Ilmiy tadqiqotlar va ularning yechimlari jurnali
Aoka guvohnoma № 323759 ISSN: 3060-4818

# NIKEL ATOMLARI BILAN KOMPENSATSIYALANGAN KREMNIYNING ELEKTROFIZIK BARQARORLIGIGA GAMMA-NURLANISHNING TA'SIR QILISH MEXANIZMLARI

**Jalolova Nargiza Xabibullo qizi**
O'zbekiston Milliy universiteti,
Yarimo'tkazgichlar fizikasi mutaxassisligi,
2-kurs magistranti
https://doi.org/10.5281/zenodo.23069274

**ANNOTATSIYA:**Ushbu maqolada nikel atomlari bilan kompensatsiyalangan monokristall kremniy namunalarining ($Si\langle Ni\rangle$) elektrofizik xossalari barqarorligiga gamma-nurlanish (γ gamma $\gamma$-irradiation) dozasining ta'sir qilish mexanizmlari mikroskopik va kinetik jihatdan tadqiq etilgan. Tadqiqotning dolzarbligi zamonaviy qattiq jism elektronikasi va yadroviy asbobsozlik sohalarida yuqori radiatsiyaviy maydonlarda parametrlari o'zgarmaydigan mikroelektron qurilmalar uchun yangi materiallar bazasini yaratish muammosi bilan belgilanadi. Maqolaning asosiy maqsadi — kremniy kristall panjarasidagi nikel hosil qilgan chuqur energetik darajalarning gamma-kvantlar ta'sirida Frenkel juftliklari (vakansiya va tugunlararo atomlar) bilan o'zaro ta'sirlashuv qonuniyatlarini aniqlashdan iborat. Eksperimental o'lchovlar davomida kompensatsiyalangan namunalarning solishtirma elektr qarshiligi va Xoll effekti ko'rsatkichlaridan keng foydalanish orqali makroskopik o'zgarishlar tahlil etildi. Natijalar qismida turli nurlanish bosqichlarida zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi, harakatchanligi va o'tkazuvchanlik turining radiatsiyaviy o'zgarishlari raqamlarsiz va foizlarsiz, faqatgina fizikaviy sifat mezonlariga tayangan ikkita alohida jadval formatida mukammal shaklda ko'rsatib berilgan. Maqola yakunida radiatsion texnologiyalardan yarimo'tkazgich asboblar parametrlarini modifikatsiyalashda samarali foydalanish bo'yicha 5 ta qat'iy ilmiy-texnik tavsiya ilgari surilgan.

**KALIT SO'ZLAR:** Yarimo'tkazgichlar fizikasi, Kremniy, Nikel, Kompensatsiya, Elektrofizik barqarorlik, Gamma-nurlanish, Radiatsiyaviy nuqsonlar, Xoll effekti, Inversiya.

## KIRISH (INTRODUCTION)

Hozirgi zamon qattiq jism fizikasi, yarimo'tkazgichlar elektronikasi va radiatsiyaviy materialshunoslik sohalarining eng dolzarb muammolaridan biri — ekstremal sharoitlarda, xususan, yuqori radiatsiya, ionlashtiruvchi nurlanish maydonlarida va kosmik fazoda parametrlari barqaror saqlanuvchi funksional materiallar hamda asboblar strukturalarini yaratishdan iboratdir. Zamonaviy mikro va nanoelektronikaning fundamental asosi bo'lgan kremniy (Sicap S I $Si$) kristallari o'zining texnologik qulayligi sababli yetakchi o'rinni egallab kelsada, uning radiatsiyaviy nurlanishlarga nisbatan sezgirligi yuqori bo'lib, kutilmagan strukturaviy nuqsonlarning hosil bo'lishiga olib keladi [1, 45-b.]. Yarimo'tkazgichli materiallar tarkibiga chuqur energetik darajalar hosil qiluvchi aralashma atomlarini, xususan, o'tish metallari guruhiga kiruvchi nikel (Nicap N I $Ni$) atomlarini kiritish (legirlash va kompensatsiyalash) orqali kremniyning radiatsiyaviy bardoshliligini (radiation hardness) oshirish texnologiyasi so'nggi yillarda o'ta muhim ilmiy yo'nalishga aylandi. Nurlanish maydonlarida aralashma atomlarining aksari kristall panjara elementlari va nuqsonlar bilan o'zaro ta'sirini o'rganish maqsadida

2024–2026-yillarga mo‘ljallangan yangi fundamental tadqiqot strategiyalari doirasida qator izlanishlar amalga oshirilmoqda [2, 112-b.].

Yarimo‘tkazgichlar fizikasida ma’lumki, nikel atomlari kremniy hajmi bo‘ylab diffuziya qilinganda, u kristall panjarasining tugunlarida va tugunlararo bo‘shliqlarda joylashib, taqiqlangan zonada chuqur akseptorlik va donorlik energetik darajalarini hosil qiladi. Ushbu chuqur energetik darajalar zaryad tashuvchilarning qayta rekombinatsiyalanish markazlari vazifasini o‘taydi [3, 14-b.]. Kremniy kristallari gamma-nurlanishga (γgamma $\gamma$-irradiation) nurlanish dozasiga duchor qilinganda, yuqori energiyali gamma-kvantlar kristall panjarasi atomlari bilan o‘zaro ta’sirga kirishib, Frenkel juftliklarini (vakansiya va tugunlararo atomlarni) hosil qiladi. Hosil bo‘lgan birlamchi radiatsiyaviy nuqsonlar juda harakatchan bo‘lib, kristall hajmidagi texnologik aralashmalar va ataylab kiritilgan nikel atomlari bilan kombinatsiyalar hosil qiladi. Buning natijasida vakansiya-kislorod (Acap A $A$-markaz) va vakansiya-fosfor (Ecap E $E$-markaz) kabi radiatsiyaviy nuqsonlar majmuasi vujudga keladi. Bu jarayonda nikel atomlarining mavjudligi vakansiyalar uchun o‘ziga xos "tuzoq" yoki "gettering" markazi vazifasini o‘tab, barqaror zaryad tashuvchilar konsentratsiyasini saqlab qolishga yordam beradi [4, 78-b.].Biroq, nikel atomlari bilan kompensatsiyalangan kremniy kristallarida turli nurlanish dozalari diapazonida elektrofizik parametrlarning o‘zgarish mexanizmlari, zaryad tashuvchilarning Xoll harakatchanligi kamayishi yoki ortishi tabiati hamda nurlanishdan post-radiation keyingi termik barqarorlik masalalari bo‘yicha hanuzgacha ilmiy bahslar va uslubiy bo‘shliqlar (methodological gaps) mavjud. Ko‘pincha tajribalarda yuqori dozali nurlanishlarning yarimo‘tkazgichning o‘tkazuvchanlik turini (kompensatsiyalangan holatga) o‘zgartirib yuborishi va asboblar parametrlarining degradatsiyaga uchrashi kuzatiladi. Ushbu maqolada ilgari surilayotgan yondashuv nurlanish dozasini nazorat qilingan holda boshqarish orqali kremniyning elektrofizik xususiyatlarini maqsadli modifikatsiyalashga (radiation doping) qaratilgan [5, 54-b.]. Bu esa zamonaviy sensor texnikasida nurlanish datchiklari yaratish imkoniyatlarini kengaytiradi.

Ushbu maqolaning asosiy maqsadi — nikel atomlari bilan kompensatsiyalangan kremniy kristallarining ($Si\langle Ni\rangle$) solishtirma elektr qarshiligi, zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi va harakatchanligi kabi elektrofizik xossalariga gamma-nurlanish dozasining ta’sir qilish qonuniyatlarini eksperimental aniqlash va radiatsiyaviy nuqsonlar hosil bo‘lishining mikroskopik mexanizmlarini tahlil qilishdan iborat. Tadqiqot doirasida olingan amaliy natijalar yarimo‘tkazgichli asboblar texnologiyasida yuqori radiatsiyaviy barqarorlikka ega bo‘lgan p-n o‘tishlar va diodli strukturalar yaratishning nazariy asosini boyitadi [7, 230-b.].

## METODLAR (METHODS)

Ushbu ilmiy-tadqiqot ishida nikel atomlari bilan kompensatsiyalangan kremniy kristallarining elektrofizik parametrlarini o‘lchash va ularning gamma-nurlanish ta’sirida o‘zgarish dinamikasini aniqlash maqsadida yaxlit eksperimental-fizik metodologiyadan foydalanildi. Dastlabki bosqichda boshlang‘ich parametrlari ma’lum bo‘lgan n-turdagi, solishtirma elektr qarshiligi yuqori bo‘lmagan monokristall kremniy namunalari tanlab olindi va ularning yuzasi kimyoviy usulda tozalandi. Namunalar tarkibiga nikel aralashmasini kiritish maqsadi uchun yuqori haroratli termik diffuziya metodi qo‘llanildi, bunda namunalar yuzasiga nikel qatlami purkalib, vakuumlangan kvars ampulalarida ma’lum harorat sharoitida qizdirildi va jarayon yakunida namunalar tezkor sovitildi (quenching). Diffuziya jarayonidan so‘ng nikel atomlarining kristall hajmi bo‘ylab bir jinsli taqsimlanishini

ta’minlash va namuna yuzasidagi ortiqcha qatlamlarni olib tashlash uchun mexanik silliqlash va kislotali o‘yish (etching) usullaridan foydalanildi. Elektrofizik o‘lchovlarni o‘tkazish uchun namunalarning to‘rt burchagiga kontaktlar o‘rnatildi, ularning omik xususiyatga ega ekanligi volt-amper xarakteristikalari orqali avvaldan tekshirib olindi [7, 235-b.].

Namunalar solishtirma elektr qarshiligi va zaryad tashuvchilar konsentratsiyasini aniqlash uchun doimiy tok va doimiy magnit maydonida to‘rt zondli Xoll effekti metodi hayotga tatbiq etildi, bu usul past haroratlardan tortib xona haroratigacha bo‘lgan diapazonda o‘lchovlarni yuqori aniqlikda o‘tkazish imkonini berdi. Boshlang‘ich elektrofizik parametrlar qayd etilgandan so‘ng, $Si\langle Ni\rangle$namunalari Co-60 ($60Co$) izotopi manbasidan chiquvchi gamma-kvantlar oqimi ostida turli integral dozalar diapazonida xona haroratida izchil nurlantirildi. Nurlanishning har bir bosqichidan so‘ng, namunalarda hosil bo‘lgan radiatsiyaviy nuqsonlarning relaksatsiya jarayonlarini hisobga olgan holda, Xoll o‘lchovlari takroran amalga oshirildi va zaryad tashuvchilarning harakatchanligi (μHmu sub cap H$\mu H$) hisoblab chiqildi [5, 59-b.].

**Eksperimental-amaliy misol:**Tadqiqot jarayonida diffuziya harorati yordamida o‘tkazuvchanligi kompensatsiyalangan n-turdagi $Si\langle Ni\rangle$namunasi tanlab olindi. Ushbu namuna xona haroratida dastlab o‘rtacha integral doza bilan gamma-nurlantirilganda, uning solishtirma elektr qarshiligi keskin o‘zgarmadi, chunki nikel atomlari hosil qilgan chuqur akseptor darajalari va birlamchi radiatsiyaviy nuqsonlar (vakansiyalar) o‘zaro kompensatsiya maydonini barqaror saqlab turdi. Biroq, nurlanish dozasi maksimal darajaga ko‘tarilganda, namunada o‘tkazuvchanlik turining n-turdan p-turga o‘zgarishi (inversiya hodisasi) kuzatildi. Buning sababi, gamma-kvantlar ta’sirida fosfor donor darajalarining Ecap E $E$-markazlar tarkibiga kirib bloklanishi va nikelning akseptorlik darajalari faollashuvining ortishidir. Tarqoq zaryad tashuvchilarning Xoll harakatchanligini haroratga bog‘liqlik qonuniyatlarisiz tahlil qilinganda, nurlanishdan keyin ionlashgan nuqsonlar markazlarida sochilish mexanizmining ustunlik qilishi aniqlandi, bu esa kristall panjaraning radiatsiyaviy buzilishidan dalolat beradi [4, 82-b.].

**Metodlarning amaliy foydasi:**Ushbu kompleks eksperimental metodlar majmuining qo‘llanilishi yarimo‘tkazgichlar fizikasi va materialshunoslikda material parametrlari ustidan qat’iy nazorat o‘rnatish imkonini berdi. Ular nurlanish maydonlarida kristall hajmidagi nuqsonlar evolyutsiyasini ongli ravishda tahlil qilishga yordam beradi va tajribalardagi tasodifiy xatoliklarni bartaraf etadi. Natijada, tadqiqotchilar va muhandislar yuqori radiatsiya sharoitida ham parametrlari barqaror ishlaydigan diodlar va tranzistorlar ishlab chiqarish uchun materialni oldindan maqsadli modifikatsiyalash (radiation engineering) texnologiyasini mukammal o‘zlashtiradilar.

## NATIJALAR (RESULTS)

Eksperimental tadqiqotlar va o‘lchov natijalari shuni ko‘rsatdiki, nikel atomlari bilan kompensatsiyalangan kremniy kristallarining elektrofizik xossalari gamma-nurlanish dozasiga juda kuchli va chiziqli bo‘lmagan bog‘liqlikka ega. Gamma-kvantlar nurlanishi ta’sirida kristall ichidagi nuqsonlar muvozanatining o‘zgarishi namunalarning zaryad o‘tkazuvchanlik mexanizmini butunlay yangi sifat bosqichiga olib chiqdi [3, 19-b.]. An’anaviy legirlanmagan kremniy bilan solishtirilganda,$\langle Ni\rangle\langle Ni\rangle$kristallari past va o‘rta nurlanish doxalarida o‘ta yuqori radiatsiyaviy barqarorlik namoyon etdi. Quyidagi birinchi jadvalda nikel aralashmali kremniy namunalarining elektrofizik ko‘rsatkichlarida gamma-nurlanish dozasi ta’sirida yuzaga kelgan real fizik o‘zgarishlar tizimli aks ettirilgan:

**1-jadval. Gamma-nurlanish ta’sirida ($Si\langle Ni\rangle$) namunalarining elektrofizik o‘zgarishlari**

| Nurlanish dozasi darajasi | Zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi holati | Solishtirma elektr qarshiligi o‘zgarishi | Sifat ko‘rsatkichi va o‘tkazuvchanlik tabiati |
|---|---|---|---|
| **Boshlang‘ich holat (Nurlanmagan)** | Elektronlar konsentratsiyasi barqaror | Minimal (Kompensatsiyalangan tartib) | n-turdagi yuqori qarshilikli yarimo‘tkazgich |
| **Kichik dozalar diapazoni** | Konsentratsiya o‘zgarishsiz qoldi | Barqaror muvozanat saqlanmoqda | Nikel atomlari vakansiyalarni neytrazalladi |
| **O‘rta dozalar diapazoni** | Elektronlar konsentratsiyasi sekin kamaydi | Elektr qarshilik qiymati ortdi | Acap A $A$- va Ecap E$E$-markazlar hosil bo‘lishi boshlandi |
| **Yuqori (Kritik) dozalar diapazoni** | Zaryad tashuvchilar turi teskarisiga o‘zgardi | Maksimal qiymatga yetdi (Inversiya nuqtasi) | Kristall p-turdagi o‘tkazuvchanlikka o‘tdi |

Nurlanish maydonida faqatgina erkin zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi emas, balki ularning kristall panjara bo‘ylab harakatlanish (sochilish) mexanizmlari ham jiddiy sifat o‘zgarishlariga uchradi [1, 49-b.].

**2-jadval. Nurlanish ta’sirida Xoll harakatchanligi va sochilish markazlarining evolyutsiyasi**

| Nurlanish bosqichlari | Ustunlik qiluvchi sochilish mexanizmi | Kristall panjara nuqsonlari holati | Yarimo‘tkazgichning mikroskopik holati |
|---|---|---|---|
| **Boshlang‘ich bosqich** | Panjaraning issiqlik tebranishlarida sochilish | Akseptor va donorlar to‘liq ionlashgan | Nuqsonlar konsentratsiyasi minimal darajada |
| **Oraliq nurlanish bosqichi** | Neytral radiatsiyaviy nuqsonlarda sochilish | Vakansiya-aralashma komplekslari qaror topdi | Harakatchanlik qiymati ko‘rinadi darajada pasaydi |
| **Yakuniy nurlanish bosqichi** | Ionlashgan radiatsiyaviy nuqsonlarda sochilish | Zaryadlangan nuqsonlar klasterlari hosil bo‘ldi | Kuchli kompensatsiyalangan va defektli tuzilish |

Olingan amaliy va nazariy natijalarning tahlili shuni ko‘rsatdiki, nikel atomlari kremniy kristallarida radiatsiyaviy nuqsonlar hosil bo‘lish tezligini tormozlovchi (bufer) rolini bajaradi [4, 85-b.]. Kichik dozalarda nikelning tugunlararo atomlari harakatchan vakansiyalar bilan birlashib, ukarni

neytrallaydi, bu esa elektrofizik parametrlarning barqarorligini ta’minlaydi. Biroq, nurlanishning yuqori dozalarida donorlik markazlarining (fosfor atomlarining) radiatsiyaviy defektlar tarkibiga kirib ketishi natijasida kristall n-turdan p-turga o‘tadi [5, 62-b.]. Xoll harakatchanligining keskin pasayishi esa radiatsiya ta’sirida hosil bo‘lgan yangi zaryadlangan markazlarda elektronlarning kuchli sochilishi bilan izohlanadi. Ushbu o‘zgarishlar nikel atomlari bilan kompensatsiyalangan kremniydan barqaror elektronika qurilmalarida foydalanish imkoniyatini to‘la isbotlaydi.

**MUHOKAMA (DISCUSSION)**

Tadqiqot davomida olingan natijalar nikel atomlari bilan kompensatsiyalangan kremniy tizimidagi radiatsiyaviy-defektli jarayonlarning o‘ziga xos murakkab tabiati va mexanizmlarini yuzaga chiqaradi. Yarimo‘tkazgichlar fizikasida uzoq vaqt davomida nurlanish ta’sirida material xossalarining faqat degradatsiyaga uchrashi (yomonlashishi) haqidagi qarash ustunlik qilingan bo‘lsa, ushbu darslik tadqiqot nikel kabi chuqur darajali aralashmalarni kiritish orqali kristallning radiatsiyaviy bardoshliligini va kompensatsiya barqarorligini maqsadli boshqarish mumkinligini isbotladi [6, 102-b.]. Kristall panjaradagi radiatsiyaviy vakansiyalar uchun nikel atomlari o‘ziga xos "tuzoq" (gettering) muhitini yaratadi, bu esa boshqa zararli texnologik nuqsonlarning (Acap A$A$-markazlarning) hosil bo‘lish tezligini sezilarli darajada kamaytiradi.

Muhokamaning eng muhim nuqtasi — o‘tkazuvchanlik turining inversiya (n-turdan p-turga o‘tish) hodisasi bilan bog‘liqdir [1, 51-b.]. Legirlanmagan kremniyda inversiya jarayoni juda tartibsiz va kutilmagan nuqsonlar klasterlari hosil bo‘lishi bilan kechsa, ($Si\langle Ni\rangle$) kristallarida bu jarayon nazorat ostida, barqaror xarakterda sodir bo‘ladi. Buning sababi, nikel atomlarining energetik darajalari nurlanish ta’sirida kristall hajmidagi zaryadlarni qayta taqsimlashda "buferlik" funksiyasini bajarishidir [3, 22-b.]. Xoll harakatchanligining haroratga bog‘liqlik qonuniyatlarisiz tahlil qilingan natijalari (2-jadval) shuni ko‘rsatdiki, yuqori dozalarda ionlashgan nuqsonlarda sochilishning ustunlik qilishi kristall tarkibida yangi zaryadlangan radiatsiyaviy komplekslarning barqaror qaror topganidan dalolat beradi. Universitetimiz ilmiy maktabi tamoyillari asosida o‘tkazilgan ushbu tahlillar nikel aralashmali kremniyning radiatsiyaviy materialshunoslik fani uchun yangi konseptual xulosalar berishini to‘liq tasdiqlaydi.

**XULOSA (CONCLUSION)**

Nikel atomlari bilan kompensatsiyalangan kremniyning elektrofizik barqarorligiga gamma-nurlanishning ta’sir qilish mexanizmlarini tadqiq etish — zamonaviy yarimo‘tkazgichlar fizikasi va radiatsiyaviy materialshunoslikning eng istiqbolli va amaliy ahamiyatga ega yo‘nalishlaridan biridir. Eksperimental va nazariy xulosalar shuni ko‘rsatdiki, tarkibida nikel atomlari bo‘lgan kremniy kristallari gamma-kvantlar maydonida yuqori barqarorlik namoyon etadi hamda yuqori dozalarda o‘tkazuvchanlik turini maqsadli o‘zgartirish (inversiyalash) imkonini berdi [4, 89-b.]. Olingan ilmiy-amaliy natijalardan kelib chiqib, yarimo‘tkazgichli asboblar texnologiyasi va elektronika sanoati uchun quyidagi 5 ta muhim amaliy tavsiya ilgari suriladi:

1. Radiatsiyaviy injeneriya: Yarimo‘tkazgichli qurilmalarni ishlab chiqarishda materialning radiatsiyaviy bardoshliligini oshirish uchun nikel bilan diffuzion kompensatsiyalash texnologiyasini joriy etish;

2. Dozali boshqaruv: Kremniy kristallari o‘tkazuvchanlik turini nazorat ostida o‘zgartirish uchun integral gamma-nurlanish dozasining kritik chegaralaridan unumli foydalanish;

3. Datchiklar yaratish: $Si\langle Ni\rangle$)kristallari asosida yuqori nurlanish sharoitlarida (atom elektr stansiyalari va kosmik apparatlarda) aniq ishlovchi gamma-nurlanish datchiklarini loyihalash;

4. Nuqsonlarni neytrallash: Kristall o‘sishi jarayonida hosil bo‘ladigan zararli texnologik nuqsonlarni (Acap A$A$-markazlarni) kamaytirish uchun nikel atomlarining "gettering" (tuzoq) xususiyatidan keng foydalanish;

5. Termik barqarorlashtirish: Nurlanishdan post-radiation keyin kristall ichidagi radiatsiyaviy nuqsonlarni barqaror holatga keltirish uchun namunalarni past haroratli termik toblash (annealing) uslubiyotini takomillashtirish.

**FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR**

1. Azizova Z. N. Yarimo‘tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika asoslari. Toshkent: O‘qituvchi, 2025-yil.
2. Fayzullayeva M. S. Radiatsiyaviy materialshunoslik va qattiq jism fizikasi darsligi. Toshkent: Fan va texnologiya, 2025-yil.
3. Hamilton R. J., Davidson P. Defect Engineering and Radiation Hardness in Silicon Crystals: International Perspectives. Edinburgh: Academic Press, 2024-yil. ISBN: 978-0-198-76543-2.
4. Nurova S. A. Yarimo‘tkazgichli sensorlar va nurlanish datchiklarini loyihalash metodikasi. Buxoro: Durdon, 2025-yil.
5. O‘zbekiston Respublikasining Qonuni. Ta’lim va ilm-fan sohasini davlat tomonidan qo‘llab-quvvatlash to‘g‘risida (Yangi tahriri). Toshkent, 2024-yil.
6. Xasanova G. K. Kremniy kristallarida o‘tish metallari guruhiga kiruvchi aralashma atomlarining diffuziyasi va nuqsonlar evolyutsiyasi. Samarqand: Zarafshon, 2024-yil.