

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

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

ZARIFBAYEV JASUR SHAVKATOVICH

**ERBIY VA YEVROPIY BILAN LEGIRLANGAN KREMNIYNING
NUQSONLI TARKIBIGA TASHQI OMILLARNING TA’SIRI**

01.04.10 – Yarimo‘tkazgichlar 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**

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

Zarifbayev Jasur Shavkatovich

Erbiy va yevropiy bilan legirlangan kremniyning nuqsonli tarkibiga tashqi omillarning ta'siri..... 3

Зарифбаев Жасур Шавкатович

Влияние внешних факторов на дефектную структуру кремния, легированного эрбием и европием..... 23

Zarifbaev Jasur Shavkatovich

The influence of external factors on the defect composition of silicon doped with erbium and europium..... 43

E'lon qilingan ishlar ro'uxati

Список опубликованных работ
List of published works..... 47

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

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

ZARIFBAYEV JASUR SHAVKATOVICH

**ERBIY VA YEVROPIY BILAN LEGIRLANGAN KREMNIYNING
NUQSONLI TARKIBIGA TASHQI OMILLARNING TA’SIRI**

01.04.10 – Yarimo‘tkazgichlar 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 Vazirlar Mahkamasi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2023.4.PhD/FM595 raqam bilan ro'yxatga olingan.

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

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

Ilmiy rahbar:

Hamdamov Jonibek Jumayevich,
fizika-matematika fanlari bo'yicha PhD, k.i.x.

Rasmiy opponentlar:

Otajonov Salim Madraximovich,
fizika-matematika fanlari doktori, professor.

Ayupov Kutub Sautovich,
fizika-matematika fanlari doktori, professor.

Yetakchi tashkilot:

Namangan davlat texnika universiteti

Dissertatsiya himoyasi O'zbekiston Milliy universiteti qoshidagi Yarimo'tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti huzuridagi ilmiy darajalar beruvchi DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 raqamli ilmiy kengashning 2025 yil «17» 09 soat 12⁰⁰ dagi majlisida bo'lib o'tadi. (Manzil: 100057, O'zbekiston, Toshkent sh., Yangi Olmazor ko'chasi, 20-uy, Tel. (99871) 248-79-94, faks: (99871) 248-79-92, e-mail: info@ispm.uz, O'zMU huzuridagi YaFM ITI majlislar zali).

Dissertatsiya bilan Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (70 raqam bilan ro'yxatga olingan). (Manzil: 100057, O'zbekiston, Toshkent shahri, Yangi Olmazor ko'chasi, 20-uy. Tel. (99871) 248-79-92. e-mail: info@ispm.uz).

Dissertatsiya avtoreferati 2025 yil «06» 09 kuni tarqatildi.
(2025 yil «06» 09 dagi 70 raqamli reestr bayonnomasi).



Sh.B. Utamuradova

Ilmiy darajalar beruvchi

ilmiy kengash raisi, f.-m.f.d., professor

O.X. Qo'ldashov

Ilmiy darajalar beruvchi

ilmiy kengash ilmiy kotibi, t.-f.d., professor

N.A. Turgunov

Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash

qoshidagi ilmiy seminar raisi,

f.-m.f.d., professor

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahonda yuqori funksional, barqaror va takrorlanuvchi elektrofizik xossalarga ega bo'lgan yangi yarimo'tkazgich materiallarni yaratish, ularni turli tashqi omillarga - harorat, nurlanish, mexanik ta'sir kabi omillarga barqaror holatda ishlay oladigan qurilmalarga tatbiq etish bo'yicha keng ko'lamli ilmiy izlanishlar olib borilmoqda. Rivojlangan davlatlardagi ilmiy markazlar va nufuzli oliy ta'lim muassasalari tomonidan klassik yarimo'tkazgich materiallaridan jiddiy farq qiluvchi, yangi tarkib va strukturalarga ega bo'lgan yarimo'tkazgichlarni tadqiq etish, ularning fizik xossalari chuqur o'rganish ustuvor yo'nalishlardan biri hisoblanadi. Ayniqsa, taqiqlangan sohasida chuqur energetik sathlar hosil qiluvchi kirishma atomlar - xususan, nodir yer elementlari qatoriga kiruvchi erbiy (Er) va yevropiy (Eu) elementlari bilan legirlangan monokristall kremniy namunalari, hozirgi zamon yarimo'tkazgichli texnologiyalarda istiqbolli material sifatida ko'rilmogda. Ushbu elementlar bilan legirlangan kremniy strukturasida faollashgan nuqson markazlari, panjara o'rnini egallagan ionlar va ularning komplekslari tufayli ilgari yarimo'tkazgichlar fizikasida kuzatilmagan yangi fizik hodisalar - masalan, fotoluminessensiya, magnitoptik effektlar, o'z-o'zidan shakillanuvchi past patensila to'siqli silisidlar kabi muhim holatlar kuzatilmogda. Bu esa ularning opto- va mikroelektronikada, xususan, datchiklar, optik kuchaytirgichlar, lazerlar va kvant qurilmalar yaratishda qo'llanish imkoniyatlarini ochib bermoqda.

Hozirda dunyoning yetakchi ilmiy markazlarida nodir yer elementlari kirishmalari asosida kremniyda hosil bo'luvchi nuqsonlar va ularning fizik xususiyatlari hamda ularga tashqi omillar ta'sirini o'rganish bo'yicha ilmiy izlanishlarga katta e'tibor qaratilmogda. Shu nuqtai nazardan, erbiy va yevropiy bilan legirlangan kremniyda shakllanuvchi nuqsonlar strukturalarining fazoviy konfiguratsiyasi, ularning energetik pozitsiyasi, tashqi omillarga nisbatan barqarorligi va transformatsiyasi masalalarini chuqur o'rganish dolzarb vazifalardan hisoblanmogda.

O'zbekiston Respublikasida so'nggi yillarda yarimo'tkazgich materiallarda kuzatilgan fizik hodisalarni o'rganish, ularning mexanizmlarini aniqlash va amaliy qurilmalar sifatida tatbiq etish yo'nalishida muhim ilmiy yutuqlarga erishilmogda.

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 19-mart 2021-yildagi "Fizika sohasidagi ta'lim sifatini oshirish va ilmiy tadqiqotlarni rivojlantirish chora-tadbirlari to'g'risida"¹gi PQ-5032 son qarorida fizika sohasida ilmiy tadqiqot ishlarining natijalarini ishlab chiqish bilan uzluksiz aloqasining masshtabini kengaytirish, iqtisod sohasidagi masalalarni hal qilishga yo'naltirish, ilmiy tadqiqotlarni hamda innovatsion faoliyatning natijadorligi va amaliy ahamiyatini oshirish masalalari qo'yilgan. Bu yo'nalishda yangi funksional imkoniyatlari mavjud kam energiya talab etadigan yarimo'tkazgich asboblarni yaratish, ularga sarf etiladigan energiyani tejashga va tannarxini kamaytirishga imkon beradi.

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

O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-son “2022 - 2026-yillarga mo‘ljallangan Yangi O‘zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to‘g‘risida”² hamda O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2020-yil 29-oktyabrdagi PF-6097-son “Ilm-fanni 2030-yilgacha rivojlantirish konsepsiyasini tasdiqlash to‘g‘risida”³ farmonlar, O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2021-yil 3-martdagi PQ-5011-son “Elektrotexnika sanoatini yanada rivojlantirish va mahalliy mahsulotlarning raqobatbardoshligini oshirishga doir qo‘shimcha chora-tadbirlar to‘g‘risida”⁴ Prezident Qarori, O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2023-yil 16-fevraldagi PQ-57-son “2023-yilda qayta tiklanuvchi energiya manbalarini va energiya tejoychi texnologiyalarni joriy etishni jadallashtirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”⁵ Prezident Qarori shuningdek, “Mirzo Ulug‘bek nomidagi O‘zbekiston Milliy universiteti huzuridagi Yarimo‘tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot institutini mustahkamlash chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi 639-son qarorlarida ko‘zda tutilgan vazifalarni bajarishga ma’lum darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalarni rivojlanishining ustuvor yo‘nalishlariga mosligi. Dissertatsiya ishi, respublika fan va texnologiyalar rivojlanishining III. “Energiya, energiya resurslarini tejash, transport, raketa va kosmik texnikasi, aviatsiya, robototexnika, mashinasozlik va asbobsozlik, zamonaviy elektronika, mikroelektronika, fotonika, elektron asbobsozlikni rivojlantirish” dagi ustuvor yo‘nalishlarga muvofiq bajarilgan.

Muammoning o‘rganilganlik darajasi. So‘nggi yillarda yarimo‘tkazgich materiallarda, xususan, nodir yer elementlari bilan legirlangan kremniy strukturalarida tashqi omillar ta‘sirida yuzaga keladigan nuqsonlar tizimini chuqur o‘rganish olimlar va mutaxassislar e‘tiborini jalb qilmoqda.

Xorijiy olimlar kremniyni nodir yer elementlari bilan legirlash sohasida muhim natijalarga erishdilar. 1984-yilda H.Ennen (Germaniya) molekulyar-nurli epitaksiya usulidan foydalanib, birinchi bor legirlangan kremniy-erbiy (Er-Si) asosidagi diodlarda 1,54 mkm diapazonida fotolyuminessensiya kuzatildi. 1995-yilda Hommerix (AQSH) kremniyning g‘ovak tuzilishi Er³⁺ ionlarining fotolyuminessensiya intensivligini to‘rt barobar oshirishini tajribada isbotlab, nanoqatlamlar morfologiyasining faollashtiruvchi rolini ilmiy jihatdan asosladi. 2008-yilda Nicolas Reckinger va boshqalar (Belgiya) titan qatlami ostida sintez qilingan ErSi_{2-x} / n-Si kontaktlarida Shottki to‘sig‘ining eng past qiymatiga - $\Phi_B \approx 0,28$ eV ga erishdi. Bu esa SMOS (Shottki asosidagi metall-oksid-yarimo‘tkazgich) texnologiyasida silitsidlarni qo‘llashning yangi istiqbollarini ochib berdi.

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

³ O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining Farmoni, “Ilm-fanni 2030-yilgacha rivojlantirish konsepsiyasini tasdiqlash to‘g‘risida”, 29.10.2020 yildagi PF-6097-son

⁴ O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining Qarori “Elektrotexnika sanoatini yanada rivojlantirish va mahalliy mahsulotlarning raqobatbardoshligini oshirishga doir qo‘shimcha chora-tadbirlar to‘g‘risida”, 03.03.2021 yildagi PQ-5011-son

⁵ O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining qarori, “2023-yilda qayta tiklanuvchi energiya manbalarini va energiya tejoychi texnologiyalarni joriy etishni jadallashtirish chora-tadbirlari to‘g‘risida” 16.02.2023 yildagi PQ-57-son

Rossiyalik olimlar 1970-1980-yillarda Leningrad FTI (Ioffe) Lebedev A.A. va boshqalar tomonidan o‘tuvchi, notir yer elementlari va hk., kislorod-presipitatsiya va vakansiya-metall komplekslari bo‘yicha bir qator ishlar bajarilgan, ularning aksar maqolalari «Физика и техника полупроводников» jurnalida chop etilgan.

O‘zbekistonlik olimlar M.K. Baxodirxonov, A.T. Mamadalimov va S.Z. Zaynobbiddinovlar kompensirlangan kremniy asosidagi yarimo‘tkazgich materiallarning parametrlarini yaxshilash mumkinligini tajriba yo‘li bilan isbotladilar. Tadqiqotlar jarayonida K.P. Abduraxmanov, X.S. Daliyev va Sh.B. Utamuradovalar kremniyda bir qator chuqur energetik sathlarni aniqlab, ularning energetik xususiyatlarini belgiladilar.

Ilmiy adabiyotlar tahlili shuni ko‘rsatmoqdaki, erbiy va yevropiy atomlari bilan legirlangan kremniy strukturalarida yuzaga keladigan nuqsonlarning tashqi omillar bilan o‘zaro ta‘siriga oid natijalar izchil va takrorlanuvchi xulosalarga olib kelmagan. Xususan, mavjud ilmiy ishlarda ushbu elementlarning kremniy kristall panjarasidagi fazoviy konfiguratsiyasi, ularning taqiqlangan soha ichida hosil qiladigan chuqur energetik sathlari va bu sathlarning elektr faolligi yetarlicha chuqur o‘rganilmagani aniqlandi.

Dissertatsiya mavzusining dissertatsiya bajarilgan oliy ta‘lim muassasasining ilmiy tadqiqot ishlari bilan bog‘liqligi. Dissertatsiya tadqiqoti O‘zbekiston Milliy universiteti huzuridagi Yarimo‘tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti ilmiy loyihalari doirasida, O‘zbekiston Respublikasi Fan va texnologiyalar agentligining grantlari mavzuli rejalariga muvofiq bajarildi. Bular quyidagilarni o‘z ichiga oladi: YOF-2-08 “Kremniy va nodir yer elementlari kirishmali ko‘p qatlamli kremniyli tuzilmalarda nurlanishning nuqsonlar hosil bo‘lishi va yo‘qolishiga ta‘sirini o‘rganish” (2010-2011 yillar) hamda MU-FZ-20171025461 “Lantan, gadoliny va yevropiy oksidlari dielektrik sifatida qo‘llanilgan kremniyli MDYA-tuzilmalarning elektrofizik xususiyatlari va xossalari” (2018-2019 yillar). Bundan tashqari, OT-F2-11 “D-elementlar kirishmalari mavjud bo‘lgan kremniyning sirt qatlamlari va hajmida nanoo‘lchamli nuqsonlarning shakllanish qonuniyatlarini tadqiq etish” (01.01.2017-31.12.2020 yillar) va IL-652207792 “Turli chuqur sathli yarimo‘tkazgichlarning optik, sig‘im va rezonans xossalari tahlil qilish asosida barqaror parametrlarga ega yuqori samarali kremniyli tuzilmalarni yaratish” (2023-2025 yillar) mavzularidagi ilmiy tadqiqotlar loyihasi doirasida bajarildi.

Tadqiqotning maqsadi erbiy va yevropiy bilan legirlangan kremniyning nuqsonli tarkibini va unga tashqi omillarning ta‘sirini kompleks tadqiq qilishdan iborat.

Tadqiqot vazifalari:

kremniyni erbiy va yevropiy kirishmalari bilan legirlashning fizik-kimyoviy jihatlari va texnologiyasini ishlab chiqish;

diffuziya usuli orqali erbiy va yevropiy kirishmalari bilan legirlangan kremniy namunalari elektrofizik xususiyatlarini tadqiq etish;

raman va rentgen spektroskopiyasi usullari yordamida erbiy va yevropiy bilan legirlangan kremniyning nuqsonli tuzilishini o‘rganish;

erbiy va yevropiy kirishmalari hosil qilgan chuqur markazlarning energetik spektrini aniqlash;

kremniyda erbiy va yevropiy kirishmalari hosil qilgan nuqsonlarning tuzilishi va morfologiyasi, samaradorligi hamda chuqur markazlar shakllanishiga texnologik omillarning ta'sirini o'rganish.

Tadqiqotning obyekti sifatida Choxralskiy usuli bilan o'stirilgan hamda nodir yer elementlari - erbiy va yevropiy kirishmalari bilan legirlangan monokristall kremniy olingan.

Tadqiqotning predmeti erbiy va yevropiy atomlari bilan legirlangan monokristall kremniyda nuqsonli komplekslar va chuqur sathlarning shakllanishi hamda rivojlanishining fizik-kimyoviy jarayonlari, shuningdek, tashqi omillar ta'sirida materialning morfologik, optik va elektrofizik xususiyatlaridagi o'zgarishni o'rganish hisoblanadi.

Tadqiqotning usullari. Tadqiqot obyekti sifatida erbiy (Er) va yevropiy (Eu) atomlari bilan legirlangan Si kremniy monokristallari ishlatildi. Sirt morfologiyasi va kirishmalarning taqsimlanishini tahlil qilish uchun skanerlovchi elektron mikroskopiyasi (SEM), energiya dispersiv spektroskopiyasi (EDS) hamda atom-kuch mikroskopiyasi (AFM) usullaridan foydalanildi. Kristall panjaraning fazaviy tarkibi va parametrlari rentgen difraksiyasi (XRD) yordamida aniqlandi. Tebranish modlari va kimyoviy bog'lanishlarni o'rganish uchun Raman va Fyurje infraqizil (IQ) spektroskopiyasi usullari qo'llanildi. Elektrofizik xususiyatlar, jumladan to'rt zond o'lchash va chuqur sathli sig'imli spektroskopiyasi (DLTS) usuli bilan aniqlandi.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi:

ilk bor erbiy bilan legirlangan kremniyda Er-O bog'larining hosil bo'lishi tugunlararo optik faol kislorod konsentratsiyasi 35-40% ga kamayishiga va kislorod markazlarining optik faolligining pasayishiga olib kelishi aniqlangan;

ilk bor erbiy bilan legirlangan kremniyda ikkita yangi infraqizil tebranish modasi 495 va 848 sm^{-1} da aniqlangan va Er-O bog'larining shakllanganligini tasdiqlagan;

kremniyga Er va Eu oksid qatlamlar orqali diffuziyasi natijasida sirtga yaqin p^+ qatlamlar hosil bo'lishi va bu qatlamlarda faol nodir yer elementlari atomlarining konsentratsiyasi $(1\div 2) \times 10^{20} \text{sm}^{-3}$ ni tashkil etishi ko'rsatilgan;

uzoq muddatli lazer nurlanishi Er markazlarini qo'shimcha faollashtirishi va Si<Er> asosidagi diod tuzilmalarida 77 K da tokning qiymatini 25 barobargacha oshirishi aniqlangan;

Yevropiy bilan legirlangan kremniyda radiyatsiya natijasida hosil bo'ladigan nuqsonlarning kamayishi va Si<Eu> tuzilmalarining radiatsiyaga chidamliligini 2-3 martagacha oshirishi aniqlangan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat: Er_2O_3 va Eu_2O_3 oksidlari asosida monokristall kremniyga nodir yer elementlarini diffuzion yo'l bilan kiritish uchun texnologik parametrlar kompleks asosda ishlab chiqildi. Taklif etilgan rejim sirtga yaqin hududlarda $(1-2) \times 10^{20} \text{sm}^{-3}$ gacha bo'lgan legirlangan p^+ -qatlamlarni barqaror shakllantirish imkonini berdi, bu esa yuqori tokli

diodlar va quvvatli o'ta yuqori chastotali qurilmalar uchun funksional asos yaratilgan;

IQ spektroskopiyasi asosida erbiy ionlarining kristall panjaradagi ishtirokini aniqlashga imkon beruvchi ishonchli diagnostik markerlar sifatida 495 sm^{-1} va 848 sm^{-1} chastotalardagi tebranish cho'qqilar tavsiflandi. Tadqiqotlari natijasida tugunlararo optik faol kislorod konsentratsiyasining 35-40% ga kamayishi va Er-O bog'lanmalarining shakllanishi fon yutilishni pasaytirib, Si<Er> asosidagi infraqizil nurlatgichlarning ichki kvant samaradorligini oshirishi eksperimental jihatdan asoslab berilgan;

Eu ionlarining kremniy strukturasi kiritilishi natijasida materialning radiatsion nuqsonlarga nisbatan chidamliligi ortishi aniqlandi, bu esa Si<Eu> asosidagi yarimo'tkazgich detektorlarining qo'shimcha radiatsion himoyasiz sharoitlarda - jumladan, kosmik va yadroviy muhitda - qo'llanish imkoniyatlarini ochib bergan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi zamonaviy yuqori aniqlikdagi o'lchov asboblari va qurilmalar (DLTS tizimi, skanerlovchi elektron mikroskop EVO 15, IQ spektroskopi FSM-2201, hamda Raman spektrometri SENTERRA II (Bruker, Germaniya)) orqali ta'minlangan. Nodir yer elementlari - Er va Eu bilan legirlangan kremniy namunalari morfologiyasi, tuzilishi va elektrofizik xossalari tahlil qilishda bir-biridan mustaqil eksperimental usullar qo'llanilgan hamda tajribalar bir necha bor takrorlangan. Olingan ilmiy natijalar mustaqil o'lchovlar va ilg'or ilmiy adabiyotlar bilan solishtirib tasdiqlangan. Asosiy ilmiy xulosalar ilmiy jurnallarda chop etilgan, shuningdek, dissertatsiya ishda taklif etilgan fizik modellar yarimo'tkazgichlar fizikasidagi nazariy asoslarga to'liq mos kelgani bilan ham tadqiqot natijalarining ishonchliligi tasdiqlangan.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Mazkur tadqiqot natijalari kremniy kristall panjarasiga nodir yer elementlari Er va Eu atomlarini diffuziya yo'li bilan kiritish jarayonida yuzaga keladigan kimyoviy va struktura o'zgarishlari haqidagi mavjud ilmiy tasavvurlarni sezilarli darajada boyitdi. Ilk bor Si-O-Si guruhlaridagi kislorod atomlarining Er va Eu atomlariga qisman almashishi natijasida barqaror Er-O va Eu-O bog'lanishlarining shakllanishi eksperimental tarzda aniqlanib, ularning infraqizil diapazondagi xos tebranish modalariga - 495 va 848 sm^{-1} - mos kelishi orqali ishonchli tasdiqlandi. Bu modalar intensivligining materialning optik faolligi bilan miqdoriy korrelyatsiyasi aniqlangani kremniydagi mahalliy struktura o'zgarishlari bilan foton so'rilishi o'rtasidagi bevosita bog'liqlikni ochib beradi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati tajriba natijalari asosida olingan kremniyda Er va Eu atomlarining diffuziyasi orqali yuqori o'tkazuvchanlikka ega, yuzaga yaqin joylashgan p^+ -qatlamlarni shakllantirish texnologiyasi ishlab chiqildi. Bunday qatlamlar kuchli diodlar va o'ta yuqori chastotali qurilmalarning samaradorligini sezilarli darajada oshirishiga imkon beradi. Shu tariqa, ushbu tadqiqot natijalari yarimo'tkazgich qurilmalar texnologiyasida innovatsion yechimlarni taklif etib, axborot uzatish tizimlari hamda sensorli elektronika sohaslarida keng amaliy salohiyatga ega ekanligini ko'rsatdi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi.

Erbiy va yevropiy bilan legirlangan kremniyning nuqsonli tarkibiga tashqi omillarning ta'siri mavzusidagi jarayonlarini tadqiq qilish asosida:

Er_2O_3 va Eu_2O_3 oksidlari asosida yaratilgan diffuziya texnologiyasi orqali kremniy kristalli sirtiga yaqin sohada $(1\div 2)\times 10^{20} \text{ sm}^{-3}$ konsentratsiyaga ega bo'lgan p^+ -qatlamlar hosil qilish usuli ishlab chiqildi. Mazkur texnologik yechim, kremniyning sirtga yaqin sohasida nisbatan bir xil legirlanish qatlami hosil qilish imkonini berdi va bu usul "FOTON" aksiyadorlik jamiyatida diod va chastotali qurilmalar ishlab chiqarish texnologiyasiga joriy etildi ("FOTON" AJning 2025-yil 30-apreldagi 13-sonli ma'lumotnomasi). Yuqori konsentratsiyali p^+ qatlamlarning shakllantirilishi orqali Si<Er> va Si<Eu> asosidagi diod va tranzistor strukturalarining barqarorligi hamda talab etiladigan elektrofizik ishchi parametrlari ta'minlandi. Shu orqali tajriba namunalarida ishlash muddati 20% gacha oshishiga imkon bergan;

Tadqiqot davomida olingan lazer nurlanishi bilan qo'shimcha faollashtirilgan erbiy atomlari tufayli fotosezuvchanlikning ortishi va yevropiy atomlari orqali nurlanishga chidamlilikning oshishi kabi amaliy natijalardan Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universitetida OT-F2-55 «Yangi funksional imkoniyatlarga ega nanomateriallarning yangi sinfi sifatidagi kirishma atomlari nanoklasterlarini shakllanishi negizida hajmiy strukturalashgan kremniy olishning ilmiy asoslarini ishlab chiqish» loyihasini bajarish jarayonida foydalanildi (O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligining 2025-yil 1-maydagi 02/02-1233-sonli ma'lumotnomasi). Dissertatsiya natijalaridan foydalanish kremniyda kirishma nanoklasterlarini shakllantirishning ilmiy asoslarini yaratgan. Bu esa opto va mikroelektronika uchun yangi funksional xususiyatlarga ega nanomateriallarni olish imkoniyatlarini ochib bergan.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Dissertatsiya ishini bajarishda olingan ilmiy natijalar 5 ta xalqaro va 8 ta respublika miqyosidagi ilmiy-amaliy anjumanlarda ma'ruza va muhokama qilingan.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi. Jami 13 ta ilmiy ish, jumladan, dissertatsiya mavzusi bo'yicha 5 ta maqola O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasining falsafa va fan doktorlik dissertatsiyalarining asosiy ilmiy natijalarini chop etishga tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda, shundan 3 tasi Scopus bazasida chop etilgan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya kirish, to'rtta bob, xulosa va foydalanilgan adabiyotlar ro'yxatidan tashkil topgan. Dissertatsiya ishi 35 ta rasm va 2 ta jadvalni o'z ichiga olgan holda 115 betlik matndan iborat.

ISH MAZMUNINING ASOSIY QISMI

Dissertatsiya ishining kirish qismida tanlangan mavzuning dolzarbligi va amaliy ahamiyati asoslab berilgan, uning Respublikada fan va texnologiyalarni rivojlantirishning ustuvor yo'nalishlari bilan aloqasi yoritilgan. Ko'rib chiqilayotgan muammo bo'yicha zamonaviy xalqaro tadqiqotlar atroflicha tahlil qilingan,

muammoning o'rganilganlik darajasi bayon etilgan. Tadqiqotning maqsad va vazifalari aniq ifodalangan.

Dissertatsiyaning **“Kremniy tuzilishida nodir yer atomlarining fizik-kimyoviy xususiyatlari”** nomli birinchi bobida kremniyni nodir yer elementlari, erbiy (Er) va yevropiy (Eu) bilan legirlashga oid zamonaviy tadqiqotlar tahlili keltirilgan. Ularni kremniy panjarasiga kiritishning fizik-kimyoviy xususiyatlari, jumladan 4f-lyuminessensiya, Er-O komplekslarining hosil bo'lishi, shuningdek implantatsiya va termik ishlov berish jarayonida nuqsonlar paydo bo'lish mexanizmlari ko'rib chiqilgan.

Si:Er va Si:Eu ning elektrofizik va optik xususiyatlari tahlil qilingan bo'lib, bunda harorat, nurlanish dozasi, oksid qoplamlari va tashqi omillarning nurlanish samaradorligiga ta'siri o'rganilgan. Kombinatsiyalangan legirlash va sirt strukturasi modifikatsiyalash usullari optoelektronika uchun mo'ljallangan namunalarning barqarorligi va funktsionalligini oshirish imkonini berishi aniqlangan.

O'tkazilgan tahlillar asosida Si ni Er va Eu kirishmalar bilan legirlash texnologiyasini ishlab chiqishga, ularning nuqsonli tuzilmaga, elektrofizik ko'rsatkichlarga va chuqur sathlar xususiyatlariga ta'sirini o'rganishga qaratilgan dissertatsiya tadqiqotining vazifalari belgilangan.

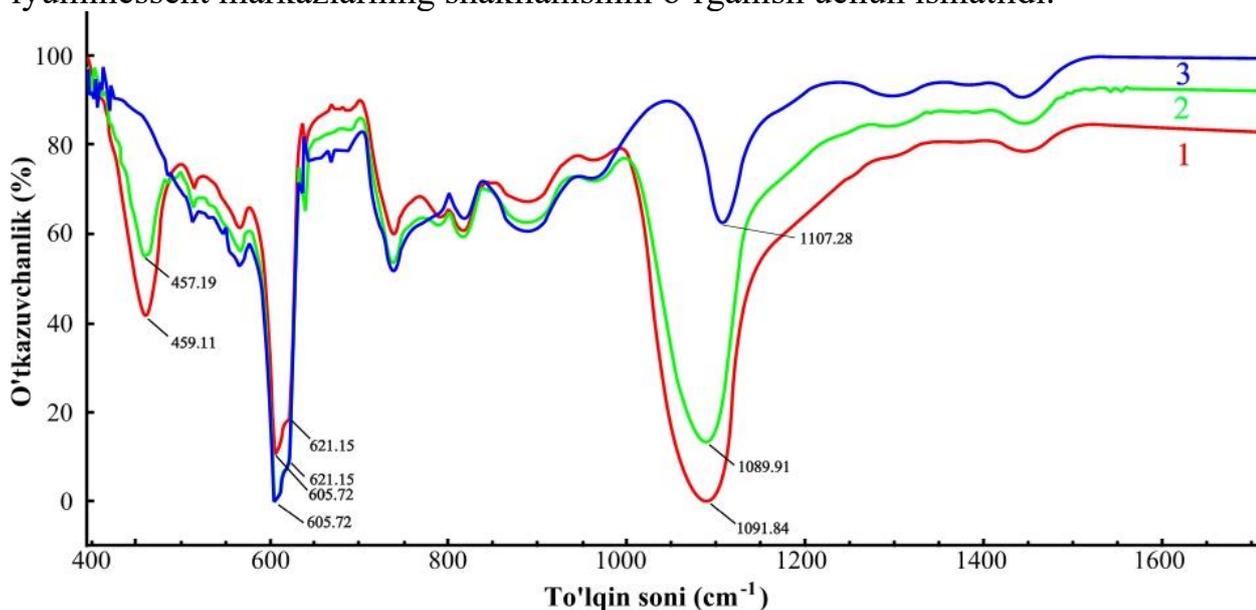
Dissertatsiyaning **“Tajriba tadqiqotlari uslubi va namunalarni tayyorlash texnologik jarayoni”** deb nomlangan ikkinchi bobida kremniyni nodir yer elementlari (erbiy va yevropiy) bilan diffuzion legirlash usuli va o'rganilayotgan tuzilmalarni tayyorlash texnologiyasi bayon etilgan. Kremniy tagliklarini tayyorlash, oksid qatlamlarini shakllantirish, issiqlik bilan ishlov berish va sirt qatlamlarini olib tashlashning o'ziga xos jihatlari keltirilgan. Ko'p qatlamli tizimlarning hosil bo'lish sharoitlari va kirishmalarining kremniy kristall panjarasi bilan o'zaro ta'siri ko'rib chiqilgan.

Diffuzion va qotishmali diod tuzilmalarini tayyorlash texnologik jarayonlari batafsil bayon etilgan. Bunda legirlash parametrlari, kontakt tizimini qurish va issiqlik ta'sirlarini modellashtirish kabi jarayonlar ham qamrab olingan. DLTS usuli orqali chuqur sathlar holatini o'rganishning asosiy tamoyillari, jumladan o'tish jarayonlarini qayd etish va spektrlarni shakllantirish usullari tushuntirilgan.

Skanerlovchi elektron mikroskopiya (SEM) va energiya dispersiyali tahlil (EDS) yordamida namunalar morfologiyasini o'rganish metodikasi tasvirlangan. Shuningdek, infraqizil yutilish va kombinatsion sochilish (Raman spektroskopiyasi) spektrlarini qayd etish usullari ham keltirilgan. Ikkilamchi fazalarni aniqlash uchun rentgen-faza tahlilini o'tkazish shartlari ham batafsil yoritilgan.

Dissertatsiyaning **“Er va Eu atomlarining kremniyda nuqson hosil bo'lish jarayonlariga ta'siri”** nomli uchinchi bobida nodir yer elementlari - erbiy va yevropiy bilan legirlangan kremniyda nuqson hosil bo'lish jarayonlarini o'rganish natijalari keltirilgan. Infraqizil spektroskopiya yordamida Er bilan legirlashdan so'ng Si-O-Si tebranishlar intensivligining pasayishi aniqlandi. Bu hodisa kislorodning qayta taqsimlanishi va Er-O bog'larining shakllanishi bilan bog'liq ekanligi aniqlandi.

Olingan namunalar keyingi tadqiqotlarda nodir yer elementlari bilan legirlangan kremniyning nuqsonli tuzilishi, kirishmalarning taqsimlanishi va lyuminescent markazlarning shakllanishini o'rganish uchun ishlatildi.



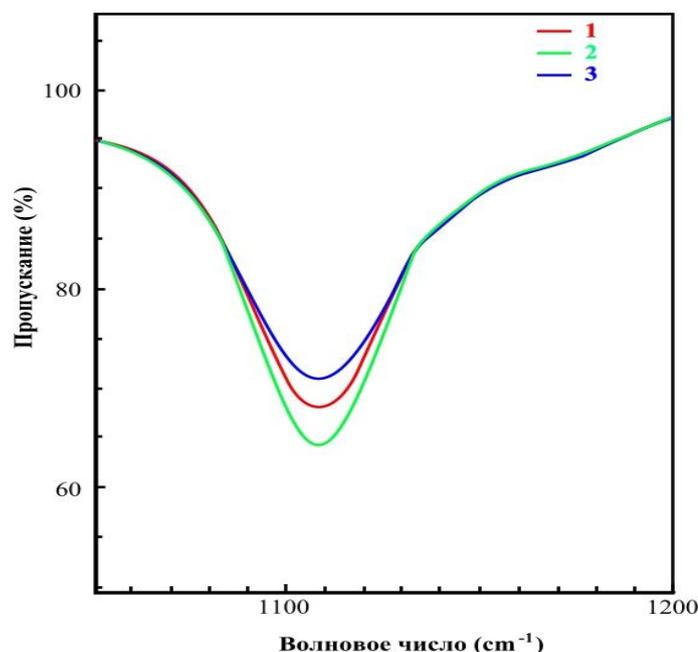
1-rasm. n-Si nazorat namunasining IQ yutilish spektrlari.

1 - n-Si ustidagi oksid qatlami, 2 - n-Si sirtidan oksid qatlami qisman tozalangan, 3 - n-Si sirtidan oksid qatlami butunlay olib tashlangan.

Oksid qatlami qalinligi 5-15 nanometrdan ortiq bo'lgan barcha namunalarda $1080-1100\text{ cm}^{-1}$ sohasida Si-O-Si asimmetrik tebranishlariga mos keladigan kuchli chiziq kuzatiladi. Bu chiziqning joylashuvi va yarim kengligi oksidlanish darajasiga va kremniy oksidining ehtimoliy nostexiometriyasiga bog'liq (SiO_x , bunda $1 \leq x \leq 2$). Bizning tajribalarimizda, harorat va vaqt oshgani sayin, mazkur chiziq $1100-1110\text{ cm}^{-1}$ sohaga siljidi. Bu esa oksidning zichlashganini va uning stexiometriklik darajasi oshganini ko'rsatadi.

Ekspirimental ma'lumotlar ko'rsatishicha (1-rasm), qalin oksid qatlami ($\sim 150\text{ nm}$) bo'lgan ikki kremniy namunasining infraqizil spektrlari ($380-1700\text{ cm}^{-1}$ oralig'ida) va oksid qisman yemirilgandan keyingi holati o'ziga xos xususiyatlarni namoyon etadi. $\sim 1100\text{ cm}^{-1}$ atrofidagi kuchli chiziq Si-O-Si bog'ining asimmetrik valent tebranishlariga mos keladi, oksid qatlami olib tashlanganda uning amplitudasi pasayadi. $450-470\text{ cm}^{-1}$ sohasida Si-O-Si bog'ining tebranma harakati (rocking-moda) kuzatiladi. 605 va 621 cm^{-1} (v) dagi kichik cho'qqilar uglerod (C) va bor (B) kirishmalarini ko'rsatadi. Bu esa dastlabki kremniyning xususiyatlari yoki uning o'stirilish sharoitlari bilan bog'liq bo'lishi mumkin.

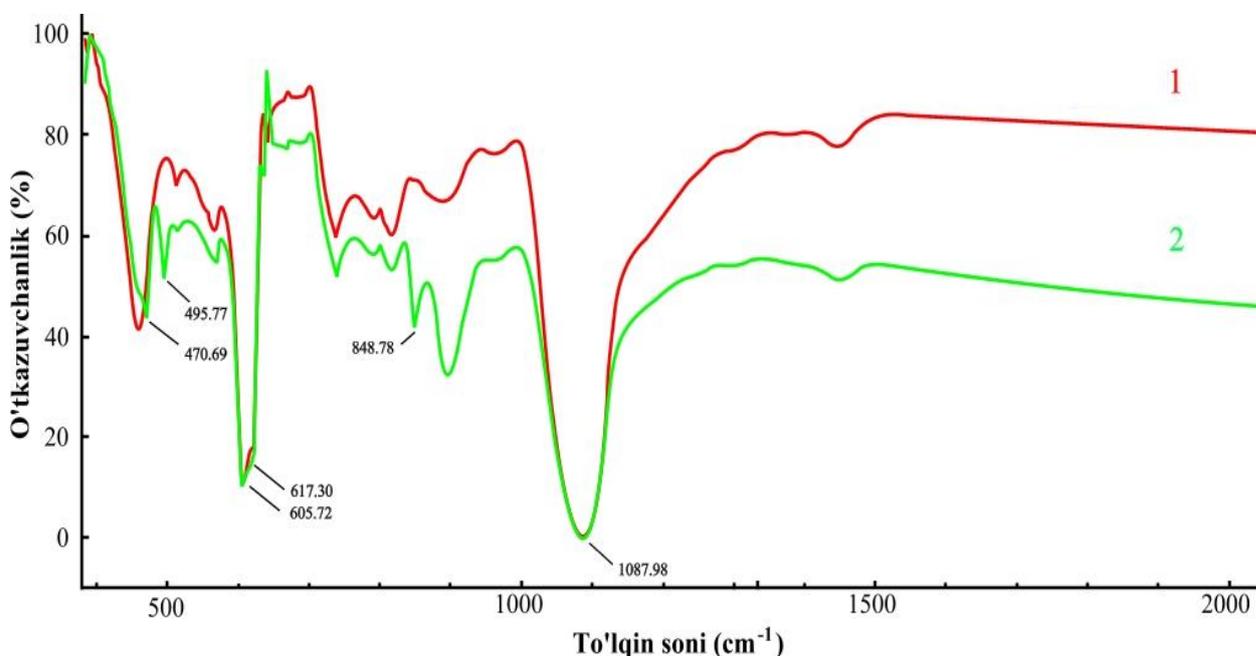
Dastlabki namunaga (1-rasm) nisbatan erbiy bilan legirlash (2-rasm) $1090-1110\text{ cm}^{-1}$ oralig'ida polosa amplitudasining sezilarli darajada pasayishiga olib keladi. Ushbu chiziq maydonini miqdoriy baholash natijasida optik faol kislorod (Si-O-Si) miqdorining 35-47% ga kamayishi aniqlandi. Bu hodisa Er ning O bilan o'zaro ta'siri natijasida yuz beradi, bunda Er, Si-O-Si bog'laridagi O ning bir qismini o'rnini egallaydi va Er-O bog'larini hosil qiladi. Ehtimol, bu jarayon kichik Er_2O_3 klasterlari va Er-O-Si kirishma fazalarining shakllanishi bilan bog'liq bo'lsa kerak.



2-rasm. n-Si<Er> namunalarining IQ-yutilish spektrlari.

1 - boshlang'ich kremniy, n-Si; 2 - nazorat namunasi, n-Si; 3 - legirlangan namuna, n-Si<Er>.

Taxmin qilinishicha, Er ishtirokida termik ishlov berilganda SiO₂ tarkibidagi kislorod qisman qayta taqsimlanib, Er-O bog'larini hosil qiladi. Natijada mavjud Si-O-Si guruhlarining miqdori kamayadi, bu esa kremniy matrisasidagi kislorodning optik faolligini pasaytiradi. Shuningdek, Er-Si-O silikatlarining yoki Er₂O₃ nanodispers kirishmalari hosil bo'lishi ham mumkin.



3-rasm. Er bilan legirlangan n-Si namunalarining IQ yutilish spektrlari.

1 - nazorat n-Si kremniy, 2 - Er bilan legirlangan n-Si<Er> kremniy (sekin sovutish)

Ushbu holatda kirishmasizsiz namunalar tasvirlangan bo'lib, oksidlanuvchi qatlamli namunalarda qo'shimcha cho'qqi kuzatilishini ta'kidlash mumkin.

Cho‘qqilar 457 sm^{-1} , 605 sm^{-1} , 621 sm^{-1} , 1090 sm^{-1} va 1107 sm^{-1} da joylashgan. 457 sm^{-1} da sirdagi Si-O bog‘ining deformatsiyasi, 842 sm^{-1} da Si-O bog‘ining egilishi, 1107 sm^{-1} da esa Si-O-Si bog‘ining cho‘zilishi kuzatiladi. 605 sm^{-1} dagi cho‘qqi Si-C bog‘iga mos keladi.

3-rasmda, shuningdek, Er-O bog‘lanishiga mos keladigan 495 sm^{-1} va 848 sm^{-1} da joylashgan ikkita qo‘shimcha cho‘qqini kuzatish mumkin. Bu cho‘qqilar faqat erbiy bilan legirlangan namunalarda paydo bo‘ladi va nazorat namunalari uchramaydi. IQ-spektroskopiya kimyoviy tarkibiy qismlarni va ularning sirt tebranishlarini aniqlash imkonini beradi. Biroq, biri kremniy bilan bog‘liq bo‘lgan ikki turdagi bog‘lanishni IQ-spektroskopiya yordamida aniqlash imkonsiz, chunki ular namunalarda kirishma sifatida mavjud bo‘lgan erbiy bilan butunlay qoplangan.

Er kiritilishi natijasida sirt oldi sohasida Er-O komplekslari hamda oksid va silikat nanofazalarining shakllanishi, shuningdek, ASM va SEM usullari yordamida aniqlangan sirt tuzilishining sezilarli morfologik o‘zgarishlarga uchrashi ko‘rsatib berildi.

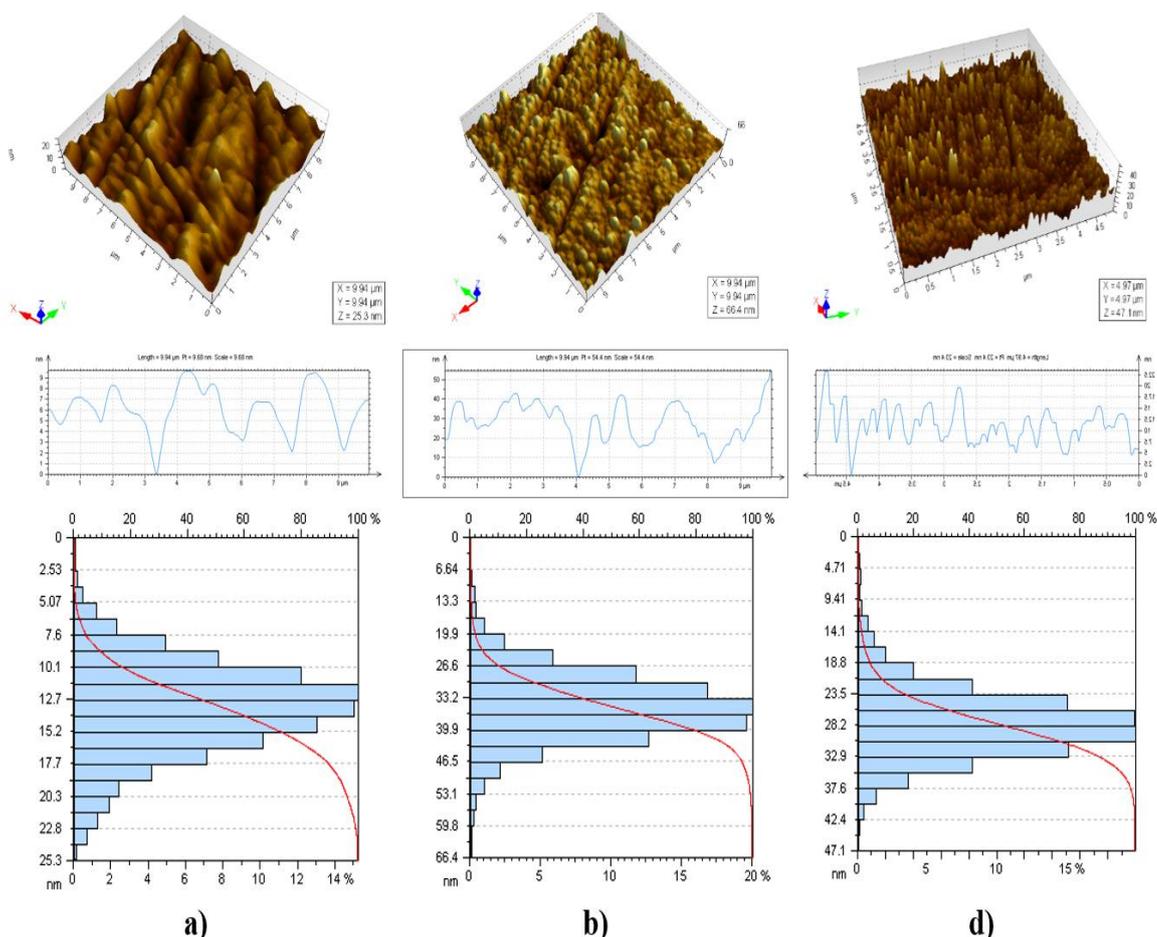
Atom-kuch mikroskopiyasi (AKM) ko‘rsatishicha (4-rasm), n-Si<Er> namunasi o‘tkir uchli bo‘rtiqlar bilan yanada yaqqolroq relyefni namoyon etadi. Z o‘qi bo‘yicha maksimal amplituda $\sim 47,1\text{ nm}$ ni tashkil etib, bu termik ishlov berilgan kremniyga ($\sim 64,4\text{ nm}$) nisbatan rasman pastroq. Biroq, vizual jihatdan cho‘qqilar zichroq va to‘plangan ko‘rinadi, bu esa sirt notekisliklarining kuchayganligidan dalolat beradi.

Relyefning chiziqli profili balandlikning 40-45 nm gacha tez-tez keskin o‘zgarishlarini ko‘rsatadi, bu esa yuzaning orolsimon tuzilishini tasdiqlaydi. Balandliklar taqsimoti gistogrammasi etalon kremniyga nisbatan kengroq xususiyatga ega: taqsimot maksimumi o‘ngga siljigan, uning “dumi” esa yuqori qiymatlar sohasiga cho‘zilgan. Bu esa 20-30 nm va undan yuqori balandlikdagi uchastkalar sezilarli miqdorda mavjudligini ko‘rsatadi.

Atom-kuch mikroskopiyasi (AKM) ko‘rsatishicha (4-rasm), n-Si<Er> namunasi o‘tkir uchli bo‘rtiqlar bilan yanada yaqqolroq relyefni namoyon etadi. Z o‘qi bo‘yicha maksimal amplituda $\sim 47,1\text{ nm}$ ni tashkil etib, bu termik ishlov berilgan kremniyga ($\sim 64,4\text{ nm}$) nisbatan rasman pastroq. Biroq, vizual jihatdan cho‘qqilar zichroq va to‘plangan ko‘rinadi, bu esa sirt notekisliklarining kuchayganligidan dalolat beradi.

Relyefning chiziqli profili balandlikning 40-45 nm gacha tez-tez keskin o‘zgarishlarini ko‘rsatadi, bu esa yuzaning orolsimon tuzilishini tasdiqlaydi. Balandliklar taqsimoti gistogrammasi etalon kremniyga nisbatan kengroq xususiyatga ega: taqsimot maksimumi o‘ngga siljigan, uning “dumi” esa yuqori qiymatlar sohasiga cho‘zilgan. Bu esa 20-30 nm va undan yuqori balandlikdagi uchastkalar sezilarli miqdorda mavjudligini ko‘rsatadi.

Erbiyni kiritish, ayniqsa kislorodli muhitda termik ishlov sharoitida, ehtimol, erbiy oksidlari va Er-Si-O silikatlarini o‘z ichiga olgan nanostrukturalarning shakllanishiga olib keldi. Bu esa sirt mikrog‘adir-budurligining sezilarli darajada oshishiga sabab bo‘ldi.



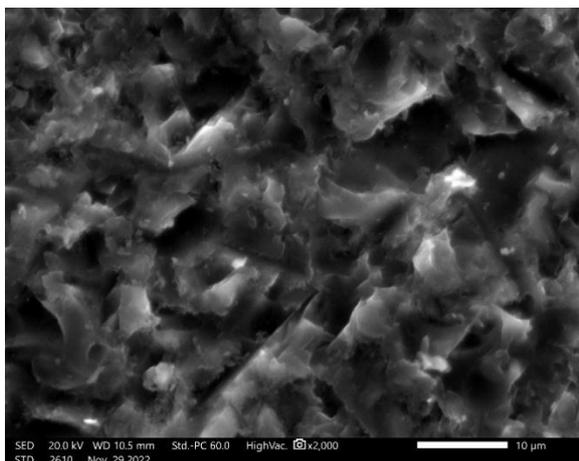
4-rasm. Namunalarning strukturaviy tuzilishi atom kuch mikroskopi (ASM) yordamida tadqiq etildi:

a) n-Si etalon namunasi, b) n-Si termik ishlov berilgan namunasi, d) n-Si namunasi

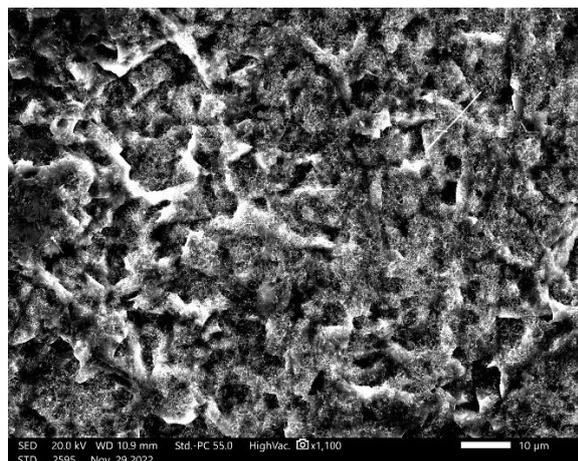
Morfologik tahlil natijasida sirtning g'adir-budurligining keskin oshishi va orolsimon nanostrukturallarning mavjudligi aniqlandi. Qiyosiy SEM tekshiruvlari shuni ko'rsatdiki, kremniyni Er va Eu bilan legirlash jarayonida faza hosil bo'lishi bir-biridan sezilarli darajada farq qiladi.

Qiyosiy SEM tahlili shuni ko'rsatadiki, kremniyni turli nodir yer elementlari bilan legirlashda har xil nuqsonlar va fazalar hosil bo'lish jarayonlari kuzatiladi. Bu jarayonlar atom radiuslaridagi farqlar, kimyoviy faollik va intermetallik birikmalar hosil qilishga moyillik bilan aniqlanadi. Ushbu farqlar olinadigan materialning kerakli tuzilishi va funksional xususiyatlariga qarab ma'lum bir nodir yer elementini tanlash zarurligini tasdiqlaydi.

SEM tasvirlarining tahlili (5- va 6-rasmlar) kremniy sirtining morfologiyasida termik ishlov berish va nodir yer elementlari oksidlarining diffuziyasidan so'ng sezilarli o'zgarishlar yuz berganini ko'rsatadi.

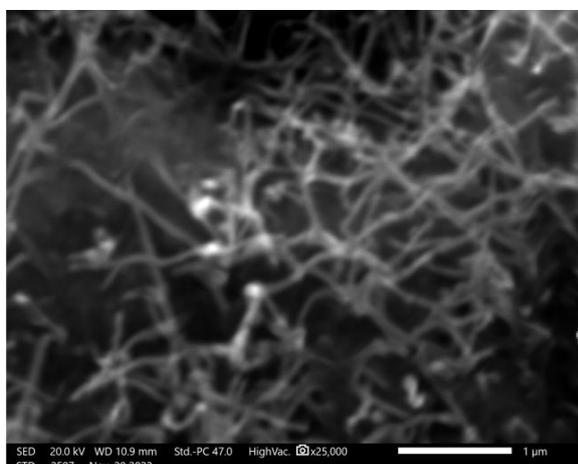
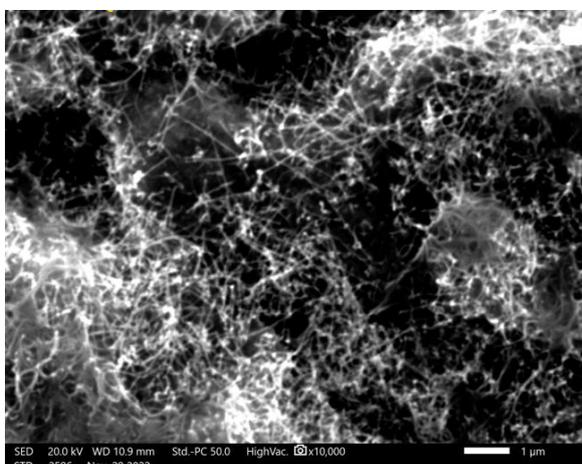


a)



b)

5-rasm. Kremniy tuzilmasining tasvirlari: (a) n-Si nazorat namunasi; (b) Er₂O₃-Si oksid qatlamidan diffuziyalanishdan keyingi namuna.

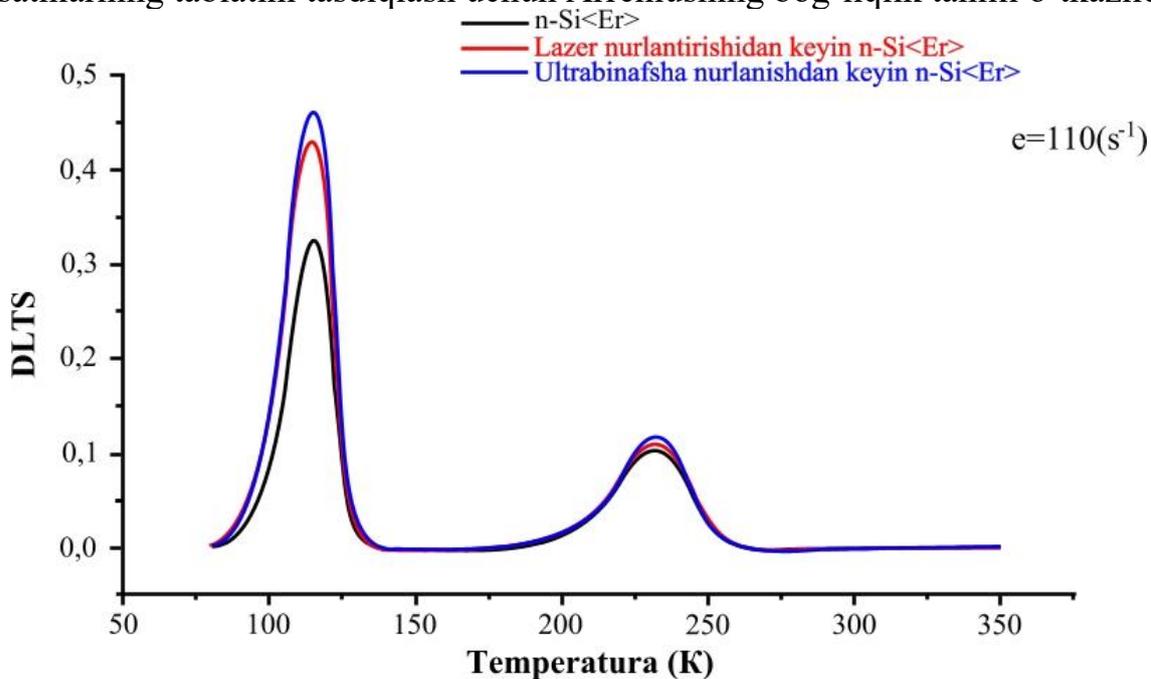


6-rasm. Yevropiy oksidi (Eu₂O₃) qatlamining kremniy bilan diffuziyasi natijasida hosil bo'lgan kremniy namunalari sirti morfologiyasi

Nazorat namunalarida bir necha mikron o'lchamli bo'laklarga ega bo'lgan "dag'al g'ovakli" relyef kuzatiladi. Bu relyef, ehtimol, ko'p bosqichli ishlov berish natijasida shakllangan. Taxminan 1100 marta kattalashtirilganda, yuza to'rsimon ko'rinish oladi. Bu holat qatlamning qisman "yemirilishi", diffuziya jarayonlari yoki oksid kirishmalarining hosil bo'lishini ko'rsatishi mumkin. Er₂O₃-Si qatlamining diffuziyasidan so'ng, sirt relyefi yanada notekis bo'lib, mahalliy orolsimon tuzilmalar va to'rsimon strukturalar paydo bo'ladi. Bu esa oksid plyonkalarining pishishi va yorilishi jarayonlari, shuningdek, silikat fazalarining shakllanishidan dalolat beradi. Umuman olganda, termik ishlov berish g'adir-budurlikning oshishiga, mikroyoriqlar va murakkab morfologik tuzilmalarning paydo bo'lishiga olib keladi. Bu esa kremniyda sezilarli strukturaviy o'zgarishlar sodir bo'lganini ko'rsatadi. Er₂O₃-Si tuzilmalarida yuqori haroratli ishlov berishdan oldin metallning to'liq oksidlanmasligi tufayli kremniy bilan chegarada Er konsentratsiyasi ortishi aniqlandi. 1200 °C haroratda ishlov berilgandan so'ng, Er ionlari kremniy tagligiga diffuziyalanib, konsentratsiyasi $12 \cdot 10^{19} \text{ sm}^{-3}$ dan yuqori bo'lgan sirt qatlamini hosil

qiladi. Bu ko‘rsatkich odatdagi diffuzion legirlash uchun xos bo‘lgan qiymatlardan sezilarli darajada yuqoridir.

DLTS usuli yordamida n-Si<Er> da faollanish energiyalari $E_c-0,18$ eV va $E_c-0,39$ eV bo‘lgan ikkita chuqur sath aniqlandi. Lazer va ultrabinafsha nurlanish kabi tashqi ta’sirlar DLTS signallarining amplitudasini oshirishi, mavjud tuzoqlar konsentratsiyasining ko‘payishini ko‘rsatishi ma’lum bo‘ldi. Aniqlangan sathlarning tabiatini tasdiqlash uchun Arreniusning bog‘liqlik tahlili o‘tkazildi.

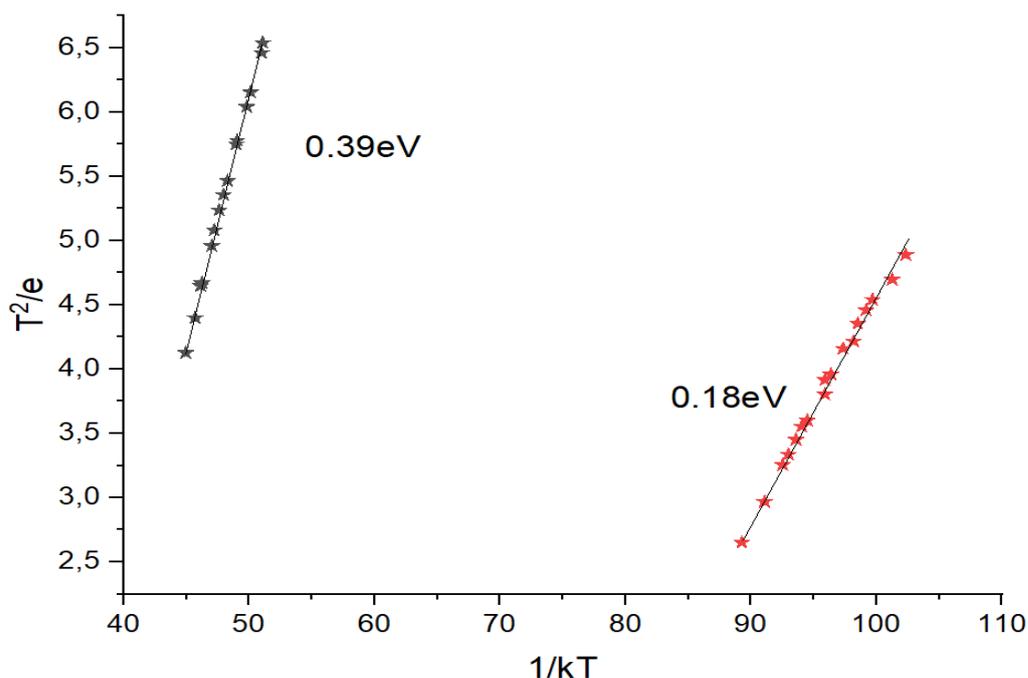


7-rasm. n-Si<Er> namunasining DLTS spektrlari

7-rasmda erbiy atomlari bilan legirlangan n-turdagi kremniy namunasi (n-Si<Er>) uchun uch holatdagi DLTS spektrlari keltirilgan: nurlanishdan oldin (qora egri chiziq), lazer nuri ta’siridan so‘ng (qizil egri chiziq) va ultrabinafsha nuri ta’siridan keyin (ko‘k egri chiziq). Har uchala spektrda kremniyning taqiqlangan zonasidagi chuqur sathlardan zaryad tashuvchilarning chiqishiga mos keladigan ikkita asosiy cho‘qqi yaqqol ko‘zga tashlanadi. Birinchi cho‘qqi past harorat sohasida (~ 110 K), ikkinchisi esa ~ 250 K atrofida joylashgan.

Tahlil shuni ko‘rsatdiki, boshlang‘ich holatda 110 K haroratdagi past haroratli cho‘qqi 0,30-0,35 nisbiy birlik atrofidagi amplitudaga ega ekan. Lazer nuri ta’siridan so‘ng amplituda taxminan 0,40 gacha ko‘tariladi, ultrabinafsha nur ta’siridan keyin esa maksimal qiymat 0,45 ga yetadi. Bunda maksimumning harorat holati deyarli o‘zgarmaydi. 250 K haroratdagi ikkinchi yuqori haroratli cho‘qqi ham nurlanishdan so‘ng kuchayadi: dastlabki holatdagi 0,09-0,10 dan lazer ta’siridan keyin 0,12 gacha va UB nurlanishidan so‘ng 0,13 gacha ortadi.

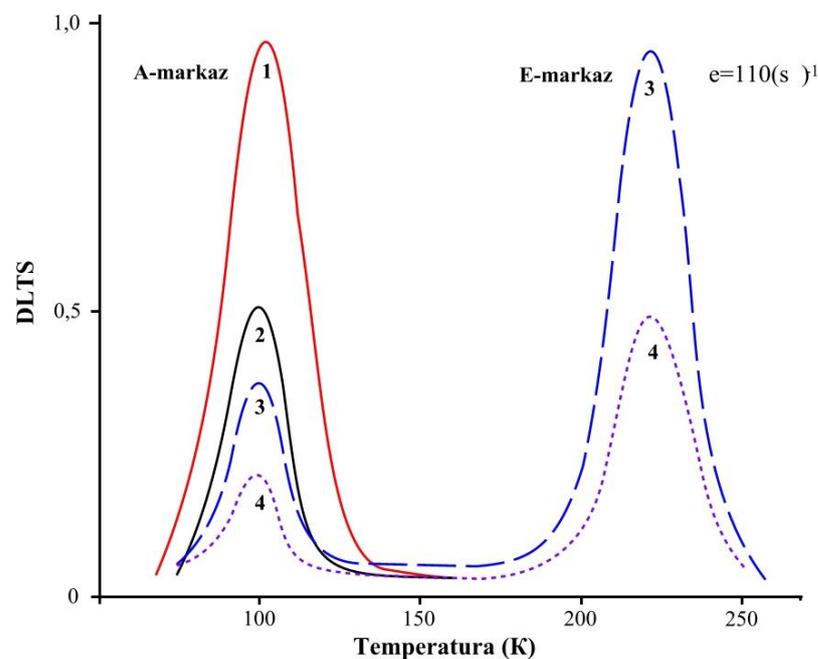
Ikkala cho‘qqining amplitudalari nurlanish ta’sirida, ayniqsa ultrabinafsha nurlanish holatida sezilarli darajada oshganligi aniqlandi. Bu esa yangi tuzoqlarning paydo bo‘lishini emas, balki mavjud tuzoqlarning konsentratsiyasi yoki to‘ldirilish darajasi ortganligini ko‘rsatadi.



8-rasm. T^2/e ning $1/kT$ ga bog‘liqlik grafigi

8-rasmda T^2/e ning $1/kT$ ga bog‘liqlik grafigi (Arrhenius grafigi deb ataladi) ko‘rsatilgan bo‘lib, u aniqlangan tuzoqlarning faollanish energiyalarini belgilash imkonini beradi. Yaqinlashtiruvchi to‘g‘ri chiziqlarning qiyaliklari asosida ikkita sath aniqlandi: ~ 110 K haroratdagi cho‘qqiga mos keladigan $E_c - 0,18$ eV faollanish energiyali sath va ~ 250 K haroratdagi cho‘qqiga mos keladigan $E_c - 0,39$ eV faollanish energiyali sath.

Bundan tashqari, lazer va ultrabinafsha nurlanish ta’sirlarining qiyosiy tahlili o‘tkazildi. Ultrabinafsha nurlanishning DLTS signallari amplitudalarini lazer nurlanishiga nisbatan ancha samarali kuchaytirishi aniqlandi. Bu, ehtimol, lazer nurlanishi mahalliy qizish va termomexanik ta’sir tufayli nuqsonlar konsentratsiyasini oshirishi, ultrabinafsha nurlar esa kimyoviy bog‘larni to‘g‘ridan-to‘g‘ri buzish va atomlarni ionlashtirish uchun yetarli energiyaga ega bo‘lib, qo‘shimcha nuqtaviy nuqsonlarni hosil qilishi yoki passiv komplekslarni faollashtirishi bilan bog‘liq. Cho‘qqilarning shakli (kengligi, simmetriyasi) deyarli o‘zgarmay qoladi, bu esa tuzoq turlarining saqlanib qolishini va yangi yaqin sathlar paydo bo‘lmasligini ko‘rsatadi. Demak, DLTS-signal amplitudasining o‘zgarishi yangi energetik sathlarning paydo bo‘lishi bilan emas, balki mavjud nuqsonli markazlar konsentratsiyasining miqdoriy ortishi bilan bog‘liq. Shunday qilib, DLTS-spektroskopiya n-Si<Er> tuzilmasining turli xil nurlanishlarga sezgirligini aniqlashga imkon berdi va nuqsonlarning tabiati hamda evolyutsiyasi haqida qimmatli ma’lumotlar taqdim etdi.



9-rasm. I guruh namunalari ($N_{opt}^0 \geq 10^{17} \text{ sm}^{-3}$) n-Si (1) va n-Si<Eu> (2), II guruh namunalari ($N_{opt}^0 \leq 10^{16} \text{ sm}^{-3}$) n-Si (3) va n-Si<Eu> (4) ^{60}Co γ -kvantlari bilan nurlantirilganidan keyin

Nostatsionar sig‘imli spektroskopiya usullari yordamida NYE kirishmalari bilan legirlangan kremniyning xossalariga nurlanishning ta‘sirini, xususan kremniydagi yevropiy va erbiy atomlarining xatti-harakatlarini o‘rganish natijalarini ko‘rib chiqamiz. Tadqiqot uchun tugunlararo kislorod miqdori turlicha bo‘lgan n-Si<Eu> namunalari foydalanildi: I guruh namunalari ($N_{opt}^0 \geq 10^{17} \text{ sm}^{-3}$) va II guruh namunalari ($N_{opt}^0 \leq 10^{16} \text{ sm}^{-3}$).

DLTS spektrlarini o‘lchash shuni ko‘rsatdiki, kremniyga diffuziya yo‘li bilan yoki o‘stirish jarayonida kiritilgan yevropiy atomlarining mavjudligi sezilarli miqdorda hech qanday chuqur sath hosil bo‘lishiga olib kelmaydi. Namunalarni nurlantirish jarayoni oqim intensivligi $3,4 \times 10^{12} \text{ kv} \cdot \text{sm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ bo‘lgan ^{60}Co manbai yordamida amalga oshirildi. Shu bilan bir vaqtda, turli N_{opt}^0 ga ega bo‘lgan yevropiy aralashmasiz boshlang‘ich Si nazorat namunalari ham nurlantirildi.

Har bir nurlanish bosqichidan so‘ng nurlanish natijasida hosil bo‘lgan chuqur sathlarning konsentratsiyasi va parametrlari o‘lchab chiqildi. 9-rasmda ^{60}Co dozasi $\Phi \sim 8 \times 10^{17} \text{ kv} \cdot \text{sm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ bilan nurlantirgan n-Si<Eu> namunalari tipik DLTS spektrlari keltirilgan (1-egri chiziq - I guruh namunalari $N_{opt}^0 = 8 \times 10^{17} \text{ sm}^{-3}$, 2-egri chiziq - II guruh namunalari $N_{opt}^0 = 2 \times 10^{16} \text{ sm}^{-3}$). DLTS spektrlarining tahlili shuni ko‘rsatdiki, nurlanish natijasida n-Si<Eu> (I partiya) namunalari ionlanish energiyasi $E_c - 0,17 \text{ eV}$ bo‘lgan yangi chuqur sath paydo bo‘ladi. Bu chuqur sathning parametrlari ma‘lum radiatsion nuqson - A-markaz (vakansiya-kislorod kompleksi) parametrlari bilan mos keladi. II partiya namunalari 2 ta yangi chuqur sath kuzatiladi: $E_c - 0,17 \text{ eV}$ va $E_c - 0,43 \text{ eV}$, bunda ikkinchisi ustunlik qiladi. Uning parametrlari boshqa ma‘lum radiatsion nuqson - E-markaz (vakansiya-fosfor kompleksi) parametrlari bilan mos keladi.

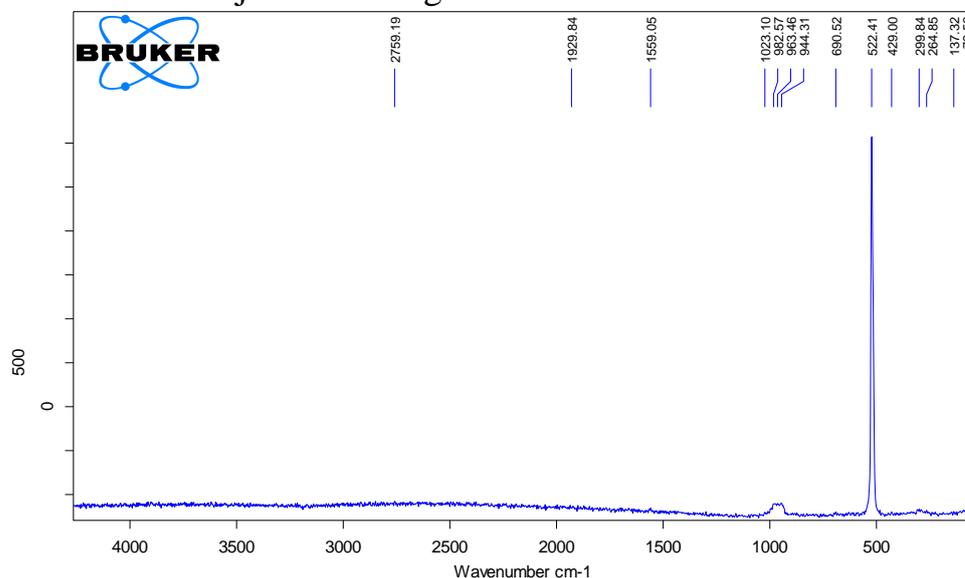
Yevropiy bilan legirlanmagan dastlabki kremniy namunalari ^{60}Co γ -kvantlari bilan nurlantirilganidan so‘ng o‘tkazilgan DLTS spektrlari tahlili shuni

ko'rsatdiki, bu namunalarda ham xuddi legirlangan namunalardagi kabi A- va E-markazlar hosil bo'ladi. Nurlantirilgan n-Si<Eu> da kuzatilgan sathlarning DLTS spektrlarini nazorat namunalardagi o'xshash bog'liqliklar bilan taqqoslash natijasida ma'lum bo'ldiki, tarkibida yevropiy mavjud bo'lgan namunalarda kiritilgan radiatsion nuqsonlarning konsentratsiyasi nazorat namunalariga nisbatan sezilarli darajada past. Demak, Si da Eu atomlarining mavjudligi radiatsion nuqsonlar hosil bo'lishi samaradorligini pasaytiradi. Bu effektini, ehtimol, Eu atomlarining nurlanish ta'sirida yuzaga keladigan nuqsonlar bilan o'zaro ta'sirlashish xususiyatlariga bog'lash kerak. Xuddi shunday holat ^{60}Co γ -kvantlari bilan $\Phi \sim 8 \times 10^{17} \text{ kv} \cdot \text{sm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ dozada nurlantirilgan Si<Er> namunalarda ham kuzatildi.

Yevropiy yoki erbiy bilan legirlangan kremniyda gamma-nurlanish natijasida hosil bo'ladigan radiatsion nuqsonlar konsentratsiyasi kamayishi aniqlandi. Bu esa Si<Eu> va Si<Er> asosidagi tuzilmalarning radiatsiyaga chidamliligini 2-3 barobar oshishiga olib keladi.

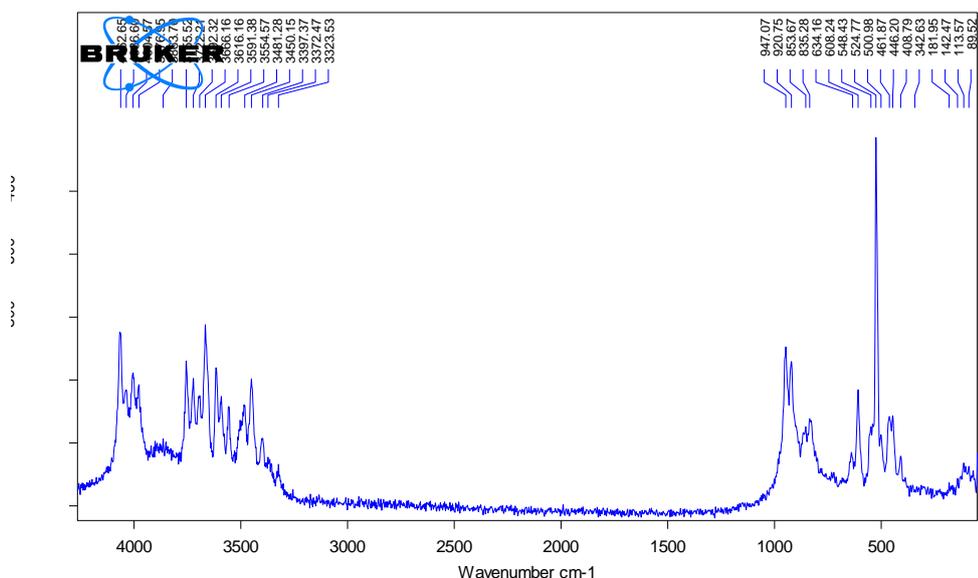
Olingan natijalar materialning radiatsion barqarorligini baholashda muhim ahamiyatga ega bo'lib, tashqi nurlanish sharoitida ishlashga mo'ljallangan yarim o'tkazgichli tuzilmalarni ishlab chiqishda foydalanilishi mumkin.

“Nodir yer elementlari bilan legirlangan kremniydagi nuqsonlar va fazaviy o'zgarishlarning spektroskopik tahlili” nomli to'rtinchi bobda Er va Eu atomlari bilan legirlangan kremniydagi nuqsonli va fazaviy o'zgarishlarning Raman spektroskopiyasi hamda rentgen mikrotahlili usullarini qo'llagan holda o'tkazilgan keng qamrovli tahlil natijalari keltirilgan.



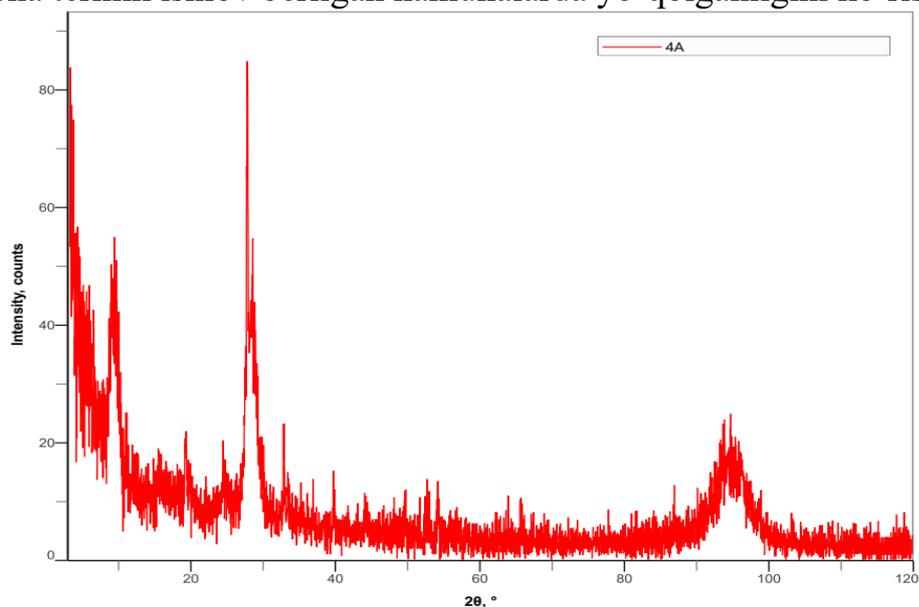
10-rasm. n-Si namunasining Raman tarqalish spektrlari

Si kristall panjarasiga Er atomlarining kiritilishi kremniyga xos modalar intensivligining pasayishiga va $60\text{-}280 \text{ sm}^{-1}$ sohada Er-Si hamda Er-O bog'lanishlariga xos tebranishlar bilan bog'liq yangi cho'qqilarning paydo bo'lishiga olib kelishi aniqlandi. Bu xususiyatlar panjaraning qisman buzilishini, shuningdek, oksid va silitsid fazalarining shakllanayotganini ko'rsatmoqda.



11-rasm. n-Si<Er> namunasining Raman spektrlari

n-Si (10-rasm) ning va n-Si-SiO₂<Er> (11-rasm) namunalarining KR spektrlari taqqoslanganda, yutilish chiziqlari holatining o'zgarganligini hamda 680 sm⁻¹ da yangi signal paydo bo'lganligini kuzatish mumkin. Bu chiziq ko'pincha silikat to'ridagi Si-O-Si bog'ining egilish modalariga xos hisoblanadi. Shunga ko'ra, legirlovchi erbiy ionlari to'rning mahalliy tuzilishi va bog'lovchi muhitidagi o'zgarishlar tufayli siljishlar va yangi chiziqlarning paydo bo'lishiga olib keladi, hamda ko'priqli bo'lmagan kislorod hosil qilish orqali to'r modifikatori vazifasini bajaradi. Olingan namunalarning KR spektrlari o'rganilganda, dastlabki n-Si (9) va uning asosida olingan n-Si-SiO₂<Er> (10) namunalarida 555 va 690 sm⁻¹ da kuzatilgan Er-O egilish tebranishlari va Si-O-Si egilish modalariga tegishli ikkita chiziq barcha termik ishlov berilgan namunalarda yo'qolganligini ko'rish mumkin.



12-rasm. Ochiq atmosferada (havoda) 3 soat davomida 1300 °C haroratda diffuziyaga uchratilgan n-Si<Er> namunasi; dastlabki sovutish - tezkor (toblash). Qo'shimcha termik ishlov: havoda 900 °C haroratda 5 soat davomida; sovutish - sekin.

Bunda Si-O bog‘lanish intensivligi bog‘larning zaifligi va kristall fazalar hosil bo‘lishiga moyilligi tufayli kamayadi. Shuni ta’kidlash joizki, erbiy ionlarining kristall tuzilishga kiritilishi Si-O bog‘larining tuzilishiga sezilarli ta’sir ko‘rsatmaydi, lekin ularning KR spektridagi joylashuvini o‘zgartiradi.

Rentgen mikrotahlili sirt osti qatlamida (10^{18} – 10^{19}) sm^{-2} oralig‘ida Er va Eu atomlarining sezilarli konsentratsiyalari mavjudligini tasdiqladi. Bu jarayon mahalliy boyish va fazaviy ajralish bilan kuzatildi. Tadqiqotlar shuni ko‘rsatdiki, Er bilan legirlangan namunalarda ErSi_{2-x} turidagi birikmalar shakllanadi. Eu bilan legirlangan tuzilmalarda esa kirishma atomlarining tartibli taqsimlanishi va nisbatan kamroq ifodalangan morfologik bir jinsli bo‘lmagan sohalar ustunlik qilishi aniqlandi.

Turli xil diffuziya va termik ishlov berish rejimlarda ishlov berilgan n-Si<Er> namunalarining qiyosiy rentgen-fazaviy tahlili atmosfera sharoitlari, sovitish tezligi va qo‘shimcha toblanish mavjudligiga qarab fazalarning shakllanish qonuniyatlarini aniqlashga imkon berdi (**1-jadval**).

1-jadval.

Turli xil termik ishlov berish usullaridan keyin n-Si<Er> namunalarining fazaviy tarkibini qiyosiy tahlil qilish

Namuna	Diffuziya va sovitish shartlari	Toblanish	Xos cho‘qqilar (2θ)	Fazalarni sharhlash
1	Ochiq muhit, sekin-asta	Yo‘q	$\sim 9,3^\circ, 28,4^\circ, 94,8^\circ$	Si + Er–Si–O
2	Vakuum, sekin	Yo‘q	$28,36^\circ, 28,70^\circ, 95,4^\circ$	Si + kuchlanishlar, Er kiritilishi
3	Ochiq muhit, tez	Yo‘q	$5,76^\circ, 9,44^\circ, 28,64^\circ$	Metastabil faza (Er–Si–O)
4	Xuddi shunday: 3 aylanish + 900°C , 5 soat	Ha	$9,34^\circ, 28,4^\circ$	Er–Si–O tizimining barqaror fazasi
5	Vakuum, tez	Ha	$9,5^\circ, 28,48^\circ, 94,6^\circ$	Er–Si–O fazasi qizdirish paytida

1-namunada (ochiq atmosfera sharoitida, sekin sovitish) oksid yoki silikat fazalarining hosil bo‘lishi kuzatiladi. Bu Er-Si-O tizimidagi birikmalarga xos bo‘lgan $\sim 9,3^\circ$ burchak ostida qo‘shimcha cho‘qqining paydo bo‘lishida o‘z aksini topadi.

2-namunada (vakuum, sekin sovitish) past burchakli akslanishlar kuzatilmaydi, bu kislorod mavjud fazalarning yo‘qligini tasdiqlaydi, biroq kremniy cho‘qqilarining parchalanishi kuzatiladi, bu esa ichki kuchlanishlar va Er atomlarining kirib qolish ehtimolini ko‘rsatadi.

3-namunada (ochiq atmosfera, tez sovitish) $5,76^\circ$ burchak ostida aniq ifodalangan cho‘qqi aniqlandi, bu katta panjarali metastabil fazaga ($d \approx 15,3 \text{ \AA}$) mos

keladi va keskin sovutish natijasida “muzlatib qo‘yilgan” beqaror tuzilmalar uchun xosdir.

4-namunada (900 °C haroratda qo‘shimcha qizdirish 3A, havo muhitida) 5,76° burchak ostidagi beqaror cho‘qqining yo‘qolishi va 9,34° burchak ostida barqaror refleksning paydo bo‘lishi aniqlandi, bu metastabil fazaning yanada barqaror oksid/silikat shakliga strukturaviy qayta tuzilishini tasdiqlaydi.

5-namunada (vakuumli diffuziya + havoda toblanish) oksidlanish belgilari kuzatilmaydi, biroq ikkilamchi ishlovdan so‘ng ~9,5° da cho‘qqi qayd etiladi, bu ham toblanish bosqichida kislorod ishtirokida fazalarning shakllanganligini ko‘rsatadi.

Shunday qilib, Er-Si-O turidagi fazalarning shakllanishi diffuziya bosqichida emas, balki kislorodli muhitda keyingi issiqlik ishlovi berish jarayonida sodir bo‘ladi. Tez sovitishda hosil bo‘ladigan beqaror fazalar 900 °C haroratda 5 soat davomida barqaror birikmalarga aylanishi mumkin. $2\theta \approx 9,3-9,5^\circ$ oralig‘idagi xarakterli cho‘qqining mavjudligi shunday barqaror fazalarning ko‘rsatkichi hisoblanadi.

Spektroskopiya va mikroanaliz ma’lumotlarining uyg‘unlashtirilishi natijasida nodir yer elementlari kirishmalarining kremniy panjarasi bilan o‘zaro ta’sirini aniqlash hamda fazaviy o‘zgarishlar va nuqsonlar hosil bo‘lishining spektroskopik belgilarini qayd etish imkoniyati yaratildi. Bu esa, o‘z navbatida, belgilangan funksional xususiyatlarga ega bo‘lgan kremniy tuzilmalarini keyingi ishlanmalari uchun muhim ahamiyat kasb etadi.

XULOSA

Ushbu ishning asosiy natijalari quyidagilardan iborat:

1. Ilk bor Er₂O₃ oksid qatlami orqali Er atomlarini va Eu₂O₃ oksid qatlami orqali Eu atomlarini legirlashning optimallashtirilgan texnologiyasi ishlab chiqildi. Bu texnologiya natijasida faol nodir yer atomlarining konsentratsiyasi $(1-2) \times 10^{20} \text{ sm}^{-3}$ bo‘lgan sirtga yaqin p⁺ qatlamlari hosil bo‘ladi. Bu ko‘rsatkich an’anaviy (oksidsiz) diffuzion legirlashga nisbatan besh barobar yuqoridir.

2. Kremniyni erbiy va yevropiy bilan legirlash jarayonida kislorodning qisman o‘rin almashinuvi va Er-O bog‘larining hosil bo‘lishi tufayli tugunlararo optik faol kislorod konsentratsiyasi 35-40% ga kamayishi aniqlandi. Bu esa o‘z navbatida kislorod markazlarining optik faolligini pasaytiradi.

3. Ilk bor kremniyning asosiy cho‘qqisi (520 sm^{-1}) saqlanib qolgan holda 60-280 sm^{-1} (Er-Si bog‘lari) va 900-1100 sm^{-1} (Er-O va Si-O) polosalar qayd etildi. Bunda 521 va 304 sm^{-1} chiziqlarning holati va yarim kengligining o‘zgarishi legirlashdan so‘ng mahalliy deformatsiyalar va nuqsonlar darajasining oshganligini ko‘rsatadi.

4. ASM n-Si ning o‘rtacha kvadratik g‘adir-budurligining 25.3 nm dan 47.1 nm gacha o‘sganini va Er diffuziyasidan so‘ng nanorelef (20-300 nm) paydo bo‘lganini aniqladi. Bu kirishmalarning klasterlanishini tasdiqlaydi hamda sirt fazalarida O va C miqdorining oshganligi haqidagi SEM va EDS ma’lumotlari bilan muvofiq keladi.

5. Olingan natijalar Si da yuqori faol, issiqlikka chidamli va radiatsiyaga bardoshli Er^{3+} lyuminessent markazlarni hamda past to'siqli metall-yarimo'tkazgich o'tishlarni shakllantirish mumkinligini ko'rsatmoqda.

6. Uzoq muddatli lazer ta'siri erbiy atomlarining qo'shimcha faollashuviga va Si<Er> asosidagi diod strukturalarining yorug'likka sezgirligining ortishiga olib kelishi aniqlandi.

7. Yevropiy va erbiy bilan legirlangan kremniyda gamma-nurlanish natijasida hosil bo'ladigan radiatsion nuqsonlar konsentratsiyasi kamayishi aniqlandi. Bu esa Si<Eu> va Si<Er> asosidagi strukturalarning radiatsiyaga chidamliligini 2-3 baravar oshiradi.

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

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

ЗАРИФБАЕВ ЖАСУР ШАВКАТОВИЧ

**ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ НА ДЕФЕКТНУЮ СТРУКТУРУ
КРЕМНИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО ЭРБИЕМ И ЕВРОПИЕМ**

01.04.10 – Физика полупроводников

**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 Кабинете Министров Республики Узбекистан за B2023.4.PhD/FM595

Диссертация выполнена в научно-исследовательском институте физики полупроводников и микроэлектроники при Национальном Университете Узбекистана

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

Научный руководитель: Хамдамов Жонибек Жумаевич
PhD по физико-математическим наукам, с.н.с.

Официальные оппоненты: Отажонов Салим Мадрахимович
доктор физико-математических наук, профессор
Аюпов Кутуп Саутович
доктор физико-математических наук, профессор

Ведущая организация: Наманганский государственный технический университет

Защита диссертации состоится 19.09 2025 года в 12⁰⁰ часов на заседании Научного совета DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 по присуждению ученых степеней при Научно-исследовательском институте Физики полупроводников и микроэлектроники Национального университета Узбекистана (Адрес: 100057, Узбекистан, г. Ташкент, ул. Янги Алмазар, дом 20. Тел: (+99871) 248-79-94, факс (+99871) 248-79-92, e-mail: info@ispm.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре института (зарегистрирована за № 70) по адресу: 100057, Узбекистан, г. Ташкент, ул. Янги Алмазар, дом 20. Тел: (+99871) 248-79-92.

Автореферат диссертации разослан « 06 » 09 2025 г.
(реестр протокола рассылки № 70 от 06.09 2025 г.).



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

О.Х.Кулдашов
Ученый секретарь Научного совета
по присуждению ученых степеней, д.т.н., профессор

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

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации.

В мире проводятся широкомасштабные научные исследования по созданию новых полупроводниковых материалов с высокими функциональными, стабильными и воспроизводимыми электрофизическими свойствами, а также по их применению в устройствах, способных стабильно работать под воздействием различных внешних факторов, таких как температура, излучение и механическое воздействие. Одним из приоритетных направлений научных центров и престижных высших учебных заведений развитых стран является исследование полупроводников с новым составом и структурами, существенно отличающимися от классических полупроводниковых материалов, а также углубленное изучение их физических свойств. В частности, образцы монокристаллического кремния, легированного примесными атомами, создающими глубокие энергетические уровни в запрещенной зоне - особенно элементами из группы редкоземельных, такими как эрбий (Er) и европий (Eu), рассматриваются как перспективный материал в современных полупроводниковых технологиях. В структуре кремния, легированного этими элементами, благодаря активированным центрам дефектов, ионам, замещающим узлы решетки, и их комплексам наблюдаются новые физические явления, ранее не наблюдавшиеся в физике полупроводников, такие как фотолюминесценция, магнитооптические эффекты, самоформирующиеся силициды с низким потенциальным барьером. Это открывает возможности их применения в опто- и микроэлектронике, в частности, при создании датчиков, оптических усилителей, лазеров и квантовых устройств.

В настоящее время в ведущих научных центрах мира большое внимание уделяется научным исследованиям по изучению дефектов, образующихся в кремнии на основе примесей редкоземельных элементов, их физических свойств, а также влияния на них внешних факторов. С этой точки зрения, глубокое изучение пространственной конфигурации дефектных структур, формирующихся в кремнии, легированном эрбием и европием, их энергетического положения, устойчивости к внешним факторам и трансформации является одной из актуальных задач.

В Республике Узбекистан в последние годы достигнуты значительные научные успехи в изучении физических явлений, наблюдаемых в полупроводниковых материалах, определении их механизмов и применении в качестве практических устройств. В Постановлении Президента Республики Узбекистан от 19 марта 2021 года № ПП-5032 «О мерах по повышению качества образования и совершенствованию научных исследований в области физики» отмечены задачи «...обеспечение неразрывной связи научных исследований в области физики с производством, расширение масштаба научных работ, направленных на решение проблем в отраслях экономики;

повышение результативности и практического значения научных исследований и инновационной деятельности»¹.

В этом направлении создание полупроводниковых приборов с новыми функциональными возможностями, требующих малого энергопотребления, позволяет экономить энергию и снижать себестоимость.

Данное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в Указах Президента Республики Узбекистан №УП-60 от 28 января 2022 года «О стратегии развития нового Узбекистана на 2022-2026 годы»², и № УП-6097 от 29 октября 2020 года «Об утверждении концепции развития науки до 2030 года»³, Постановлениях Президента Республики Узбекистан № ПП-5011 от 3 февраля 2021 года «О дополнительных мерах по дальнейшему развитию электротехнической промышленности и повышению конкурентоспособности отечественной продукции»⁴, в Постановление Президента Республики Узбекистан №ПП-57 от 16 февраля 2023 года «О мерах по ускорению внедрения возобновляемых источников энергии и энергосберегающих технологий в 2023 году»⁵, а также в Постановлении № 639 «О мерах по укреплению Научно-исследовательского института физики полупроводников и микроэлектроники при Национальном университете Узбекистана имени Мирзо Улугбека».

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологии республики. Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологии Республики Узбекистан III-3 «Энергетика, энерго – и ресурсосбережение, транспорт, машина – и приборостроение, развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники и электронного приборостроения».

Степень изученности проблемы. В последние годы углубленное изучение системы дефектов, возникающих под воздействием внешних факторов в полупроводниковых материалах, в частности, в кремниевых структурах, легированных редкоземельными элементами, привлекает внимание ученых и специалистов.

Зарубежные ученые достигли значительных результатов в области легирования кремния редкоземельными элементами. В 1984 году Х. Эннен (Германия), используя метод молекулярно-лучевой эпитаксии, впервые наблюдал фотолюминесценцию в диапазоне 1,54 мкм на диодах на основе легированного кремний-эрбия (Er-Si). В 1995 году Хоммерикс (США)

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

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

³ Указ Президента Республики Узбекистан № УП-6097 от 29 октября 2020 года «Об утверждении концепции развития науки до 2030 года».

⁴ Постановление Президента Республики Узбекистан № ПП-5011 от 3 февраля 2021 года «О дополнительных мерах по дальнейшему развитию электротехнической промышленности и повышению конкурентоспособности отечественной продукции».

⁵ Постановление Президента Республики Узбекистан №ПП-57 от 16 февраля 2023 года «О мерах по ускорению внедрения возобновляемых источников энергии и энергосберегающих технологий в 2023 году».

экспериментально доказал, что пористая структура кремния увеличивает интенсивность фотолюминесценции ионов Er^{3+} в четыре раза, научно обосновав активирующую роль морфологии нанослоев. В 2008 году Nicolas Reckinger и др. (Бельгия) достигли наименьшего значения барьера Шоттки - $\Phi_B \approx 0,28$ эВ в контактах $\text{ErSi}_{2-x}/n\text{-Si}$, синтезированных под слоем титана. Это открыло новые перспективы применения силицидов в технологии СМОС (металл-оксид-полупроводник на основе Шоттки).

В 1970-1980-х годах российскими учеными из Ленинградского ФТИ (Иоффе), в том числе А.А. Лебедевым и другими, был выполнен ряд работ по переходным и редкоземельным элементам, кислородной преципитации и вакансионным металлическим комплексам. Большинство статей по этим исследованиям были опубликованы в журнале «Физика и техника полупроводников».

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного или научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в рамках проектов научных исследований Национального университета Узбекистана и Научно-исследовательского института физики полупроводников и микроэлектроники при Национальном университете Узбекистана в соответствии с тематическими планами грантов Агентства по науке и технологиям Республики Узбекистан: ЁФ-2-08 «Изучение влияния радиации на образование и отжиг дефектов в кремнии и кремниевых многослойных структурах с примесями редкоземельных элементов» (2010-2011 гг.) и МУ-ФЗ-20171025461 «Электрофизические характеристики и свойства кремниевых МДП-структур с оксидами лантана, гадолиния и европия в качестве диэлектрика» (2018-2019 гг.). ОТ-ФЗ-11 «Исследование закономерностей формирования наноразмерных дефектов в приповерхностных слоях и объеме кремния с примесями d-элементов» (01.01.17-31.12.20 гг.) и П-652207792. «Создание высокоэффективных кремниевых структур со стабильными параметрами на основе анализа оптических, емкостных и резонансных свойств полупроводников с различными глубокими уровнями» (2023-2025 гг.).

Целью исследования является комплексное изучение дефектной структуры кремния, легированного эрбием и европием, а также исследование влияния внешних факторов на дефектный состав кремния, легированного эрбием (Er) и европием (Eu).

Задачи исследования:

разработать физико-химические аспекты и технологию легирования кремния примесями эрбия и европия;

исследовать электрофизические свойства образцов Si, легированных примесями эрбия и европия диффузионным путем;

изучить дефектную структуру кремния с примесями эрбия и европия с помощью методов рамановской и рентгеновской спектроскопии;

определить энергетический спектр глубоких центров, создаваемых примесями эрбия и европия и идентифицировать их;

изучить влияние технологических факторов на структуру и морфологию дефектов, эффективность и образования глубоких центров, создаваемых примесями эрбия и европия в кремнии.

Объектом исследования является монокристаллический кремний, выращенный методом Чохральского и легированный примесями редкоземельных элементов - эрбием и европием.

Предметом исследования являются физико-химические процессы формирования и развития дефектных комплексов и глубоких уровней в монокристаллическом кремнии, легированном атомами эрбия и европия, а также обусловленные ими изменения морфологических, оптических и электрофизических характеристик материала под действием внешних факторов

Методы исследования. В качестве объектов исследования использовались монокристаллы кремния Si(100), легированные атомами эрбия (Er) и европия (Eu). Для анализа морфологии поверхности и распределения примесей применялись методы сканирующей электронной микроскопии (SEM) и энергодисперсионной спектроскопии (EDS), а также атомно-силовой микроскопии (AFM). Фазовый состав и параметры кристаллической решётки определялись с помощью рентгеновской дифракции (XRD). Для изучения колебательных мод и химических связей использовались методы Рамановской и Фурье-инфракрасной (ИК) спектроскопии. Электрофизические характеристики, включая спектр глубоких уровней, определялись методом четырёхзондовых измерений и глубинно-уровневой транзитной спектроскопии (DLTS).

Научная новизна исследования заключается в следующем:

впервые установлено, что образование связей Er-O в кремнии, легированном эрбием, приводит к уменьшению концентрации оптически активного междоузельного кислорода на 35-40% и снижению оптической активности кислородных центров;

впервые в кремнии, легированном эрбием, обнаружены две новые инфракрасные колебательные моды при 495 и 848 см⁻¹, что подтверждает образование связей Er-O;

показано, что в результате диффузии в кремний через оксидные слои Er и Eu образуются приповерхностные p⁺ слои, в которых концентрация атомов активных редкоземельных элементов составляет $(1 \div 2) \times 10^{20}$ см⁻³;

установлено, что длительное лазерное облучение дополнительно активизирует центры эрбия и увеличивает значение тока в диодных структурах на основе Si<Er> до 25 раз при температуре 77 К;

установлено, что в кремнии, легированном европием, уменьшается количество дефектов, образующихся в результате радиации, и повышается радиационная стойкость структур Si<Eu> в 2-3 раза.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

на комплексной основе разработаны технологические параметры для диффузионного внедрения редкоземельных элементов в монокристаллический кремний на основе оксидов Er_2O_3 и Eu_2O_3 . Предложенный режим позволил стабильно формировать легированные p^+ -слои с концентрацией до $(1-2) \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ в приповерхностных областях, что создало функциональную основу для высокоточковых диодов и мощных сверхвысокочастотных устройств;

В качестве надежных диагностических маркеров, позволяющих определить присутствие ионов эрбия в кристаллической решетке на основе ИК-спектроскопии, охарактеризованы колебательные пики на частотах 495 см^{-1} и 848 см^{-1} . В результате исследований экспериментально обосновано, что снижение концентрации оптически активного междуузельного кислорода на 35-40% и формирование связей Er-O приводит к уменьшению фонового поглощения и повышению внутренней квантовой эффективности инфракрасных излучателей на основе $\text{Si}\langle\text{Er}\rangle$;

установлено, что внедрение ионов Eu в структуру кремния повышает устойчивость материала к радиационным дефектам, что открывает возможности применения полупроводниковых детекторов на основе $\text{Si}\langle\text{Eu}\rangle$ в условиях без дополнительной радиационной защиты - в частности, в космической и ядерной средах.

Достоверность результатов исследования обеспечена современными высокоточными измерительными приборами и устройствами (система DLTS, сканирующий электронный микроскоп EVO 15, ИК-спектроскоп FSM-2201, а также рамановский спектрометр SENTERRA II (Bruker, Германия)). При анализе морфологии, структуры и электрофизических свойств образцов кремния, легированного редкоземельными элементами - Er и Eu, применялись независимые друг от друга экспериментальные методы, а эксперименты повторялись несколько раз. Полученные научные результаты подтверждены независимыми измерениями и сопоставлением с передовой научной литературой. Достоверность результатов исследования также подтверждается тем, что основные научные выводы опубликованы в научных журналах, а предложенные в диссертационной работе физические модели полностью соответствуют теоретическим основам физики полупроводников.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Результаты данного исследования существенно обогатили имеющиеся научные представления о химических и структурных изменениях, возникающих в процессе диффузионного внедрения редкоземельных элементов Er и Eu в кристаллическую решетку кремния. Впервые экспериментально установлено образование устойчивых связей Er-O и Eu-O в результате частичного замещения атомов кислорода в группах Si-O-Si атомами Er и Eu, что достоверно подтверждено соответствием их характерным колебательным модам в инфракрасном диапазоне - 495 и 848 см^{-1} . Выявленная количественная корреляция интенсивности этих мод с оптической

активностью материала раскрывает прямую связь между локальными структурными изменениями в кремнии и поглощением фотонов.

Практическая значимость результатов исследования заключается в разработке технологии формирования приповерхностных p^+ слоев с высокой проводимостью в кремнии путем диффузии атомов Er и Eu на основе полученных экспериментальных данных. Такие слои позволяют значительно повысить эффективность мощных диодов и сверхвысокочастотных устройств. Таким образом, результаты данного исследования предлагают инновационные решения в технологии полупроводниковых устройств и демонстрируют широкий практический потенциал в области систем передачи информации и сенсорной электроники.

Внедрение результатов исследования.

На основе исследования процессов влияния внешних факторов на дефектную структуру кремния, легированного эрбием и европием:

Разработан метод формирования p^+ -слоев с концентрацией $(1 \div 2) \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ в приповерхностной области кристалла кремния с использованием диффузионной технологии, основанной на оксидах Er_2O_3 и Eu_2O_3 . Данное технологическое решение позволило создать относительно однородный легированный слой в приповерхностной области кремния, и этот метод был внедрен в технологию производства диодов и частотных устройств в акционерном обществе «ФОТОН» (согласно справке АО «ФОТОН» № 13 от 30 апреля 2025 г.). Формирование высококонцентрированных p^+ -слоев обеспечило стабильность и требуемые электрофизические рабочие параметры диодных и транзисторных структур на основе $\text{Si}\langle\text{Er}\rangle$ и $\text{Si}\langle\text{Eu}\rangle$. Это позволило увеличить срок службы экспериментальных образцов на 20%.

Практические результаты, полученные в ходе исследования, такие как повышение фоточувствительности за счет дополнительно активированных лазерным излучением атомов эрбия и повышение устойчивости к облучению посредством атомов европия, были использованы в Ташкентском государственном техническом университете имени Ислама Каримова при выполнении проекта ОТ-Ф2-55 «Разработка научных основ получения объёмно-структурированного кремния путём формирования нанокластеров примесных атомов как нового класса наноматериалов с функционально-расширенными возможностями» (Справка Министерства высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан № 02/02-1233 от 1 мая 2025 г.). Использование результатов диссертации создало научную основу для формирования примесных нанокластеров в кремнии. Это открыло возможности получения наноматериалов с новыми функциональными свойствами для опто- и микроэлектроники.

Апробация результатов исследования. Результаты диссертационной работы были представлены и обсуждены на 5 международных и 8 республиканских научно-практических конференциях.

Публикации результатов исследований. Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 13 научных работах, 5 из них опубликованы

в научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных работ, в том числе 3 статьи в зарубежных международных журналах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы. Объем диссертационной работы, включая 35 рисунков, 2 таблиц, составляет 115 страниц текста.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении диссертационной работы обоснованы актуальность и практическая значимость выбранной темы, раскрыта её связь с приоритетными направлениями развития науки и технологий в Республике Узбекистан. Приведён подробный обзор современных международных исследований по рассматриваемой проблеме, охарактеризована степень её изученности. Чётко сформулированы цели и задачи исследования.

В первой главе **«Физико-химическое поведение редкоземельных элементов в кремнии»** представлен обзор современных исследований, посвящённых легированию кремния редкоземельными элементами, в частности эрбием (Er) и европием (Eu). Рассмотрены физико-химические особенности их внедрения в решётку кремния, включая 4f-люминесценцию, формирование Er–O комплексов, а также механизмы дефектообразования при имплантации и термообработке.

Проанализированы электрофизические и оптические свойства Si:Er и Si:Eu, включая влияние температуры, дозы, оксидных покрытий и внешних факторов на эффективность эмиссии. Показано, что комбинированное легирование и структурные модификации поверхности позволяют повысить стабильность и функциональность образцов для оптоэлектроники.

На основе проведённого анализа сформулированы задачи диссертационного исследования, направленные на разработку технологии легирования Si примесями Er и Eu, исследование их влияния на дефектную структуру, электрофизические параметры и характеристики глубоких уровней.

Во второй главе **«Технологические процессы изготовления образцов и методика экспериментальных исследований»** изложены методика диффузионного легирования кремния редкоземельными элементами (эрбием и европием) и технологии изготовления исследуемых структур. Приведены особенности подготовки кремниевых подложек, формирования оксидных плёнок, проведения термической обработки и удаления поверхностных слоёв. Рассмотрены условия формирования многослойных систем и взаимодействия примесей с кристаллической решёткой кремния.

Подробно описаны технологические процессы изготовления диффузионных и сплавных диодных структур, включая параметры легирования, построение контактной системы и моделирование термических воздействий. Изложены основы исследования состояния глубоких уровней

методом DLTS, включая принципы регистрации переходных процессов и построения спектров.

Описаны методики исследования морфологии образцов с использованием сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и энергодисперсионного анализа (EDS), а также методы регистрации спектров ИК-поглощения и комбинационного рассеяния (Раман-спектроскопия). Приведены условия проведения рентгенофазового анализа для идентификации вторичных фаз.

В третьей главе «Влияние атомов Er и Eu на процессы дефектообразования в кремнии» представлены результаты исследования процессов образования дефектов в кремнии, легированном редкоземельными элементами - эрбием и европием. С использованием ИК-спектроскопии установлено снижение интенсивности колебаний Si–O–Si после легирования Er, что связано с перераспределением кислорода и формированием Er–O связей.

Полученные образцы использованы в последующих исследованиях дефектной структуры, распределения примесей и формирования люминесцентных центров в кремнии, легированном редкоземельными элементами.

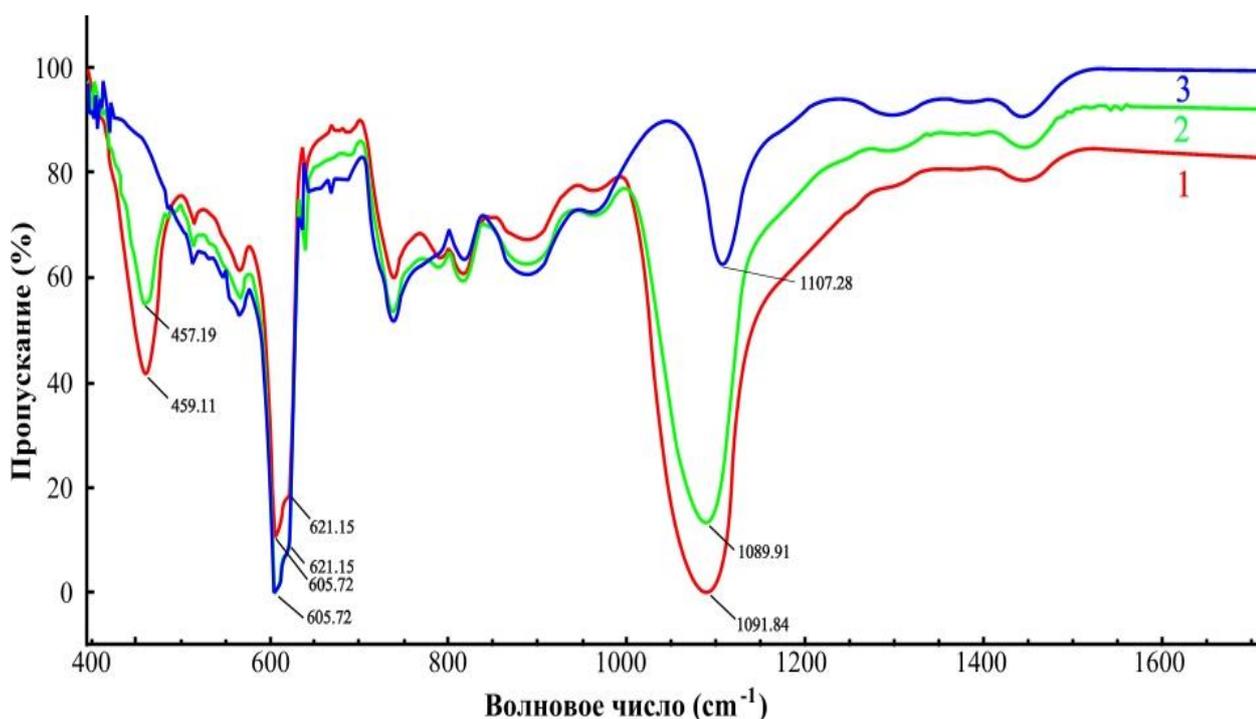


Рис.1 Спектры ИК- поглощения контрольного образца n-Si.

1 - слой оксида на n-Si, 2 - слой оксида частично очищен с поверхности n-Si, 3 - слой оксида полностью удален с поверхности n-Si.

Во всех образцах с толщиной оксидного слоя более 5–15 нм наблюдается интенсивная полоса в области 1080–1100 см⁻¹, соответствующая асимметричным колебаниям Si–O–Si. Положение и полуширина этой полосы зависят от

степени окисления и возможной нестехиометрии оксида кремния (SiO_x , $1 \leq x \leq 2$). В наших экспериментах при увеличении температуры отжига эта полоса сдвигалась в область $1100\text{--}1110\text{ см}^{-1}$, что свидетельствует об уплотнении оксида и увеличении его стехиометричности.

Экспериментальные данные показывают (рис.1), что ИК-спектры в диапазоне $380\text{--}1700\text{ см}^{-1}$ двух групп образцов кремния с плотной оксидной пленкой ($\sim 150\text{ нм}$) и после частичного травления оксида демонстрируют характерные особенности. Интенсивная полоса при $\sim 1100\text{ см}^{-1}$ соответствует асимметричным валентным колебаниям связи Si-O-Si, её амплитуда уменьшается при удалении оксидного слоя. В области $450\text{--}470\text{ см}^{-1}$ наблюдается маятниковое колебание Si-O-Si (rocking-мода). Небольшие пики при 605 и 621 см^{-1} (в) указывают на примеси углерода (C) и бора (B), что может быть связано с особенностями исходного кремния или условий его роста.

Обнаружено, что легирование Si эрбием (рис.2) по сравнению с исходным образцом Si (рис.1), приводит к заметному снижению амплитуды полосы в диапазоне $1090\text{--}1110\text{ см}^{-1}$. Количественная оценка площади этой полосы показала уменьшение содержания оптически активного кислорода (Si-O-Si) на $35\text{--}47\%$. Это обусловлено взаимодействием Er с O, в результате которого Er замещает часть O в связях Si-O-Si, формируя связи Er-O. Предположительно, это связано с образованием мелких кластеров Er_2O_3 и смешанных фаз Er-O-Si.

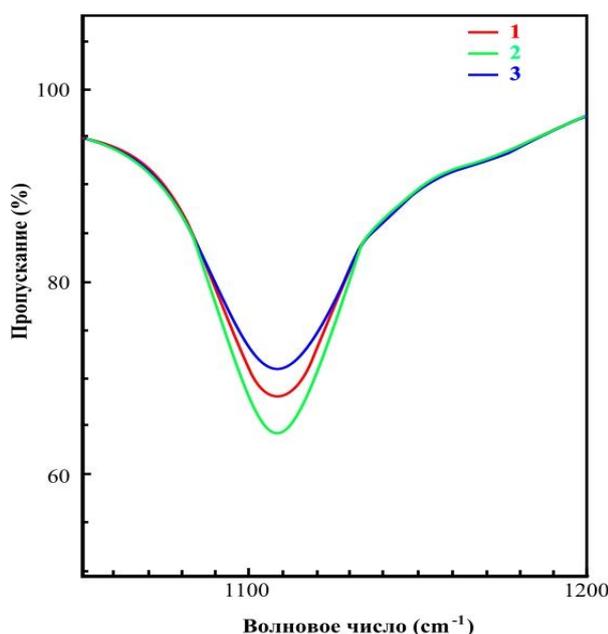


Рис. 2. Спектры ИК-поглощения образцов $n\text{-Si}\langle\text{Er}\rangle$.

1 — исходный кремний, $n\text{-Si}$, 2 — контрольный, $n\text{-Si}$, 3 — легированный, $n\text{-Si}\langle\text{Er}\rangle$.

Предполагается, что при отжиге в присутствии Er кислород из SiO_2 частично перераспределяется, образуя связи Er-O. В результате уменьшается количество доступных групп Si-O-Si, что снижает оптическую активность кислорода в кремниевой матрице. Возможно также формирование силикатов Er-Si-O или нанодисперсных включений Er_2O_3 .

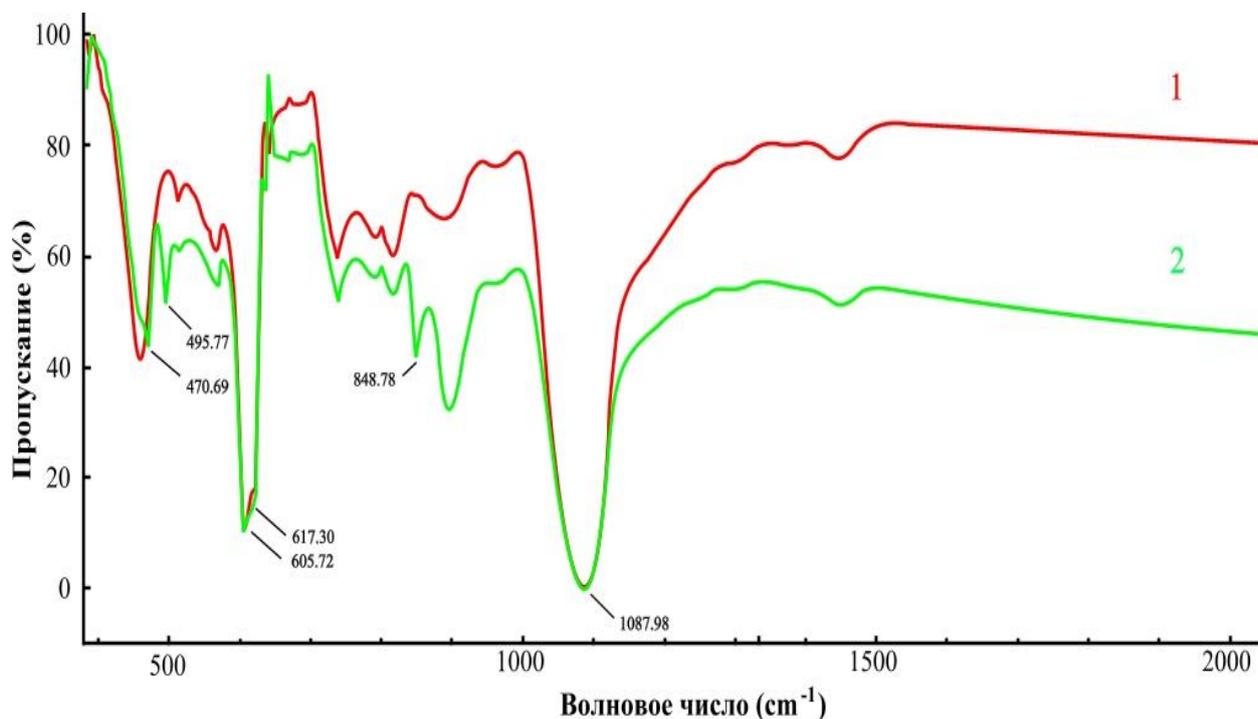


Рис.3. Спектры ИК- поглощения образцов n-Si, легированных Er.

1 — контрольный кремний n-Si, 2 — легированный кремний n-Si<Er> (медленное охлаждение)

В данном случае изображены образцы без примесей, и можно утверждать, что в образцах с окисляющим слоем наблюдается дополнительный пик. Пики расположены на 457 см^{-1} , 605 см^{-1} , 621 см^{-1} , 1090 см^{-1} и 1107 см^{-1} . На 457 см^{-1} наблюдается деформация связи Si-O на поверхности, на 842 см^{-1} — изгиб связи Si-O, а на 1107 см^{-1} — растяжение связи Si-O-Si. Пик на 605 см^{-1} соответствует связи Si-C.

На рисунке 3. также можно наблюдать два дополнительных пика, расположенных на 495 см^{-1} и 848 см^{-1} , которые соответствуют связи Er-O. Эти пики возникают только в образцах, легированных эрбием, и не присутствуют в контрольных образцах. ИК-спектроскопия позволяет выявить химические компоненты и их колебания на поверхности. Однако два типа связей, один из которых связан с кремнием, не могут быть определены с помощью ИК-спектроскопии, так как они полностью покрыты эрбием, который присутствует в образцах как примесь.

Показано, что введение Er приводит к формированию комплексов Er-O и нанофаз оксидов и силикатов в приповерхностной области, а также к заметным морфологическим изменениям поверхности, выявленным методами АСМ и СЭМ.

Атомно-силовая микроскопия (АСМ) показывает (рис. 4.), что образец n-Si<Er> демонстрирует еще более выраженный рельеф с остроконечными выступами. Максимальная амплитуда по оси Z составляет $\sim 47,1\text{ нм}$, что формально ниже, чем у термически обработанного кремния ($\sim 64,4\text{ нм}$). Однако

визуально пики выглядят более концентрированными и плотными, что свидетельствует об усилении неровностей поверхности.

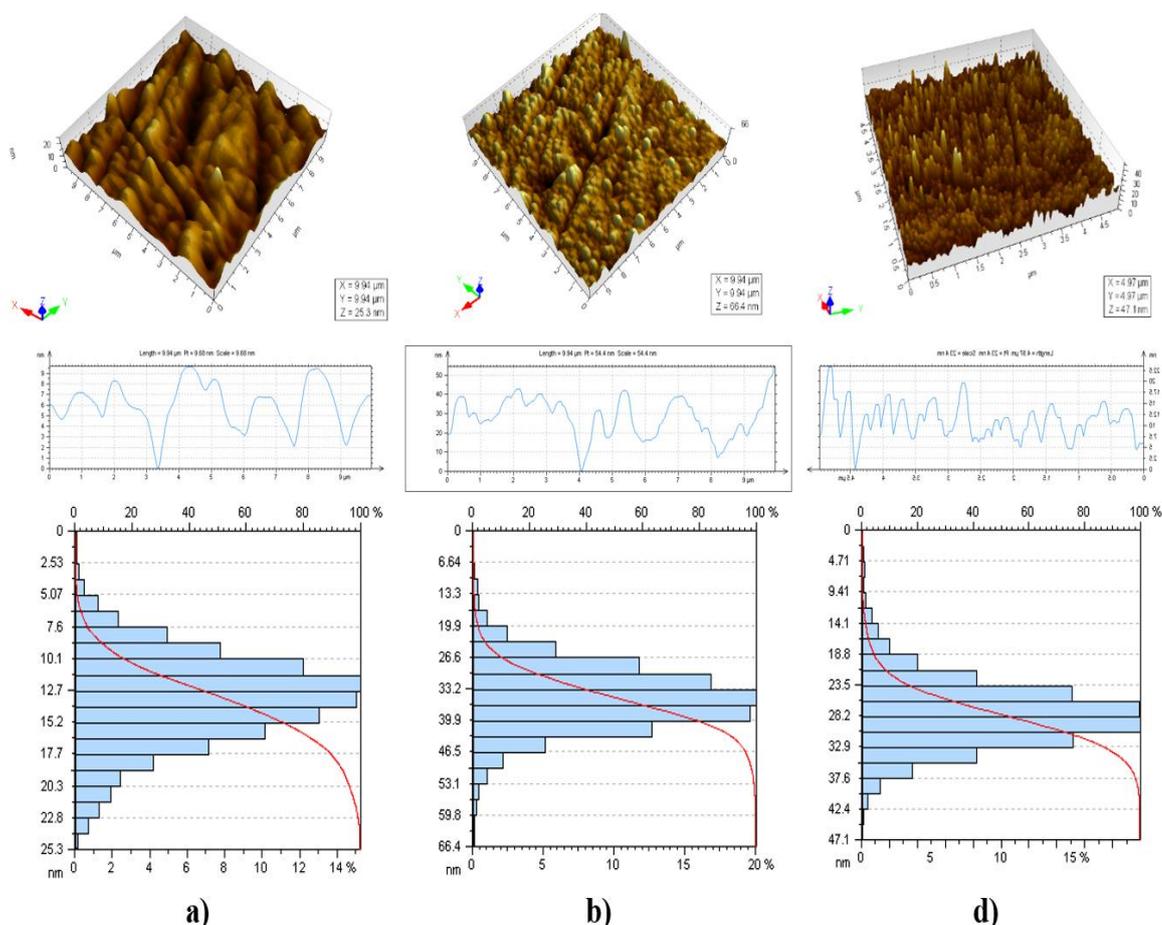


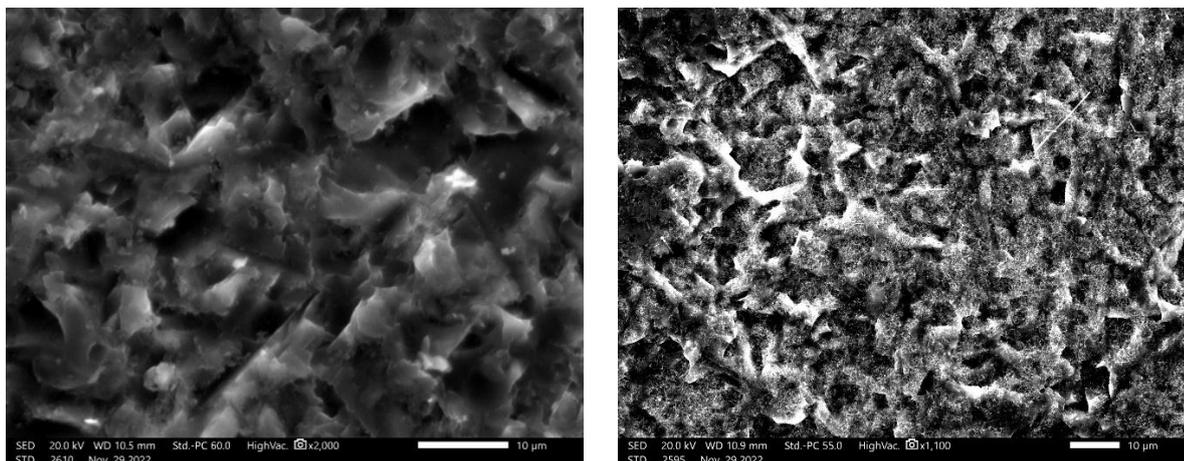
Рис. 4. АСМ-изображения структурного строения образцов:

- a) эталонный образец n-Si, b) термически обработанный образец n-Si, d) образец n-Si<Er>*

Линейный профиль рельефа показывает колебания высоты до 40–45 нм с частыми резкими перепадами, что подтверждает островковую структуру поверхности. Гистограмма распределения высот имеет более широкий характер по сравнению с эталонным кремнием: максимум распределения смещен вправо, а его «хвост» продолжается в область больших значений. Это указывает на наличие значительного количества участков с высотами 20–30 нм и более.

Внедрение эрбия, особенно в условиях отжига в кислородсодержащей среде, вероятно, привело к образованию наноструктур, включая оксиды эрбия и силикаты Er-Si-O, что значительно увеличило микрошероховатость поверхности.

Морфологический анализ выявил резкое увеличение шероховатости и наличие островковых наноструктур. Сравнительные СЭМ-исследования показали, что процессы фазообразования при легировании кремния Er и Eu значительно отличаются друг от друга.



а)

б)

Рис. 5. Морфология поверхности кремниевых образцов:

(а)- контрольный образец *n-Si*; (б)- образец после диффузии из оксидного слоя Er_2O_3-Si

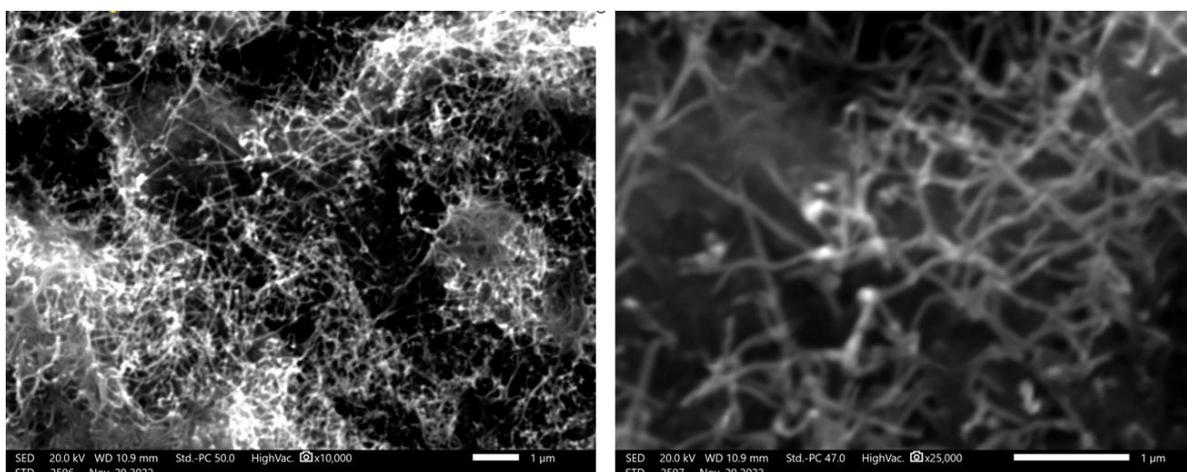


Рис. 6. Морфология поверхности кремниевых образцов, сформированной в результате диффузии слоя оксида европия Eu_2O_3-Si

Сравнительный СЭМ-анализ показывает, что при легировании кремния разными редкоземельными элементами происходят процессы образования различных дефектов и фаз, которые определяются различиями в атомных радиусах, химической активностью и склонностью к образованию интерметаллических соединений. Эти различия подтверждают необходимость выбора конкретного редкоземельного элемента в зависимости от желаемых структурных и функциональных характеристик получаемого материала.

Анализ СЭМ-изображений показывает (рис.5, 6) значительные изменения морфологии поверхности кремния после термообработки и диффузии оксидов редкоземельных элементов. В исходных структурах наблюдается «грубо-пористый» рельеф с фрагментами размером в несколько микрон, вероятно, сформировавшийся в результате многошаговой обработки. При увеличении $\sim \times 1100$ поверхность приобретает сетчатую фактуру, что может указывать на частичное «выветривание» слоя, диффузионные процессы или образование

оксидных включений. После диффузии слоя $\text{Er}_2\text{O}_3\text{-Si}$ рельеф поверхности становится ещё более неоднородным, с локальными островковыми образованиями и сетчатыми структурами, что может свидетельствовать о процессах спекания и растрескивания оксидных плёнок, а также о формировании силикатных фаз. В целом, термообработка вызывает увеличение шероховатости, появление микротрещин и сложных морфологических образований, что указывает на существенные структурные изменения в кремнии. Установлено, что в структурах $\text{Er}_2\text{O}_3\text{-Si}$ до высокотемпературной обработки концентрация Er увеличивается на границе с кремнием из-за неполного окисления металла. После обработки при $1200\text{ }^\circ\text{C}$ ионы Er диффундируют в кремниевую подложку, формируя поверхностный слой с концентрацией более $12 \cdot 10^{19}\text{ см}^{-3}$, что существенно превышает значения, характерные для стандартного диффузионного легирования.

Методом DLTS определены два глубоких уровня в $n\text{-Si}\langle\text{Er}\rangle$ с энергиями активации $E_c-0,18\text{ эВ}$ и $E_c-0,39\text{ эВ}$. Установлено, что внешние воздействия, такие как лазерное и УФ-облучение, повышают амплитуду DLTS-сигналов, указывая на увеличение концентрации уже существующих ловушек. Проведён анализ зависимостей Аррениуса, подтвердивший природу выявленных уровней.

На рисунке 7 представлены спектры DLTS для образца n-типа кремния, легированного атомами эрбия ($n\text{-Si}\langle\text{Er}\rangle$), в трёх состояниях: до облучения (чёрная кривая), после воздействия лазерного излучения (красная кривая), а также после облучения ультрафиолетом (синяя кривая). На всех трёх спектрах отчётливо проявляются два основных пика, соответствующих эмиссии носителей заряда из глубоких уровней в запрещённой зоне кремния. Первый пик расположен в области низких температур ($\sim 110\text{ К}$), второй — в области $\sim 250\text{ К}$.

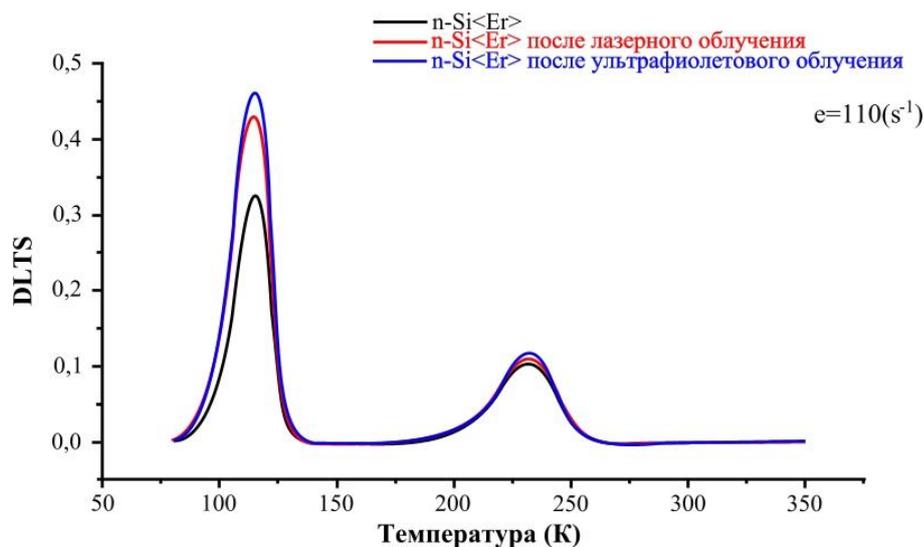


Рис. 7. DLTS-спектры образца $n\text{-Si}\langle\text{Er}\rangle$

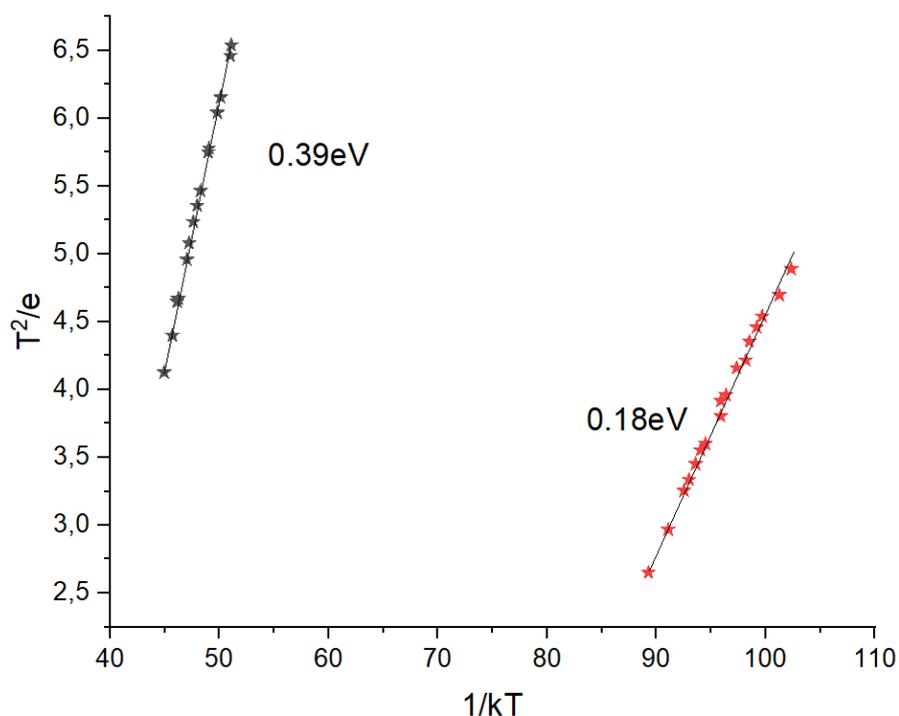


Рис. 8. График зависимости T^2/e от $1/kT$

Анализ показал, что низкотемпературный пик при 110 К в исходном состоянии имеет амплитуду порядка 0,30–0,35 отн.ед. После лазерного облучения амплитуда возрастает до ~0,40, а после воздействия ультрафиолета достигает максимального значения ~0,45. При этом температурное положение максимума практически не изменяется. Второй высокотемпературный пик при 250 К также усиливается после облучений: с 0,09–0,10 (исходное состояние) до ~0,12 после лазера и ~0,13 после УФ-облучения.

Установлено, что амплитуды обоих пиков возрастают под действием излучения, особенно сильно в случае УФ-излучения. Это свидетельствует об увеличении концентрации или заполненности уже существующих ловушек, а не о формировании новых.

На рисунке 8 приведён график зависимости T^2/e от $1/kT$ (так называемый график Аррениуса), позволяющий определить энергии активации обнаруженных ловушек. По наклонам аппроксимирующих прямых определены два уровня: уровень с энергией активации $E_c=0,18$ эВ, соответствующий пику при ~110 К и уровень $E_c=0,39$ эВ, соответствующий пику при ~250 К.

Дополнительно проведено сравнение эффектов лазерного и УФ-облучения. Установлено, что ультрафиолетовое излучение значительно эффективнее усиливает амплитуды сигналов DLTS по сравнению с лазерным излучением. Вероятно, это обусловлено тем, что лазерное излучение увеличивает концентрацию дефектов из-за локального нагрева и термомеханического воздействия, тогда как УФ-лучи обладают достаточной энергией для прямого разрушения химических связей и ионизации атомов, тем

самым создавая дополнительные точечные дефекты или активируя пассивные комплексы. Форма пиков (ширина, симметрия) остаётся практически неизменной, что указывает на то, что типы ловушек сохраняются, и не возникает новых близких уровней. Таким образом, изменение амплитуды DLTS-сигнала связано с количественным увеличением концентрации существующих дефектных центров, а не с появлением новых энергетических уровней. Таким образом, DLTS-спектроскопия позволила выявить чувствительность структуры n-Si<Er> к различным видам облучения и предоставила ценную информацию о характере и эволюции дефектов.

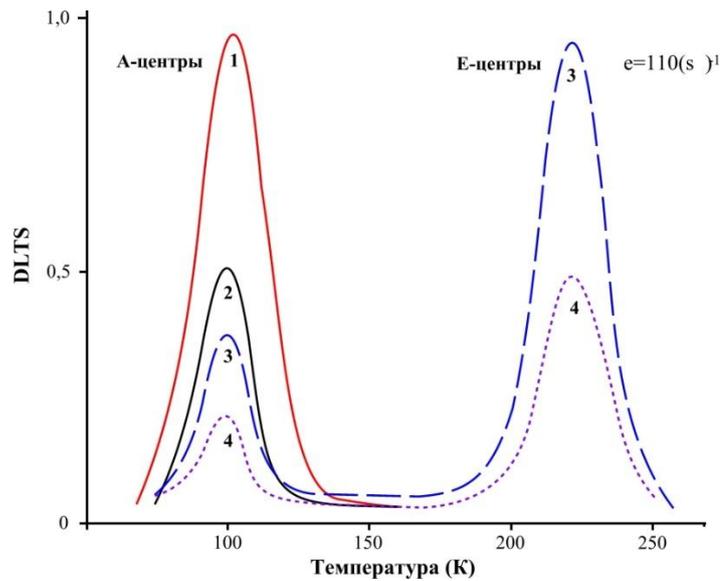


Рис. 9. Спектры DLTS образцов группы I ($N_{\text{opt}}^0 \geq 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) n-Si (1) и n-Si<Eu> (2), образцов группы II ($N_{\text{opt}}^0 \leq 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) n-Si (3) и n-Si<Eu> (4) после облучения γ -квантами ^{60}Co

Рассмотрим результаты исследования влияния γ - облучения на свойства кремния, легированного примесями РЗЭ, а именно на поведение атомов европия и эрбия в кремнии с помощью методов нестационарной емкостной спектроскопии. Для исследования использовались образцы n-Si<Eu> с различным содержанием междоузельного кислорода: образцы группы I ($N_{\text{opt}}^0 \geq 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) и образцы группы II ($N_{\text{opt}}^0 \leq 10^{16} \text{ cm}^{-3}$).

Измерения спектров DLTS показали, что присутствие атомов европия, введенных в кремний как диффузионным путем, так и при выращивании, не приводит к образованию какихлибо ГУ в заметной концентрации. Облучение образцов производилось γ - источником ^{60}Co с интенсивностью потока $\sim 3,4 \cdot 10^{12} \text{ кв}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$. Одновременно проводилось облучение и контрольных образцов - исходного Si без примеси европия с различными N_{opt}^0 .

После каждого этапа облучения измерялись концентрация и параметры ГУ, образующихся в результате γ - облучения. На рис.9 приведены типичные спектры DLTS, образцов n- Si< Eu >, облученных γ - квантами, ^{60}Co дозой

$\Phi \sim 8 \cdot 10^{17}$ кв·см⁻²·с⁻¹ (кривая I – образцы группы I с $N_{\text{opt}}^0 = 8 \cdot 10^{17}$ см⁻³, кривая 2 – образцы группы II с $N_{\text{opt}}^0 = 2 \cdot 10^{16}$ см⁻³). Анализ спектров DLTS показывает, что в результате облучения в образцах n-Si<Eu> (партии I) образуется новый глубокий уровень с энергией ионизации $E_c - 0,17$ эВ. Параметры этого ГУ совпадают с параметрами известного радиационного дефекта (РД) – А – центра (комплекса вакансии – кислород). В образцах II партии наблюдаются 2 новых ГУ: $E_c - 0,17$ эВ и $E_c - 0,43$ эВ, причем доминирующим является второй уровень, параметры которого совпадают с параметрами другого известного радиационного дефекта – Е–центра (комплекса вакансии – фосфор).

Измерения спектров DLTS образцов исходного кремния (нелегированного европием), облученного γ - квантами ⁶⁰Со показали, что в этих образцах также образуются А- и Е-центры, подобно легированным образцам. Сопоставление спектров DLTS наблюдаемых уровней в облученном n-Si<Eu> с аналогичными зависимостями в контрольных образцах показывает, что концентрация введенных радиационных дефектов в образцах, содержащих европий значительно ниже, чем в контрольных. Таким образом, присутствие атомов Eu в Si снижает эффективность радиационного дефектообразования. Этот эффект, по-видимому, следует связывать с особенностями взаимодействия атомов Eu с дефектами, вводимыми облучением. Аналогичная картина наблюдалась и в образцах Si<Er>, облученных γ - квантами, ⁶⁰Со дозой $\Phi \sim 8 \cdot 10^{17}$ кв·см⁻²·с⁻¹.

Установлено, что в кремнии, легированном европием или эрбием, уменьшается концентрация радиационных дефектов, образующихся в результате гамма-облучения, что приводит к повышению радиационной стойкости структур на основе Si<Eu> и Si<Er> в 2-3 раза.

Полученные результаты имеют важное значение для оценки радиационной устойчивости материала и могут быть использованы при разработке полупроводниковых структур, предназначенных для работы в условиях внешнего излучения.

В четвёртой главе «Спектроскопический анализ дефектов и фазовых превращений в кремнии, легированном редкоземельными элементами» приведены результаты комплексного анализа дефектных и фазовых преобразований в кремнии, легированном атомами Er и Eu, с применением методов Раман-спектроскопии и рентгеновского микроанализа.

Показано, что внедрение атомов Er в кристаллическую решётку Si приводит к снижению интенсивности характерных мод кремния и появлению новых пиков в области 60–280 см⁻¹, связанных с колебаниями, характерными для связей Er–Si и Er–O. Эти особенности свидетельствуют о частичном разрушении решётки, а также о формировании оксидных и силицидных фаз.

При сравнении спектров КР как самого n-Si (рис.10) так и n-Si-SiO₂<Er> (рис.11) можно увидеть тот факт, что положение полос поглощения подвергаются к изменениям, и появляется новый сигнал при ≈ 680 см⁻¹. Эту полосу часто приписывают изгибным модам связи Si–O–Si в силикатной

сетке. Соответственно, легирующие ионы эрбия способны вызывать сдвиги и появление новых полос из-за изменений в локальной структуре и связующем окружении сетки, действуя как модификатор сетки за счет образования нестиковых кислородов.

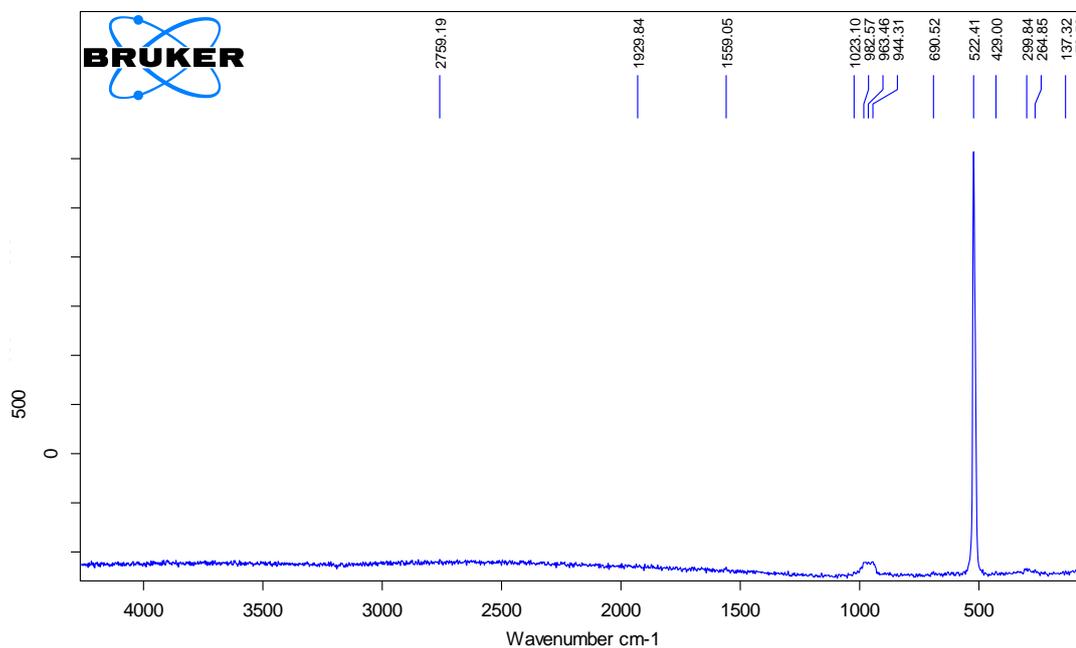


Рис.10. Спектры КР образца кремния n-Si типа

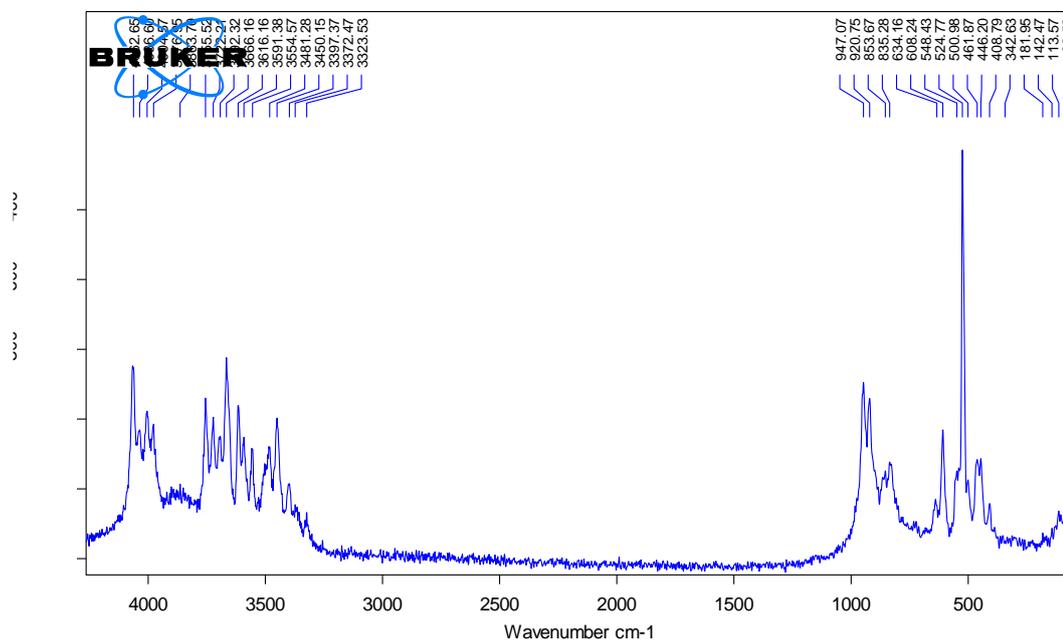


Рис.11. Спектры КР образца n-Si<Er>

При изучении спектров КР полученных образцов можно заметить тот факт, что две полосы, наблюдаемые в исходном n-Si (9) и полученных на его основе композитов n-Si-SiO₂<Er> (10) при 555 и 690 см⁻¹, относящиеся к изгибным колебаниям Er-O и изгибным модам Si-O-Si, исчезают во всех термообработанных образцах, интенсивность связи Si-O уменьшается из-за

слабости связей и тенденции к образованию кристаллических фаз. Можно утверждать, что включение ионов эрбия в кристаллическую структуру незначительно влияет на структуру связей Si–O и изменяет их расположение на спектре КР.

Рентгеновский микроанализ подтвердил наличие значительных концентраций атомов Er и Eu в диапазоне (10^{18} – 10^{19}) см^{-2} в приповерхностном слое, сопровождающихся локальным обогащением и фазовой сегрегацией. Установлено, что в образцах, легированных Er, формируются соединения типа ErSi_{2-x} , тогда как в структурах с Eu преобладают области с упорядоченным распределением примесных атомов и менее выраженной морфологической неоднородностью.

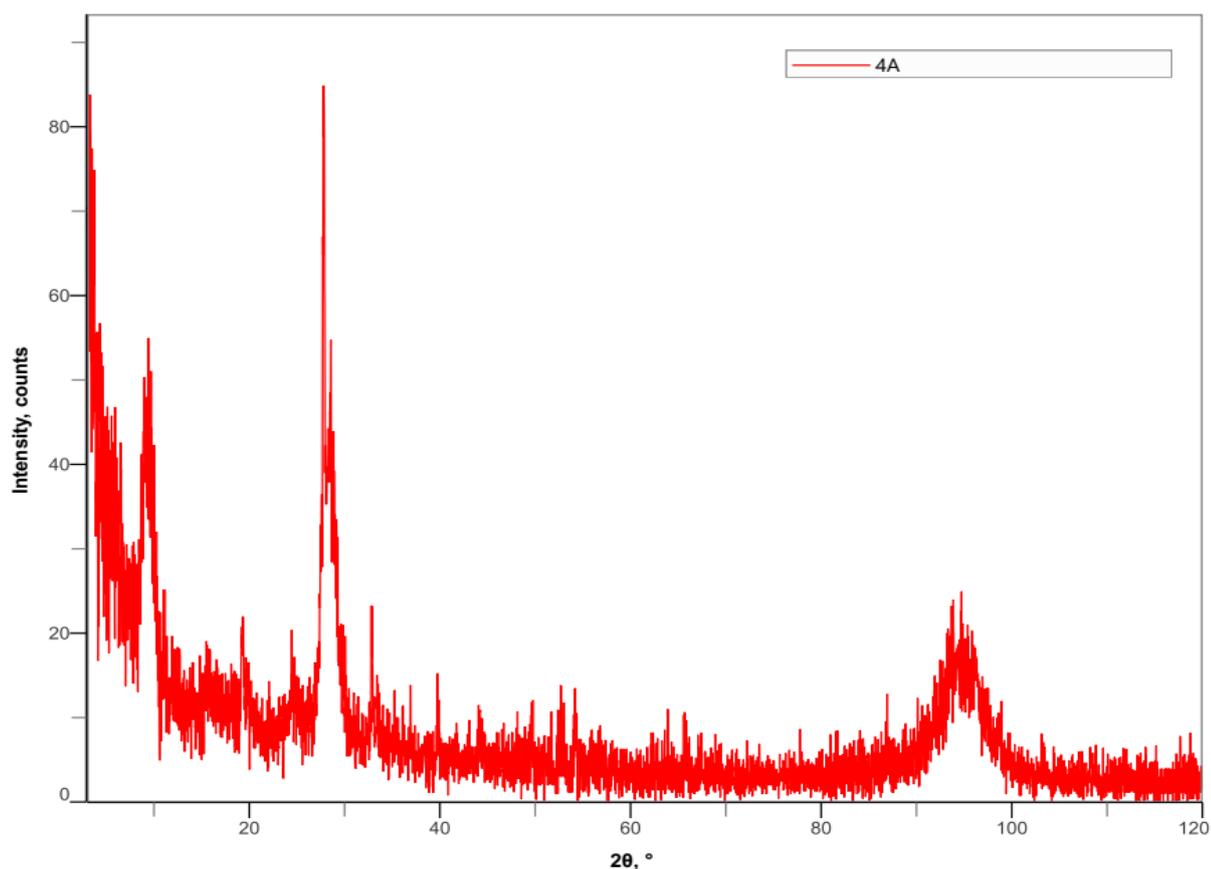


Рис. 12. Образец n-Si<Er>, подвергнутый диффузии при 1300 °С в течение 3 часов в открытой атмосфере (воздух);

первичное охлаждение - быстрое (quenching). Дополнительная термообработка: 900 °С в течение 5 часов на воздухе; охлаждение – медленное

Сравнительный рентгенофазовый анализ образцов n-Si<Er>, подвергнутых различным режимам диффузии и термообработки, позволил установить закономерности формирования фаз в зависимости от атмосферных условий, скорости охлаждения и наличия дополнительного отжига (**Таблица 1.**).

Таблица 1.

Сравнительный анализ фазового состава образцов n-Si<Er> после различных режимов термообработки

Образец	Условия диффузии и охлаждения	Отжиг	Характерные пики (2θ)	Интерпретация фаз
1	Открытая атмосфера, медленно	Нет	$\sim 9,3^\circ$, $28,4^\circ$, $94,8^\circ$	Si + Er-Si-O
2	Вакуум, медленно	Нет	$28,36^\circ$, $8,70^\circ$, $95,4^\circ$	Si+ напряжения, внедрение Er
3	Открытая атмосфера, быстро	Нет	$5,76^\circ$, $9,44^\circ$, $28,64^\circ$	Метастабильная фаза (Er-Si-O)
4	То же, что 3 об + 900°C , 5 ч	Да	$9,34^\circ$, $28,4^\circ$	Устойчивая фаза Er-Si-O
5	Вакуум, быстро	Да	$9,5^\circ$, $28,48^\circ$, $94,6^\circ$	Фаза Er-Si-O при отжиге

В образце 1 (открытая атмосфера, медленное охлаждение) наблюдается образование оксидных или силикатных фаз, отражающихся в появлении дополнительного пика при $\sim 9,3^\circ$, характерного для соединений системы Er-Si-O.

В образце 2 (вакуум, медленное охлаждение) не наблюдается низкоугловых отражений, что подтверждает отсутствие фаз, содержащих кислород, но показывает расщепление пиков кремния, указывающее на внутренние напряжения и возможное внедрение атомов Er.

В образце 3 (открытая атмосфера, быстрое охлаждение) обнаружен ярко выраженный пик при $5,76^\circ$, соответствующий метастабильной фазе с крупной решёткой ($d \approx 15,3 \text{ \AA}$), что характерно для неустойчивых образований, «замороженных» резким охлаждением.

В образце 4 (дополнительный отжиг 3А при 900°C , воздух) обнаружено исчезновение нестабильного пика при $5,76^\circ$ и появление стабильного рефлекса при $9,34^\circ$, что подтверждает структурную перестройку метастабильной фазы в более устойчивую оксидную/силикатную форму.

В образце 5 (вакуумная диффузия + отжиг на воздухе) не наблюдается признаков окисления, но после вторичной обработки фиксируется пик $\sim 9,5^\circ$, что также свидетельствует о формировании фаз с участием кислорода на этапе отжига.

Таким образом, формирование фаз типа Er-Si-O происходит не столько на этапе диффузии, сколько во время последующей термообработки в кислородсодержащей атмосфере. Метастабильные фазы, возникающие при

быстром охлаждении, могут быть преобразованы в устойчивые соединения при температуре 900 °С в течение 5 часов. Наличие характерного пика в диапазоне $2\theta \approx 9,3-9,5^\circ$ является индикатором таких стабильных фаз.

Объединённые данные спектроскопии и микроанализа позволили установить характер взаимодействия редкоземельных примесей с матрицей кремния и зафиксировать спектроскопические признаки фазовых превращений и дефектообразования, что представляет интерес для дальнейших разработок кремниевых структур с заданными функциональными характеристиками.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты данной работы состоят в следующем:

1. Впервые разработана оптимизированная технология легирования атомов Er через слой оксида Er_2O_3 и Eu через слой оксида Eu_2O_3 при которой формируются приповерхностные p^+ -слои с концентрацией активных редкоземельных атомов $(1-2) \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ - более чем в пять раз выше традиционного (безоксидного) диффузионного легирования.

2. Установлено, что легирование кремния эрбием и европием приводит к снижению концентрации междуузельного оптически активного кислорода на 35–40 % за счёт частичного замещения кислорода и образования связей Er-O, что приводит к уменьшению оптической активности кислородных центров.

3. Впервые зарегистрированы полосы $60-280 \text{ см}^{-1}$ (связи Er-Si) и $900-1100 \text{ см}^{-1}$ (Er-O и Si-O) при сохранении основного пика Si (520 см^{-1}), при этом изменение положения и полуширины линий 521 и 304 см^{-1} указывает на локальные деформации и повышение дефектности после легирования.

4. АСМ выявил рост среднеквадратичной шероховатости n-Si с 25.3 нм до 47.1 нм и появление нанорельефа (20–300 нм) после диффузии Er, что подтверждает кластеризацию примеси и коррелирует с данными СЭМ, ЭДС о повышенном содержании O и C в поверхностных фазах.

5. Полученные результаты демонстрируют возможность формирования в Si высокоактивных, термически стабильных и радиационно стойких люминесцентных центров Er^{3+} и низкобарьерных переходов металл-полупроводник.

6. Обнаружено, что длительное лазерное воздействие приводит к дополнительной активации атомов эрбия и увеличению фоточувствительности диодных структур на основе Si<Er>;

7. Установлено, что в кремнии, легированном как европием, так и эрбием, уменьшается концентрация радиационных дефектов, образующихся в результате гамма-облучения, что приводит к повышению радиационной стойкости структур на основе Si<Eu> и Si<Er> в 2-3 раза.

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

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

ZARIFBAEV JASUR SHAVKATOVICH

**INFLUENCE OF EXTERNAL FACTORS ON THE DEFECT STRUCTURE OF
SILICON DOPED WITH ERBIUM AND EUROPIUM**

01.04.10 - Physics of semiconductors

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

Tashkent – 2025

The theme of the dissertation of the doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences was registered by the Supreme Attestation Commission under the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2023.4.PhD/FM595

The dissertation was carried out at the Institute of Semiconductor Physics and Microelectronics at the National University of Uzbekistan.

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

Scientific supervisor: **Khamdamov Jonibek Jumayevich,**
PhD in Physics and Mathematics, Senior Researcher

Official opponents: **Otajonov Salim Madraximovich,**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Ayupov Kutup Sautovich,
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Leading organization: **Namangan State Technical University**

The defense of the doctoral dissertation will be held on "19" 09 2025, at 12⁰⁰ at the meeting of the Scientific Council No. DSc.03/30.12.2019.FM/1.01.12 at the Scientific Research Institute of Physics of Semiconductors and Microelectronics of the National University of Uzbekistan (Address: 20 Yangi Olmazor str., 100057 Tashkent city, Uzbekistan. Tel. (+99871) 248-79-94, fax: (+99871) 248-79-92, e-mail: info@ispm.uz)

The dissertation can be found at the Information Resource Center of the Institute (registered under No. 70). Address: 20 Yangi Olmazor str., 100057 Tashkent city, Uzbekistan. Tel.: (+99871) 248-79-92, e-mail: info@ispm.uz.

The abstract of the dissertation was distributed on "06" 09 2025.
(Registry record No. 70 dated "06" 09 2025)



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

O.Kh. Kuldashov
Scientific Secretary of the Scientific Council for the award of scientific degrees, Doctor of Technical Sciences, Professor

N.A. Turgunov
Chairman of the Scientific Seminar at the Scientific Council for the Awarding of Academic Degrees, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

INTRODUCTION (abstract of the PhD dissertation)

The aim of the study is a comprehensive study of the defect structure of silicon doped with erbium and europium, as well as a study of the influence of external factors on the defect composition of silicon doped with erbium (Er) and europium (Eu).

The object of study is single-crystal silicon grown by the Czochralski method and doped with impurities of rare-earth elements - erbium and europium.

The scientific novelty of the research consists of the following:

for the first time it was established that the formation of Er-O bonds in erbium-doped silicon leads to a decrease in the concentration of optically active interstitial oxygen by 35-40% and a decrease in the optical activity of oxygen centers;

for the first time in erbium-doped silicon, two new infrared vibrational modes were detected at 495 and 848 cm^{-1} , confirming the formation of Er-O bonds;

it has been shown that as a result of diffusion into silicon through the oxide layers of Er and Eu, near-surface p+ layers are formed, in which the concentration of atoms of active rare earth elements is $(1\div 2) \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$;

it was established that long-term laser irradiation additionally activates erbium centers and increases the current value in diode structures based on Si<Er> up to 25 times at a temperature of 77 K;

it has been established that in silicon doped with europium, the number of defects formed as a result of radiation is reduced, and the radiation resistance of Si<Eu> structures increase by 2-3 times.

Implementation of the research results.

Based on the study of the processes of influence of external factors on the defect structure of silicon doped with erbium and europium:

A method for forming p+-layers with a concentration of $(1\div 2) \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ in the near-surface region of a silicon crystal using diffusion technology based on Er_2O_3 and Eu_2O_3 oxides has been developed. This technological solution made it possible to create a relatively uniform doped layer in the near-surface region of silicon, and this method was implemented in the production technology of diodes and frequency devices at FOTON Joint-Stock Company (according to FOTON JSC certificate No. 13 dated April 30, 2025). The formation of highly concentrated p+-layers ensured stability and the required electrophysical operating parameters of diode and transistor structures based on Si<Er> and Si<Eu>. This made it possible to increase the service life of experimental samples by 20%.

The practical results obtained during the study, such as increased photosensitivity due to erbium atoms additionally activated by laser radiation and increased resistance to irradiation by means of europium atoms, were used at the Tashkent State Technical University named after Islam Karimov in the implementation of the project OT-F2-55 "Development of scientific foundations for obtaining volumetrically structured silicon by forming nanoclusters of impurity atoms as a new class of nanomaterials with functionally expanded capabilities" (Certificate of the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan No. 02/02-1233 dated May 1, 2025). The use of the

dissertation results created a scientific basis for the formation of impurity nanoclusters in silicon. This opened up the possibility of obtaining nanomaterials with new functional properties for opto- and microelectronics.

Structure and volume of the dissertation. The dissertation comprises an introduction, four chapters, a conclusion, and a bibliography. The dissertation work, including 35 figures and 2 tables, totals 115 pages of text.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть, part I)

1. Kh.S. Daliev, Sh.B. Utamuradova, A.I. Khaitbaeva J.J. Khamdamov, J.Sh. Zarifbaev, B.Sh. Alikulov. Defect Structure of Silicon Doped with Erbium.// East European Journal of Physics, 2024, 288, (2), pp.288-292. (Scopus)

2. Sh.B. Utamuradova, Sh.Kh. Daliyev, K.M. Fayzullayev, D.A. Rakhmanov, J.Sh. Zarifbayev Raman Spectroscopy of Defects In Silicon Doped With Chromium Atoms.// New Materials, Compounds and Applications, 2023, 7(1), pp.37-43. (Scopus)

3. J.J. Khamdamov, J.Sh. Zarifbayev. Analysis of vibration modes in silicon oxide structures doped with Er^{3+} ions.// Физика полупроводников и микроэлектроника. 2022, том 4, вып. 5, с.20-25. (01.00.00; №16).

4. J.Sh. Zarifbaev. Analysis of DLTS spectroscopy results of n-Si<Er> sample.// Физика полупроводников и микроэлектроника. 2023, том 5, вып. 5, с.30-33. (01.00.00; №16).

5. J.J. Khamdamova, J.Sh. Zarifbayev. Effect of thermal treatments on the structural and phase states of n-Si<Er>.// Физика полупроводников и микроэлектроника. 2024, том 6, вып. 1-2, с.29-34. (01.00.00; №16).

II бўлим (II часть, part II)

6. Sh. Utamuradova, J. Khamdamov, J. Zarifbayev, K. Fayzullaev. Surface morphology analysis of silicon doped with erbium atoms.// E3S Web of Conferences, 2024, 508, 07009. pp.1-6. (Scopus)

7. Sh.B. Utamuradova, J.J. Khamdamov, K.M. Fayzullaev, J. Zarifbaev, H. Matchonov, Application silicon doped with erbium in optoelectronics.// I-Международная научная конференция «Научные основы использования информационных технологий нового уровня и современные проблемы автоматизации» 25-26 апреля 2022 года. стр.355-357

8. Ш.Б. Утамурадова Ж.Ж. Хамдамов, Ж.Ш. Зарифбаев. Эрбий билан легирланган кремнийнинг нуқсонли структураси.// II- международной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы физики полупроводников, микро- и нанoeлектроники». Ташкент, 2023 йил, 27-28 октября, б.186-189

9. Ш.Б. Утамурадова Ж.Ж. Хамдамов, Ж.Ш. Зарифбаев. Исследование дефектной структуры кремния, легированного эрбием, методами рамановской спектроскопии и рентгенофазового анализа.// Международная научно-практическая конференция “Физика полупроводников, фундаментальные и практические проблемы современной электроники и энергетики” Посвящается 75-летию доктора физико-математических наук, профессора Г. Гуломова. Наманган, 2024-йил, 18-19 сентябр, б.17-20

10. Ж.Ж. Хамдамов, М.Б. Бекмуратов, Ж.Ш. Зарифбаев, Х.Ж. Матчонов. Электронный термостабилизатор для измерения температурной зависимости электропроводности полупроводниковых материалов.// Республиканской научно-теоретической и практической конференции с участием зарубежных ученых «ФИЗИКА И ЭКОЛОГИЯ», Нукус-2021, 15-16 октября стр. 205-208

11. SH.V. Utamuradova, J.J. Xamdamov, J.SH. Zarifbaev, SH.SH. Madraximova. Si:Er strukturalarining optoelektronikaga tadbiri.// “Yarimo‘tkazgichlar fizikasi va ular asosidagi qurilmalarning zamonaviy muammolari” mavzusidagi respublika ilmiy-amaliy anjumani”. Namangan, 2023 yil, 12-aprel. b.191-193.

12. J.J. Hamdamov, J.Sh. Zarifbayev, B.Sh. Alikulov. The effect of Erbium on the defect structure and properties of silicon.// Yosh olimlar va fizik talabalarning V Respublika ilmiy anjumani (YOOFTRIA - V) Toshkent-2025, 3-4-aprel, b. 59-61.

13. Ш.Б. Утамурадова, К.М. Файзуллаев, Ж.Ш. Зарифбаев. Рамановская спектроскопия дефектов в n-Si с примесями хрома и эрбия.// Аморфные и микрокристаллические полупроводники (AMS14) Санкт-Петербург, 30 июня – 3 июля 2025 г. Сборник трудов Часть 2, стр. 77-78

Avtoreferat “Til va adabiyot ta’limi” ilmiy-metodik jurnal tahririyatida tahrirdan o‘tkazildi va o‘zbek, rus, ingliz tillaridagi matnlarini mosligi tekshirildi
(02.09.2025).

Bichim 60x841/16. Raqamli bosma usuli. Times garniturasini.
Shartli bosma tabog‘i: 3,5. Adadi 70. Buyurtma № 64.
Guvohnoma reestr № 10-4434
Yarimo‘tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika
ilmiy-tadqiqot instituti bosmaxonasida chop etilgan.
Bosmaxona manzili: 100057, Toshkent sh.,
Yangi Olmazor ko‘chasi, 20-uy

