ структур, облученных протонами, показано, что при малых толщинах p^+ -слоя ($L < 15$ мкм) эффективность введения А-центра изменяется немонотонно (смотрите Рисунок 8), достигая минимума при значениях $L = 2 \div 8$ мкм. При дальнейшем увеличении толщины ($L \geq 10$ мкм) концентрация РД-центров с уровнями $E_c - 0,17$ эВ, $E_c - 0,23$ эВ и $E_c - 0,39$ эВ возрастает и стабилизируются при значении $L \geq 35$ мкм. Такое изменение концентрации РД-центров для указанных уровней объясняется формированием неоднородного слоя Al-SiO₂-Si на границе кремния и p^+ -слоя с малой толщиной.

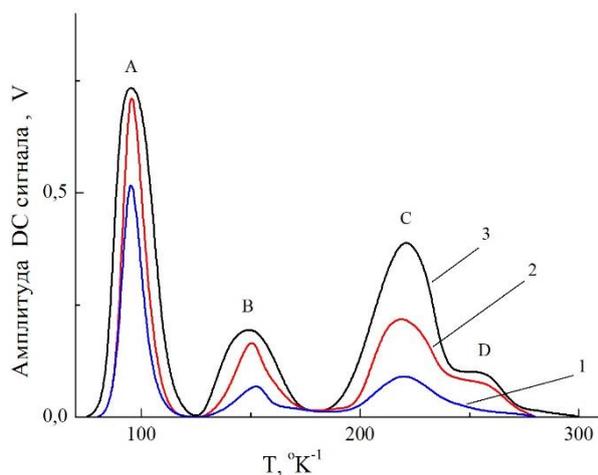


Рис. 7. Спектр DLTS p^+n-n^+ структур с толщиной p^+ -слоя 15 мкм, облученных гамма квантами ⁶⁰Co (1) и электронами (2), флюенсом $2 \cdot 10^{17}$ см⁻² и $6 \cdot 10^{14}$ см⁻² соответственно: А – $E_c - 0,17$ эВ; В – $E_c - 0,23$ эВ; С – $E_c - 0,39$ эВ; D – $E_c - 0,44$ эВ. Кривая 3 – спектр p^+n-n^+ структуры, облученной электронами, толщина p^+ -слоя – 60 мкм

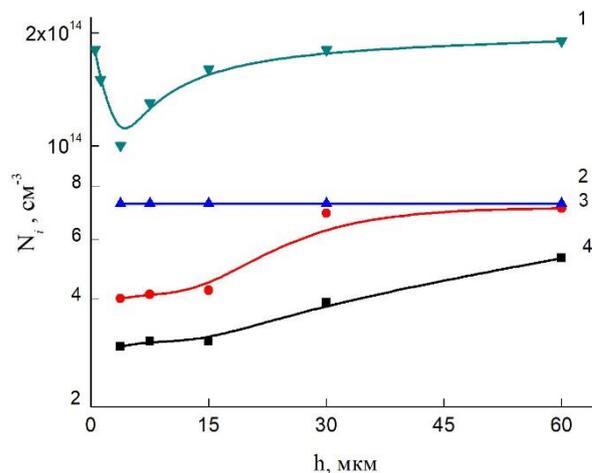


Рис. 8. Изменение концентрации РД центров (1-4) от глубины формирования p^+ слоя при облучении флюенсами протонов 10^{13} см⁻²; эВ: 1 – 0,17; 2 – 0,44; 3 – 0,39; 4 – 0,23

В четвертой главе «Управление быстродействием кремниевых диффузионных диодов радиационными и примесными дефектными

центрами» изложены результаты исследований влияния примесных и радиационных дефектов, а также температуры облучения и глубины залегания p^+ -слоя на рекомбинационные характеристики диффузионных кремниевых $p^+ - n - n^+$ структур.

Для определения эффективности образования радиационных дефектных центров в $p^+ - n - n^+$ структурах в зависимости от температуры и глубины формирования p^+ -слоя при облучении электронами, протонами и гамма-квантами ^{60}Co были исследованы энергетические уровни и РД рекомбинационных центров в запрещенной зоне кремния, их концентрации, а также времена восстановления обратного сопротивления диодов (τ_B). Показано, что путем подбора содержания фосфора в кремнии n -типа, дозы облучения и глубины p^+ -слоя можно регулировать значения τ_B диффузионных диодов в пределах от $2 \cdot 10^{-6}$ с до $7 \cdot 10^{-9}$ с (смотрите Рисунок 9).

Установлено, что при радиационном воздействии изменение быстродействия диодов на основе n -Si зависит от значения τ_B и определяется соотношением концентраций фосфора (N_e) в исходном n -Si и концентрации введенных электрически активных РД-центров (N_p). Диоды достигают оптимального быстродействия при соотношении $N_e / N_p \approx 3$. Впервые обнаружена зависимость эффективности формирования РД-центров от глубины залегания p^+ -слоя в $p^+ - n - n^+$ структурах. Выявлено, что основными рекомбинационными центрами, влияющими на значение τ_B являются глубокие уровни с $E_c - 0,17$ эВ и $E_c - 0,39$ эВ, концентрация которых возрастает с увеличением глубины p^+ -слоя. При этом значение τ_B уменьшается, достигая стабильного состояния при толщине p^+ -слоя ≥ 60 мкм (смотрите Рисунок 10).

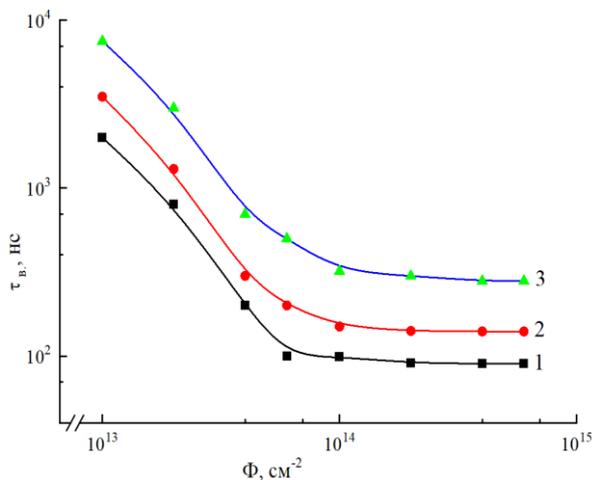


Рис. 9. Изменения τ_B от флюенса электронного облучения в зависимости от содержания фосфора в n -Si N_e см $^{-3}$: 1 – $8 \cdot 10^{14}$, 2 – $1,5 \cdot 10^{15}$, 3 – $3 \cdot 10^{15}$

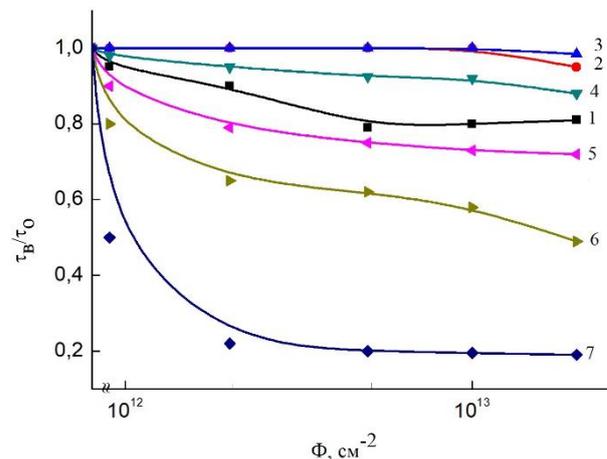


Рис. 10. Относительное изменение времени восстановления обратного сопротивления диодов от флюенса протонов при различных глубинах формирования p^+ -слоя L , мкм; 1–3; 2–5; 3–8; 4–12; 5–15; 6–30; 7–60

Из анализа зависимости изменения величины τ_B от флюенса облучения установлено, что коэффициент радиационного повреждения времени

восстановления (τ_0) $K_{\tau_0} = \left(\frac{1}{\tau_0^e} - \frac{1}{\tau_0^o} \right) \Phi^{-1}$ (где τ_0^o – до облучения, а τ_0^e – после, Φ – флюенс облучения), при протонном воздействии для идентичных толщин p^+ -слоя на порядок выше по сравнению с электронным и гамма облучением, и для диодов с глубиной p^+ -слоя 60 мкм доходит до $\sim 1,3 \cdot 10^{-9} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^2$. Это показывает, что при протонном облучении в изменении значения τ_0 глубина p^+ -слоя является определяющей, т.е. регулируя концентрацию фосфора в n -Si и глубину p^+ -слоя, можно в широких пределах регулировать быстродействие диффузионных диодов.

Исучено влияние сопряженного воздействия температуры и облучения на эффективность образования термостабильных РД в p^+n-n^+ структурах. Обнаружено, при электронном облучении указанных структур с нагревом в области $T_{обл} \approx 325 \div 475 \text{ }^\circ\text{C}$ формируются новые РД-центры с уровнями $E_c-0,13 \text{ эВ}$ и $E_c-0,20 \text{ эВ}$ (смотрите Рисунок 11 б) в отличие от образцов без нагрева. Установлено, что концентрация обнаруженных РД центров повышается и достигает максимума при $T_{обл} \approx 375 \text{ }^\circ\text{C}$ для уровня $E_c-0,13 \text{ эВ}$, а для уровня $E_c-0,20 \text{ эВ}$ при $T_{обл} \approx 450 \text{ }^\circ\text{C}$ (смотрите Рисунок 11 а).

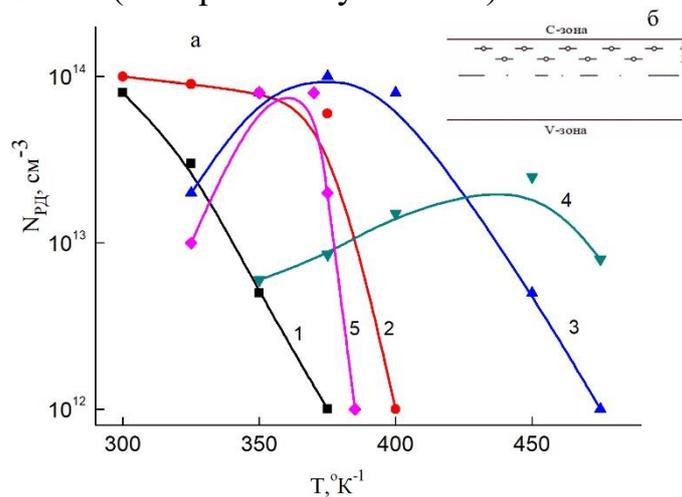
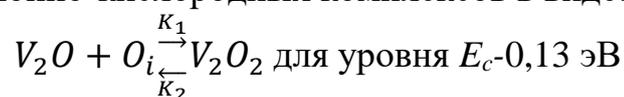


Рис. 11. Зависимость концентрации РД в p^+n-n^+ диодах от температуры облучения при флюенсе 10^{16} см^{-2} : 1– $E_c-0,39 \text{ эВ}$, 2– $E_c-0,17 \text{ эВ}$, 3– $E_c-0,20 \text{ эВ}$, 4– $E_c-0,13 \text{ эВ}$, 5– $E_c-0,23 \text{ эВ}$ (а); термостабильных РД в запрещенной зоне n -Si (б): 3– $E_c-0,20 \text{ эВ}$, 4– $E_c-0,13 \text{ эВ}$

Эффективность введения РД центра с $E_c-0,13 \text{ эВ}$ при $T_{обл} \approx 375 \text{ }^\circ\text{C}$ на порядок выше по сравнению с дефектным центром $E_c-0,20 \text{ эВ}$. Определено, что РД центры, сформированные при нагреве, проявляют термическую стабильность до температур $450 \text{ }^\circ\text{C}$ и позволяют уменьшить значения τ_0 в пределах $150 \div 200 \text{ нс}$, обеспечив высокое быстродействие диодов. Предложена схема наиболее вероятного механизма формирования РД центров при нагреве, основанная на формировании вакансионно-кислородных комплексов в виде:





Из анализа и сопоставления полученных результатов с литературными данными по процессам комплексообразования РД при нагреве выявлено, что концентрация образующихся РД комплексов при облучении определяется константами скоростей прямой (K_1) и обратной (K_2) реакций, и при $K_1=K_2$ концентрация комплексов V_2O_2 и V_3O_2 достигает максимума. Такое равенство скоростей реакции выполняется при $T_{обл} \approx 375 \text{ }^\circ\text{C}$ для комплекса V_2O_2 и при $T_{обл} \approx 450 \text{ }^\circ\text{C}$ для V_3O_2 .

С целью регулирования быстродействия кремниевых диодов была исследована возможность использования кремния, легированного примесью кобальта. Предложено, что в диодах на основе $n\text{-Si}\langle\text{Co}\rangle$ путем создания электрически активных акцепторных рекомбинационных центров с уровнями $E_c - 0,41 \text{ эВ}$ и $E_c - 0,53 \text{ эВ}$ возможно повышение их быстродействия до двух порядков (смотрите Рисунок 12).

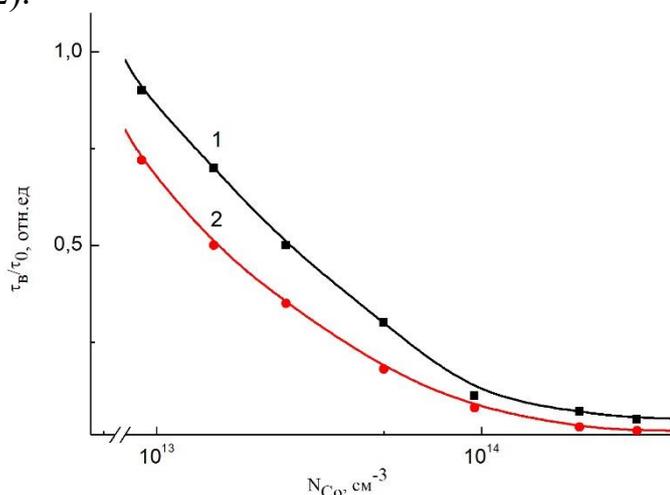


Рис. 12. Относительное изменение времени восстановления обратного сопротивления диодов из $\text{Si}\langle\text{Co}\rangle$ в зависимости от концентрации электрически активных рекомбинационных центров для $n\text{-Si}$ с $\rho_{исх} \approx 4 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ (1) и $\rho \approx 10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ (2)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований по диссертации на соискание ученой степени доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам на тему «Модификация свойств монокристаллического кремния путем введения примеси кобальта и радиационных дефектов» представлены следующие выводы:

1. Показано, что профиль распределения растворимости кобальта в монокристаллическом кремнии при высокотемпературной диффузии имеет U-образный вид, а глубина в равномерной легированной области определяется температурой и временем диффузии. При этом установлено, что в интервале температур 1050-1250 °С общая концентрация примеси изменяется в пределах от $2.8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ до $9 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, а электрически активная концентрация от 10^{13} см^{-3} до $3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

2. Установлено, что при легировании n-Si кобальт приводит к компенсации исходного кристалла, образуя примесные электрически активные рекомбинационные центры с глубокими акцепторными уровнями в верхней половине запрещенной зоны – $E_c - 0.41 \text{ эВ}$ и $E_c - 0.53 \text{ эВ}$. Эти уровни способствуют повышению удельного сопротивления исходного кремния и уменьшению концентрации основных носителей тока.

3. Установлено, что электронное облучение кремния n-типа, легированного кобальтом, приводит к повышению эффективности формирования РД и коэффициента радиационного повреждения удельного сопротивления и концентрации неосновных носителей тока с возрастанием содержания кобальта. Предложен механизм, основанный на взаимодействии примеси Co с радиационными и собственными дефектами кремния.

4. Выявлено, что микротвердость кремния, легированного кобальтом, зависит от содержания примеси: увеличение концентрации Co до $9 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ приводит к снижению микротвёрдости исходного Si до 5 %. Электронное облучение способствует возрастанию значения микротвёрдости как легированного, так и нелегированного кремния. Наличие примеси Co подавляет скорость возрастания микротвёрдости в облученном Si<Co>.

5. Показано, что при облучении электронами, протонами и гамма квантами ^{60}Co диффузионных кремниевых $p^+ - n - n^+$ структур в базовой области формируются четыре радиационных дефектных центра акцепторного типа с энергией ионизации: $E_c - 0.17 \text{ эВ}$, $E_c - 0.23 \text{ эВ}$, $E_c - 0.39 \text{ эВ}$ и $E_c - 0.44 \text{ эВ}$. Выявлено, что концентрация обнаруженных центров возрастает с повышением глубины p^+ -слоя диффузионных диодов. Определено, что основным рекомбинационным РД центром в $p^+ - n - n^+$ структурах является глубокий уровень $E_c - 0.17 \text{ эВ}$.

6. Определены оптимальные режимы управления быстроедействием диффузионных кремниевых диодных $p^+ - n - n^+$ структур введением радиационных дефектов при электронном воздействии в зависимости от температуры облучения и глубины p^+ -слоя диодов. Выявлено, что при протонном облучении диффузионных $p^+ - n - n^+$ структур эффективность формирования РД повышается

по сравнению с электронным облучением и определяется глубиной p^+ -слоя с увеличением, которого концентрация введенных РД центров дивакансионного типа возрастает, а A -центр изменяется немонотонно, на E -центр глубина p^+ -слоя не влияет.

7. Предложен радиационный стимулированный механизм аннигиляции радиационных и примесных дефектов на границе раздела Al-Si, объясняющий влияние глубины алюминиевого p^+ -слоя на эффективность накопления РД комплексов в диффузионных p^+-n-n^+ структурах на базе n-Si.

8. Определено, что глубина p^+ -слоя и сформированные РД влияют на значение времени восстановления обратного сопротивления (τ_b) и коэффициента радиационного повреждения (K_r) диффузионных диодов. Установлено, что значения K_r в диффузионных кремниевых диодах с увеличением глубины p^+ -слоя возрастают и в исследованных пределах глубин (3÷70) мкм их радиационная стойкость различается практически на порядок.

9. Выявлено, что комбинированная терморadiационная обработка стимулирует формирование дополнительных акцепторных РД центров в Si – p^+-n-n^+ структурах. Определены энергии ионизации глубоких РД рекомбинационных центров, их типы, температура формирования и термостабильность, а также их влияние на быстродействие кремниевых диодов. Впервые показано, что термически более стабильные РД центры, обусловленные уровнями $E_c-0,13$ и $E_c-0,23$ эВ формируются в интервале температур облучения 350–500 °С. Предложен механизм формирования вакансионно-кислородных термостабильных РД комплексов в кремниевых диодных структурах типа V_2O_2 и V_3O_2 .

10. Показано, что быстродействие кремниевых диодов, легированных кобальтом, можно изменить в широком диапазоне выбором значений удельного сопротивления исходного кристалла, концентрации примеси и положения уровня Ферми относительно формируемых кобальтом рекомбинационных центров с уровнями $E_c-0,41$ и $E_c-0,53$ эВ.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 ON AWARD OF
SCIENTIFIC DEGREES AT THE INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS**

INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS

ERDONOV MUZAFFAR NAZAROVICH

**MODIFICATION OF SILICON SINGLE CRYSTAL PROPERTIES BY
DOPING WITH COBALT AND RADIATION DEFECTS**

01.04.07 – Physics of condensed matters

DISSERTATION ABSTRACT
of the Doctor of Philosophy (PhD) on Physical and Mathematical Sciences

Tashkent – 2025

The topic of the dissertation for Doctor of Philosophy (PhD) in physical and mathematical sciences is registered with the Higher Attestation Commission under the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan under number B2024.2. PhD/FM1110

The doctoral (PhD) dissertation was carried out at the Institute of Nuclear Physics of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan.

The abstract of the dissertation was posted in three (Uzbek, Russian, English (resume)) languages on the website of the Scientific Council at www.inp.uz and on the website of “ZiyoNet” information and educational portal at www.ziyo.net.

Scientific supervisor: **Makhkamov Shermakhmat**
Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Senior Researcher

Official opponents: **Radjapov Sali Ashirovich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Senior Researcher

Muxtarov Adil Pozilovich
Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Senior Researcher

Leading organization: **Research Institute of Semiconductor Physics and
Microelectronics
at the National University of Uzbekistan named after
Mirzo Ulugbek**

The defense of the dissertation will be held on “ ____ ” _____ 2025 at ____ at the meeting of the Scientific Council DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 at the Institute of Nuclear Physics (Address: 100214, Tashkent, Ulugbek settlement, Institute of Nuclear Physics. Tel.: (+99871) 289-31-41; fax: (+99871)289-36-65; e-mail: info@inp.uz).

The doctoral (PhD) dissertation can be looked through at the Information Resource Center of the Institute of Nuclear Physics (registration number _____) Address: Institute of Nuclear Physics, Ulugbek settlement, 100214, Tashkent city, tel. (+99871) 289-31-19.

The abstract of dissertation was distributed on “ ____ ” _____ 2025.
(Registry record No. _____ dated “ ____ ” _____ 2025).

M. Yu. Tashmetov
Chairman of the Scientific Council
on Award of Scientific Degrees,
D. Ph.-M.S., Professor

O.R. Todjiboev
Scientific Secretary of the Scientific
Council on Award of Scientific Degrees,
PhD Ph.-M.S., Senior Researcher

S.B. Igamov
Chairman of the Scientific Seminar
at the Scientific Council on Award
of Scientific Degrees, D. Ph.-M.S.,
Senior Researcher

INTRODUCTION (annotation of PhD dissertation)

The aim of the research work is to control the silicon properties and Si p⁺-n-n⁺ diode structure characteristics by means of doping with cobalt and radiation-generated compensating electrical active defect centers.

The tasks of the research work:

elaborate thermodiffusion technology of doping single crystal n-type silicon with cobalt, determine the temperature dependence of cobalt solubility and its bulk distribution in the solid solution of doped samples;

reveal the type and concentration of electric active cobalt impurity defect centers and their influence on electrophysical and recombination parameters and microhardness of doped silicon;

study the effect of high-energy nuclear particles on the doped sample properties and the characteristics of devices on their base;

study the kinetic process of radiation defect center generation in p⁺-n-n⁺ structures in dependence on the diffusion p⁺-layer depth;

estimate the formation effectiveness and type of radiation defect centers under synergic impact of temperature and irradiation;

Reveal the influence of deep level defect centers of cobalt and radiation defects on fast-response of silicon diodes.

The objects of the research work are samples of single crystal n-type silicon doped with cobalt and diffusion p⁺-n-n⁺ diode structures.

The subject of the research work are processes of control and properties optimization of single crystal n-type silicon doped with cobalt and irradiation-induced electric active defect centers.

Scientific novelty of the research work:

the profile of the cobalt impurity concentration distribution in Si during doping by the thermal diffusion method was determined and for the first time the difference in the solubility concentration of ⁵⁹Co and the radionuclide ⁵⁶Co in silicon was revealed by the reactor neutron activation analysis method; a relation was obtained to describe the temperature dependence of the solubility of Co in Si;

the possibility was first shown for improving the fast-reading of diffusion n-Si diodes by means of formation of deep level compensating electric active recombination centers and base region of diodes with the ionization energy E_c 0.41 and 0.55 eV;

the possibility was first suggested for regulating the restoration time of reverse resistance of silicon p⁺-n-n⁺ diode structure by means of doping with cobalt and formation of compensatory radiation defect centers under electron irradiation in dependence on the depth of formed diffusion p⁺-layer;

the thermo-radiation technology was developed for generating thermostable (up to 450 °C) recombination radiation defect centers, providing the possibility of regulation of fast-reading diffusion p⁺-n-n⁺ structures in a wide range.

Implementation of the research results. Here are the investigation results of the formation processes, transmutation and decay of primary impurity or radiation-

induced defect centers in silicon doped with cobalt and exposed to high-energy nuclear particles:

the results of time-controlled restoration/recovery of the reverse resistance of diffusion $p^+ - n - n^+$ diodes made by radiation technology in dependence on the p^+ -layer depth, composition and type of compensating radiation defect centers, were used by AO JSC "FOTON" joint-stock company "UZELTEXSANOAT" (document №132 AO JSC "FOTON" 11.07.2024). The results allowed to optimize parameters and characteristics of n -Si diodes by means of irradiation with accelerated electrons;

the developed method of thermo-diffusion doping of silicon plates with cobalt is used in JSC "FOTON" joint-stock company "UZELTEXSANOAT" (document No. 132 of JSC "FOTON" dated 11.07.2024); the results allowed to increase the fast-reading of diffusion diodes by means of formation of recombination acceptor cobalt centers in n -Si;

the developed thermoradiation method of generation of recombination radiation defective centers, which are stable up to 450 °C in silicon $p^+ - n - n^+$ structures, when irradiating with 2-4 MeV electrons, was used by JSC "FOTON" joint-stock company "UZELTEXSANOAT" for increasing the rapidity (fast-reading) of silicon diodes in two orders of magnitude.

Basing on the obtained data on implementation of the radiation technology for the modification of the characteristics and parameters of the silicon diode structure at the "Accelerator of electrons U-003", the Institute of Nuclear Physics Academy of sciences of Uzbekistan and JSC "FOTON" have signed a bilateral joint contract.

Structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, five chapters, a conclusion and a list of references. The volume of the dissertation is 125 pages.

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

I bo'lim (I часть; part I)

1. Ташметов М.Ю., Махкамов Ш., Саттиев А.Р., Эрдонов М.Н., Холмедов Х.М., Тиллаев Т.С. Радиационная деградация параметров диффузионных кремниевых структур при протонном облучении // Вопросы атомной науки и техники. – Москва: ВНИИМ, Росатом, 2020. – № 88. – С. 4-16 (01.00.00. № 17).

2. Tashmetov M.Yu., Makhkamov Sh., Sattiev A.R., Erdonov M.N., Kholmedov Kh.M. Efficiency of Injecting Radiation Defects during Irradiation of Silicon n^+p Structures with Fast // Applied Solar Energy (English translation of Geliotekhnika). – Pleiades Publishing: USA, 2021. Vol. 57. – No. 3. – P. 188-191 (№ 3. Scopus; IF=3,0).

3. Ташметов М.Ю., Махкамов Ш., Саттиев А.Р., Эрдонов М.Н., Махмудов Ш.А., Холмедов Х.М. Исследование влияния протонного облучения на формирования радиационных дефектов в диффузионных кремниевых диодах // Физика полупроводников и микроэлектроника. – Ташкент: НИИ физики полупроводников и микроэлектроники, 2021. Т. 3. – № 3. – С. 45-50 (01.00.00. № 16).

4. Tashmetov M.Yu., Makhkamov Sh., Tillaev T.S., Erdonov M.N., Kholmedov H.M. Determination of solubility of cobalt in singlecrystal silicon method neutron activation // Physics of the Solid State. Maik Nauka Publishing/Springer SBM. – Germany, 2023. Vol. 65. – № 4. – P. 526-530 (№ 3. Scopus; IF=1,4)

5. Tashmetov M.Yu., Makhkamov Sh., Erdonov M.N., Saidov R.P., Sulaymanov N.T., Tillaev T.S., Kholmedov Kh.M. Influence of Electron Irradiation on The Microhardness of Cobalt Doped Silicon // AIP Conference Proceedings. – American Institute of Physics, 2024. Vol. 3020. Id. 040006-040006. – P. 5 (№ 3. Scopus; IF=0,5).

II bo'lim (II часть; part II)

6. Ташметов М.Ю., Махкамов Ш., Саттиев А.Р., Эрдонов М.Н., Холмедов Х.М. Эффективность формирования радиационных дефектных центров в кремниевых p^+n-p^+ структурах в зависимости от глубины формирования p^+ - слоя при протонном облучении / 12-я Международная конференция “Ядерная и радиационная физика”. – Алматы: Институт ядерной физики (Казахстан), 2019. 24-27 июня. Сборник тезисов. – С. 135-136.

7. Tashmetov M.Yu., Makhkamov Sh., Sattiev A.R., Erdonov M.N., Kholmedov H.M., Tillaev T.S. Radiation degradation of diffusion silicon diode parameters depending on the thickness of the $p^+ - n - n^+$ transition under electronic irradiation / The ninth international conference “Modern problems of nuclear physics and nuclear technologies”. – Tashkent: Institute of Nuclear Physics (Uzbekistan), 2019. September 24-27. Book of Abstracts. – P. 335-336.

8. Ташметов М.Ю., Махкамов Ш., Тиллаев Т.С., Эрдонов М.Н., Саттиев А.Р., Холмедов Х.М. Определение содержания примеси кобальта в легированном кремнии ядерно-аналитическим методом / Труды XXXI Международной конференции “Радиационная физика твёрдого тела”. – Москва, Севастополь: НИИ перспективных материалов и технологий, 2021. 5-10 июля. – С. 276-278.
9. Tashmetov M.Yu., Makhkamov Sh., Tillaev T.S., Erdonov M.N., Sattiev A.R., Egamov S.R., Sulaimov A.A., Kholmedov H.M. Influence of gamma radiation on electrophysical properties of silicon doped with cobalt / International conference “Modern problems of nuclear physics and nuclear technologies”. – Tashkent: Institute of Nuclear Physics (Uzbekistan), 2021. November 23-25. Book of Abstracts. – P. 140-141.
10. Ташметов М.Ю., Махкамов Ш., Эрдонов М.Н., Саидов Р.П., Исматов Н.Б., Тиллаев Т.С., Сулаймонов Н.Т. Влияние электронного облучения на микротвердость кремния, легированного кобальтом / 14-я Международная конференция “Ядерная и радиационная физика”. – Алматы: Институт ядерной физики (Казахстан), 2022. 26-30 сентября. Сборник тезисов. – С. 115-116.
11. Tashmetov M.Yu., Makhkamov Sh., Tillaev T.S., Erdonov M.N., Saidov R.P., Kholmedov Kh.M. Influence of electron irradiation on the electrophysical parameters of silicon doped with cobalt / 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE 2022). – Tomsk: Tomsk Scientific Center (Russia), 2022. October 2-8. – P. 427.
12. Махкамов Ш., Ташметов М.Ю., Эрдонов М.Н., Саидов Р.П., Холмедов Х.М. Формирование радиационных дефектов в кремниевых диффузионных диодных структурах при высокотемпературном облучении электронами / XIII Международная научная школы-конференция по радиационной физике, посвященная 90-летию А.А.Алыбакова – основателя физики твердого тела в Кыргызской Республике. – Бишкек: Институт физики им. Ж.Жеенбаева НАН КР, 2023. 31 июля – 6 августа. Сборник докладов. – С. 15-18.
13. Махкамов Ш., Эрдонов М.Н., Ташметов М.Ю., Саидов Р.П., Холмедов Х.М. Исследование влияния глубины формирования p^+ -слоя в кремниевых диффузионных структурах на скорость введения радиационных дефектов при электронном облучении / 73-я Международная конференция по ядерной физике “ЯДРО – 2023: фундаментальные вопросы и приложения” тезисы докладов. – Саров: ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ (Россия), 2023. – С. 267-268.
14. Махкамов Ш., Ташметов М.Ю., Эрдонов М.Н., Саидов Р.П., Исматов Н.Б., Холмедов Х.М. Управление быстродействием кремниевых диодных p^+ - n - n^+ структур при облучении высокоэнергичными электронами / Фундаментальные и прикладные проблемы современной физики: Труды международной конференции. – Ташкент: ФТИ НПО Физика-Солнце АН РУз, 2023. 19-21 октября. – С. 59-60.