KREMNIY ASOSIDAGI MONOKRISTALL VA NANOSTRUKTURALARDA FOTOELEKTRIK YUTILISH, NOPOKLIK SATHLARI VA ORALIQ ZONALARNING OPTIK PARAMETRLARINI TAHLIL QILISH

***Ochilova Gulchexra*[1]**

[1]O'zbekiston Milliy universiteti Fizika fakulteti 2-kurs magistri

ANOTATSIYA. Ushbu tahliliy ishda kremniy monokristallari matritsasida chuqur sathli rux (Zn) akseptor markazlari, krio-haroratlardan xona haroratigacha bo'lgan oraliqda taqiqlangan zona atrofidagi fotoelektrik yutilish kesimi hamda kvant nuqtalardagi optik o'tishlar parametrlari zamonaviy ilmiy manbalar tahlili asosida o'rganildi. Rux atomlarining kremniy panjarasida o'rnini bosuvchi qo'shaloq akseptor ($E_v + 0.30eV\ va\ E_v + 0.60eV$) sifatida tutgan o'rni, uning 3d-o'tish metallari bilan elektrostatik juftliklar hosil qilish mexanizmlari va nurlanish bilan o'zaro ta'sir kesimlari yoritildi. Past haroratlarda (sub-Kelvin rejimida) kremniyning yutilish koeffitsiyenti o'zgarishi, fononlar yutilishi/nurlanishi orqali sodir bo'ladigan bilvosita optik o'tishlar kinetikasi va ko'p qatlamli nanosferik tuzilmalarda fotoionizatsiya kesimining fazoviy o'lchamlarga bog'liqligi modellashtirildi. Natijalar infraqizil detektorlar, quyosh elementlari va o'ta sezgir kryogenik yarimo'tkazgich asboblarini optimallashtirish imkoniyatini beradi.

ABSTRACT. In this review paper, the fundamental optical parameters, deep-level zinc (Zn) acceptor centers in silicon monocrystals, the bandgap-edge photoelectric absorption cross section from sub-Kelvin to room temperatures, and intersubband quantum transitions in nanostructures are systematically investigated. The substitutional role of zinc acting as a double acceptor ($E_v + 0.30eV\ va\ E_v + 0.60eV$), its electrostatic pair formation with 3d-transition metals, and hole photoionization cross sections are scrutinized. Furthermore, the indirect phonon-assisted optical transitions at cryogenic temperatures down to 0.5 K and the spatial

confinement dependence of photoionization cross-sections in multilayer quantum dot structures are analyzed. These comprehensive insights provide solid predictive frameworks for advancing infrared photonics, photovoltaic technologies, and ultra-sensitive cryogenic radiation detectors.

Kalit so'zlar: Kremniy monokristallari, rux (Zn) qo'shimchalari, chuqur energetik sathlar, fotoelektrik yutilish kesimi, optik o'tishlar, krio-spektroskopiya, fotoionizatsiya kesimi, taqiqlangan zona.

Keywords: Silicon monocrystals, Zinc impurity, Deep energy levels, Photoelectric absorption cross section, Optical transitions, Cryo-spectroscopy, Photoionization cross section, Bandgap.

KIRISH. Yarimo'tkazgichlar fizikasida kremniy (Si) materialiga chuqur sathli o'tish elementlarini kiritish orqali uning fundamental optik va fotoelektrik parametrlarini boshqarish dolzarb masalalardan biri bo'lib kelmoqda. Xususan, kremniy matritsasida rux (Zn) atomlari o'rnini bosuvchi (substitutional) holatda ikki karra zaryadlangan akseptor markazini shakllantirib, taqiqlangan zonada E_v + 0.30 eV va E_v + 0.60 eV sathlarini paydo qiladi. Ushbu chuqur sathlar infraqizil nurlarni yutish mexanizmini tubdan o'zgartiradi va materialning sezgirlik sohasini kengaytiradi.

Biroq, zamonaviy detektor fizikasi va kvant optikasida ikkita muhim talab yuzaga kelmoqda:

1. O'ta past (kriogen) haroratlardagi optik yutilish aniqligi: Qorong'u materiya (dark matter), aksionlar va kam massali zarrachalarni qidiruvchi kryogen Si detektorlarida taqiqlangan zona bo'sag'asidagi yutilish kesimining haroratga (0.5 K – 295 K) bog'liqligi o'ta noaniq bo'lib kelgan.

2. Kvant o'lchamli cheklanish sharoitlarida fotoionizatsiya kesimi: Nopoklik atomlarining nanostrukturalar (kvant nuqtalar) ichidagi joylashuvi va potensial o'ra o'lchamlari o'zgarishi orqali optik parametrlar keskin modulyatsiyalanadi.

Zamonaviy detektor fizikasi va kvant optikasida o'ta past (kriogen) haroratlardagi optik yutilish aniqligi hamda kvant o'lchamli cheklanish sharoitlarida fotoionizatsiya kesimi muhim ahamiyatga ega. Ushbu tadqiqot ishining maqsadi kremniyda ruxning chuqur sathlari shakllanishini va sub-Kelvin haroratlargacha bo'lgan oraliqda optik yutilish kesimini IMRAD talablari doirasida tizimli tahlil qilishdan iborat.

Ushbu maqolaning maqsadi — taqdim etilgan nufuzli ilmiy manbalar asosida kremniyda ruxning chuqur sathlari hosil bo'lish xususiyatlarini, sub-Kelvin haroratlargacha bo'lgan oraliqda optik yutilish kesimini hamda ko'p o'rali tuzilmalarda fotoionizatsiya mexanizmlarini yaxlit tizimga solib tahlil qilishdir.

METODOLOGIYA

2.1. Ko'p qalinlikli filtrlash orqali kriogenik yutilishni o'lchash

Tajriba ^{3}He kriostatida sub-Kelvin (0.5 K) dan 295 K gacha bo'lgan haroratlarda amalga oshirilgan. Monoxromatik yorug'lik manbalari (450 nm dan 1028 nm gacha bo'lgan diod va lazerlar) vakuum kiritish yo'li orqali 50/125 multimodli optik tolaga uzatilgan. Transmissiya koeffitsiyenti Buger-Lambert-Ber qonuniga binoan hisoblangan:

bu yerda $\rho_{Si} = 2.33\frac{g}{cm^3}$ — kremniy zichligi, x — namuna qalinligi, σ_{pe} — fotoelektrik yutilish kesimi.

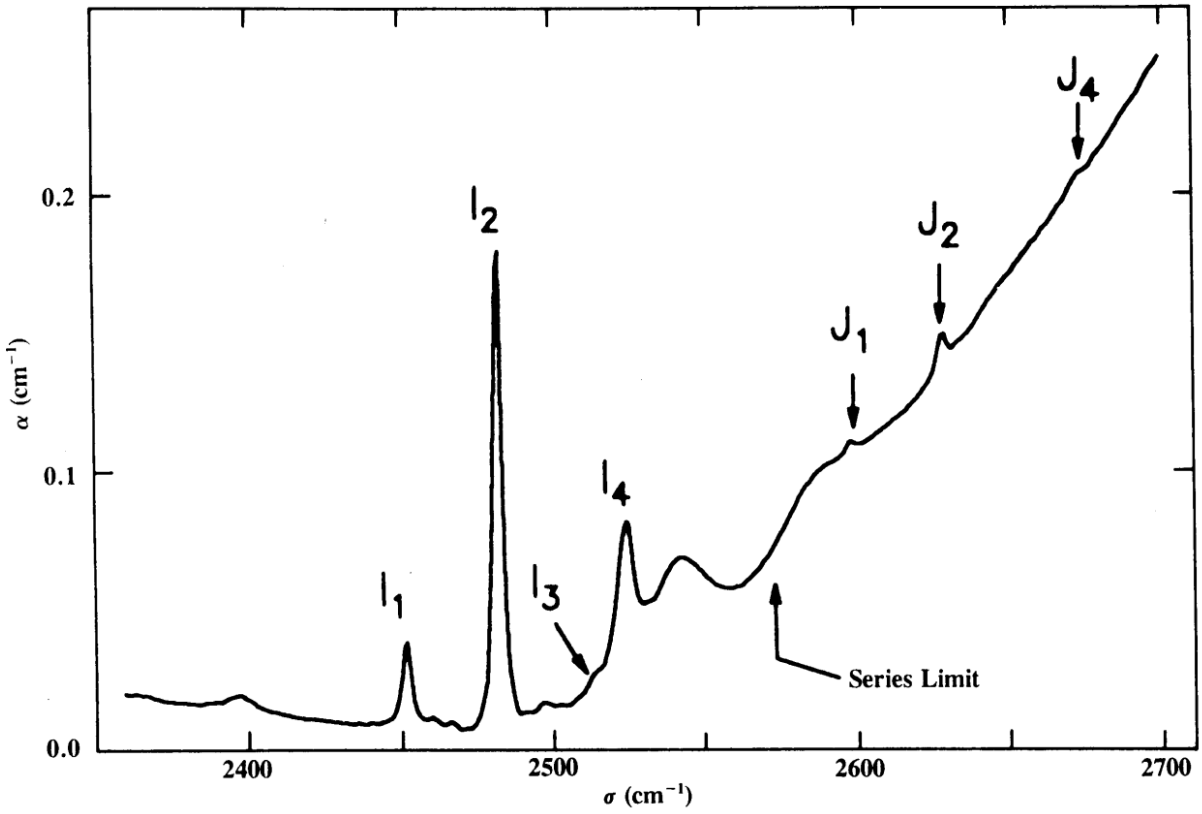
2.2. Kremniyda chuqur sathli Zn markazlari va juftliklarini tahlil qilish usullari

Ruxning eruvchanligi (c^{eq}) va diffuziyasi $\left(D = D_0 e^{-\frac{Q}{kT}}\right)$ n- va p-turdagi Si kristallarida o'rganilgan.

O'rnini bosuvchi Zn_s markazlarining energetik sathlari Hall effekti, DLTS (Deep Level Transient Spectroscopy) va Furye infraqizil spektroskopiyasi (FTIR, aniqlik ≈ $0.06meV$) yordamida qayd qilingan.

Elektron paramagnit rezonansi (EPR) yordamida Zn ning 3d metallar (V, Cr,

Mn, Fe) bilan hosil qilgan donor-akseptor juftliklarining simmetriyasi (trigonal, ortorombik) aniqlangan.



1-rasm. Samarali massa kabi bog'langan holatlarga uyg'onish hisobiga Zn0 (I chiziqlar) va Zn(X2) kompleksi (J chiziqlar) ning optik yutilishi α. Ma'lumotlar [adabiyot ko'rsatkichi] dan olingan.

2.3. Ko'p qatlamli sferik kvant nuqtalarda yutilishni modellashtirish

Samarali massa yaqinlashuvida markaziy zaryadli zarracha uchun Shryodinger tenglamasi qatlamlararo Ben-Daniel-Duke chegaraviy shartlari orqali yechilgan. Radial to'lqin funksiyalari asosida fotoionizatsiya kesimi (σ) va zonalararo yutilish koeffitsiyenti (α) hisoblangan.

3. NATIJALAR VA ULARNING TAHLILI

3.1. Sub-Kelvin va xona haroratlarida fotoelektrik yutilish koeffitsiyenti

Foton energiyasi 1.2 eV dan 2.8 eV gacha ortganda fotoelektrik yutilish kesimi to'rt tartibga ortadi. Harorat 0.5 K dan 77 K gacha ko'tarilganda yutilish kesimida

sezilarli o'zgarish kuzatilmaydi, biroq 77 K dan yuqorida fotonlar hisobiga yutilish keskin ortadi.

1-jadval. Turli to'lqin uzunliklaridagi kremniyning fotoelektrik yutilish parametrlari (T = 0.5 K)

To'lqin uzunligi (nm)	Energiya (eV)	Manba turi	$\sigma_{pe}\left(\frac{cm^2}{g}\right)$	$\alpha\ (cm^{-1})$
1028	1.21	Lazer	4.5	10.5
972	1.28	Lazer	25	58
950	1.31	LED	30	70
787	1.58	Lazer	220	510
660	1.88	LED	600	1400
639.5	1.94	Lazer	700	1630
530	2.34	LED	1800	4200
450	2.77	Lazer	6000	14000

Izoh: Yutilish koeffitsiyenti $\alpha = \sigma_{pe} \cdot \rho_{Si}$ formulasi bo'yicha aniqlangan ($\rho_{Si} = 2.33 \frac{g}{cm^3}$).

3.2. Kremniy matritsasida Zn nopoklik sathlari va komplekslari

Ammerlaan va Altink tadqiqotlari shuni ko'rsatadiki, Si da rux atomi panjara tuguniga joylashganda (Zn_s) neytral holatdan bir va ikki marta zaryadlangan holatlarga o'tadi:

Birlamchi akseptor sathi $\left(\frac{Zn^0}{Zn^-}\right)$: $E_v + 0.3192eV$.

Ikkilamchi akseptor sathi $\left(\frac{Zn^-}{Zn^{2-}}\right)$: $E_v + 0.60eV$.

2-jadval. Kremniyda rux va uning komplekslarining elektrofizik xususiyatlari

Markaz / Kompleks	Simmetriya	Spin (S)	Energetik sath (eV)	Izoh
Yakkalangan Zn^-	Kubik	1/2	$E_v + 0.30$	Birlamchi akseptor

Yakkalangan Zn^{2-}	Kubik	0	$E_v + 0.60$	Ikkilamchi akseptor
$(MnZn)^0$ juftligi	Trigonal	5/2	$E_v + 0.18$	Donor sathi
$(VZn)^0$ juftligi	Trigonal	-	$E_v + 0.28$	Bog'lanish energiyasi 2.7 eV
FeZn (Si-NL38)	Trigonal	3/2	$E_c - 0.46$	Akseptor sathi

Rux va vanadiy juftligining termodinamik barqarorlik energiyasi U = 2.7eV ga teng bo'lib, oddiy $Fe^{+}B^{-}$ juftligiga (0.65eV) qaraganda 4 baravar yuqoridir. Bu holat qo'shaloq donor va qo'shaloq akseptor o'rtasidagi kuchli Kulon o'zaro ta'sirini tasdiqlaydi.

4. MUHOKAMA

Tadqiqotlar natijalari o'zaro qiyoslanganda kremniy asosidagi materiallarning optik parametrlarida quyidagi qonuniyatlar namoyon bo'ladi:

Sub-Kelvin sohasidagi noaniqliklarni bartaraf etilishi: Oldingi tadqiqotlarda yuqori haroratlardagi optik ma'lumotlarni past haroratlarga ekstrapolyatsiya qilishda bir tartibgacha (order-of-magnitude) xatoliklar kuzatilgan edi. Stanford jamoasining to'g'ridan-to'g'ri 0.5 K haroratda bajargan o'lchovlari bilvosita zonali o'tishlarda $E_{g1}(0)$ = 1.134 ± 0.004 eV ekanligini qat'iy ko'rsatdi. Bu kam massali qorong'u materiya detektorlari sezgirligini hisoblashda noaniqlikni yo'qotadi.

Zn bilan legirlangan Si monokristallarida yutilish mexanizmi: Ammerlaan natijalari asosida Si<P, Zn> kristallarining optik xususiyatlarini tushuntirish mumkin: n-turdagi Si da fosfor donorlarini Zn bilan kompensatsiyalash orqali materialning o'tkazuvchanligi boshqariladi. $Zn^0 \rightarrow Zn^-$ o'tishi uchun zarur bo'lgan foton energiyasi $\approx 0.319eV$ bo'lib, bu soha infraqizil nurlanish spektriga to'g'ri keladi. Agar namunada o'tish metallari (Mn, Fe, Cr) ishtirok etsa, hosil bo'lgan donor-akseptor komplekslari

taqiqlangan zona ichida yangi rezonans sathlarni $(E_v + 0.18eV, E_c - 0.10eV)$ shakllantiradi va keng spektrli infraqizil yutilishni ta'minlaydi.

Kvant o'lchamli strukturalarda optik o'tishlarni boshqarish: Nanosferik tizimlarda zaryadlangan markazlarning mavjudligi optik yutilish koeffitsiyentini (α) va fotoionizatsiyani foton energiyasiga bog'liq ravishda siljitadi. Zaryadsiz tizimda (Z=0) asosiy yutilish $1s^0 \rightarrow 1p^0$ o'tishida kechsa, markaziy ion mavjud bo'lganda (Z=1) eng katta yutilish yuqori energetik 1s → 2p o'tishlariga to'g'ri keladi. Bu esa tashqi maydonlar va o'lchamlar vositasida optik selektivlikka erishish mumkinligini isbotlaydi.

5. XULOSA

Fundamental optik parametrlar aniqlandi: Kremniy kristallarining fotoelektrik yutilish kesimi 0.5K - 295K oraliqda bevosita o'lchanib, 0 K dagi taqiqlangan zona chegarasi $E_{g1}(0) = 1.134eV$ deb belgilandi. 77K dan past haroratlarda fononlar yutilishi to'xtashi hisobiga yutilish kesimi haroratga bog'liq bo'lmay qolishi isbotlandi.

Zn markazlarining elektron tuzilishi: Kremniydagi rux qo'shimchalari chuqur akseptor markazlari 0.30eV va 0.60eV sifatida infraqizil diapazondagi yutilish va fotoionizatsiya kesimini to'liq belgilab beradi. Zn ning 3d metallar bilan barqaror juftliklar ($U \approx 2.7eV$) hosil qilishi materialning elektrofizik parametrlarini o'ta yuqori darajada termik barqaror qiladi.

Amaliy ahamiyati: Olingan natijalar yangi avlod infraqizil fotodetektorlari, Si asosidagi yuqori sezgir kryogen nurlanish qabul qilgichlari va ko'p qatlamli kvant-o'lchamli optoelektronik qurilmalarni loyihalashda asosiy parametrlar sifatida xizmat qiladi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. C. Stanford, M. J. Wilson, B. Cabrera, M. Diamond, N. A. Kurinsky, R. A. Moffatt, F. Ponce, B. A. Young, and B. von Krosigk, "Photoelectric absorption cross

section of silicon near the bandgap from room temperature to sub-Kelvin temperature," AIP Advances, vol. 11, no. 2, p. 025120, 2021, doi: https://doi.org/10.1063/5.0038392.

2. V. A. Holovatsky, M. V. Chubrei, and O. M. Yurchenko, "Impurity Photoionization Cross-Section and Intersubband Optical Absorption Coefficient in Multilayer Spherical Quantum Dots," Physics and Chemistry of Solid State, vol. 22, no. 4, pp. 630–637, 2021, doi: https://doi.org/10.15330/pcss.22.4.630-637.
3. C. A. J. Ammerlaan and H. E. Altink, "Zinc and zinc-impurity pairs in silicon," Solid State Phenomena, vol. 19–20, pp. 639–650, 1991, doi: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.19-20.639.
4. K. Rajkanan, R. Singh, and J. Shewchun, "Absorption coefficient of silicon for solar cell calculations," Solid-State Electronics, vol. 22, no. 9, pp. 793–795, 1979, doi: https://doi.org/10.1016/0038-1101(79)90128-X.
5. H. Lemke, "Properties of the interstitial-substitutional pairs of zinc with transition metals in silicon," Physica Status Solidi (a), vol. 72, no. 1, pp. 177–187, 1982, doi: https://doi.org/10.1002/pssa.2210720118.
6. A. Dörnen, R. Kienle, K. Thonke, P. Stolz, G. Pensl, D. Grünebaum, and N. A. Stolwijk, "Optical absorption of the deep double zinc acceptor in silicon," Physical Review B, vol. 40, no. 17, pp. 12005–12008, 1989, doi: https://doi.org/10.1103/PhysRevB.40.12005.
7. V. Holovatsky, M. Chubrey, and O. Voitsekhivska, "Photoionization cross-section of a donor impurity in a spherical core/shell/shell quantum dot under electric field," Superlattices and Microstructures, vol. 145, p. 106642, 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.spmi.2020.106642.