

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

---

**YADRO FIZIKASI INSTITUTI**

**XODJAYEV UTKIRJON OKTAMOVICH**

**$TlIn_{1-x}Fe_x(S,Se)_2$  QATTIQ ARALASHMALI MONOKRISTALLARINING  
OPTIKAVIY, ELEKTROFIZIKAVIY VA FOTOELEKTRAVIY  
XUSUSIYATLARI**

**01.04.07 – Kondensirlangan holat fizikasi**

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

**Toshkent – 2025**

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

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

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

**Xodjayev Utkirjon Oktamovich**

TlIn<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub>(S,Se)<sub>2</sub> qattiq aralashmali monokristallarining optikaviy,  
elektrofizikaviy va fotoelektrikaviy xususiyatlari..... 3

**Ходжаев Уткиржон Октамович**

Оптические, электрофизические и фотоэлектрические свойства  
монокристаллов TlIn<sub>(1-x)</sub>Fe<sub>x</sub>(S,Se)<sub>2</sub> ..... 20

**Khodjaev Utkirjon Oktamovich**

Optical, electrophysical and photoelectric properties of  
TlIn<sub>(1-x)</sub>Fe<sub>x</sub>(S,Se)<sub>2</sub> monocrystals ..... 37

**E‘lon qilingan ishlar ro‘uxati**

Список опубликованных работ  
List of published works ..... 42

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

---

**YADRO FIZIKASI INSTITUTI**

**XODJAYEV UTKIRJON OKTAMOVICH**

**$TlIn_{1-x}Fe_x(S,Se)_2$  QATTIQ ARALASHMALI MONOKRISTALLARINING  
OPTIKAVIY, ELEKTROFIZIKAVIY VA FOTOELEKTRAVIY  
XUSUSIYATLARI**

**01.04.07 – Kondensirlangan holat fizikasi**

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

**Toshkent – 2025**

**Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2024.2.PhD/FM1118 raqam bilan ro'yxatga olingan.**

Dissertatsiya O'zbekiston Respublikasi Fanlar Akademiyasi Yadro fizikasi institutida bajarilgan.  
Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengash veb-sahifasi (www.inp.uz) va "ZiyoNet" axborot-ta'lim tarmog'ida (www.ziynet.uz) joylashtirilgan.

**Ilmiy rahbar:**

**Nuritdinov Izzatullo**  
fizika-matematika fanlari doktori, professor

**Rasmiy opponenlar:**

**Rajabov Sali Ashirovich**  
fizika-matematika fanlari doktori, katta ilmiy xodim

**Parpiyev Adxamjon Sobirjanovich**  
fizika-matematika fanlari bo'yicha PhD,  
katta ilmiy xodim

**Yetakchi tashkilot:**

**Farg'ona politexnika instituti**

Dissertatsiya himoyasi Yadro fizikasi instituti huzuridagi DSc.02/30.12.2019.FM/T.33 raqamli Ilmiy kengashning 2025 yil "\_\_\_" \_\_\_\_\_ soat \_\_\_ dagi majlisida bo'lib o'tadi (Manzil: 100214, Toshkent sh., Ulug'bek qo'rg'oni; tel.: (+99871)289-31-41; faks: (+99871)289-36-65; e-mail: info@inp.uz).

Dissertatsiya bilan Yadro fizikasi institutining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (\_\_\_\_\_ raqam bilan ro'yxatga olingan). Manzil: 100214, Toshkent sh., Ulug'bek qo'rg'oni; tel.: (+99871) 289-31-19.

Dissertatsiya avtoreferati 2025 yil "\_\_\_" \_\_\_\_\_ da tarqatildi.  
(2025 yil "\_\_\_" \_\_\_\_\_ dagi \_\_\_ raqamli reestr bayonnomasi).

**M.Yu. Tashmetov**  
Ilmiy darajalar beruvchi  
ilmiy kengash raisi,  
t.-m.f.d., professor

**O.R. Tojiboyev**  
Ilmiy darajalar beruvchi  
ilmiy kengash ilmiy kotibi, f.-m.f. PhD,  
katta ilmiy xodim

**E.M. Tursunov**  
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.** Bugungi kunda dunyoda tadqiqotchilar tomonidan ham, amaliyotchilar tomonidan ham  $A^{III}B^{III}C_2^{VI}$  turdagi yaqqol qatlamli tuzilishga ega bo'lgan talliy xalkogenid birikmalari kristallariga qiziqish ortib bormoqda. Bu oiladagi kristallarning o'ziga xos xususiyati ularning ham yarimo'tkazgich, ham tenzorezistiv xossalarni namoyon etishidir. Ushbu turdagi birikmalarning kristall tuzilishi qatlamli bo'lgani sababli, bu, odatda ularning fizik xususiyatlariga sezilarli ta'sir ko'rsatuvchi politipik o'zgarishlarning shakllanishiga olib keladi. Bu birikmalarning kristallari amaliy qo'llanilishi nuqtayi nazaridan jozibador bo'lib, ular asosida fotoelektrik o'zgartiruvchilar, spektr analizatorlar hamda rentgen, gamma va neytron nurlanishlari detektorlarini tayyorlash uchun istiqbolli materiallar hisoblanadi. Shuningdek, ushbu materiallarning xossalarni maqsadli boshqarish usullarini ishlab chiqish muhim ahamiyat kasb etadi.

Bugungi kunda dunyoda  $A^{III}B^{III}C_2^{VI}$  turdagi legirlangan qatlamli va zanjirsimon kristallarning radiatsion jarayonlarini o'rganishga katta e'tibor berilmoqda. Buning sababi, qattiq jismlarning xususiyatlarini boshqarishning eng samarali usullaridan biri ularning tarkibiga kirindilar kiritish hamda turli xil yadroviy va ionlashtiruvchi nurlanishlar yordamida ularning xossalarni maqsadli o'zgartirishdir.

So'nggi yillarda Respublikamizda legirlangan murakkab yarimo'tkazgichli materiallarni tadqiq qilish katta qiziqish uyg'otmoqda, bu materiallarning xossalarni maqsadli boshqarish usullarini ishlab chiqish muhim ahamiyatga ega bo'lib, mamlakatimizda ilm-fanni rivojlantirish va uni amaliyotda keng qo'llashning boshqa yo'nalishlari bilan bir qatorda yangi O'zbekistonning 2022-2026-yillarga mo'ljallangan taraqqiyot strategiyasida o'z aksini topgan.

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-son "2022-2026-yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to'g'risida", 2017-yil 16-fevraldagi PF-4958-son "Oliy o'quv yurtidan keyingi ta'lim tizimini yanada takomillashtirish to'g'risida"gi farmonlari, 2017-yil 17-fevraldagi PQ-2789-son "Fanlar akademiyasi faoliyati, ilmiy tadqiqot ishlarini tashkil etish, boshqarish va moliyalashtirishni yanada takomillashtirish chora-tadbirlari to'g'risida"gi Qarori hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa me'yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiya tadqiqoti muayyan darajada xizmat qiladi.

**Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga mosligi.** Mazkur tadqiqot ish respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining II."Energetika, energiya tejamkorligi va muqobil energiya manbalari" ustuvor yo'nalishiga muvofiq bajarilgan.

**Muammoning o'rganilganlik darajasi.** Bugungi kunda dunyodagi yirik ilmiy markazlarning yetakchi mutaxassislari, shu jumladan, amerikalik (T.J.Isaacs), yaponiyalik (S.Kashida, Y.Kobayashi, R.Matsumoto), germaniyalik (H.Hahn, W.Henkel, D.Muller, F.Poltmann), shveytsariyalik (E.Mooser), isroillik

(E.Mooser, A.M.Panich), turkiyalik (I.Guler, N.M.Gasanly), ozarbayjonlik (K.R.Allohverdiyev, A.E.Baxishev, G.D.Guseynov, G.B.Abdullayev, S.N.Mustafoyeva, N.Mamedov, V.D.Rustamov, E.M.Kerimova, E.M.Gojayev), ukrainalk (A.V.Gomonnai, Yu.M.Azhniuk, I.Petryshynets, O.O.Gomonnai), rossiyalik (V.M.Burlakov, E.A.Vinogradov), belarus (A.U.Sheleg, V.G.Gurtova), moldovalik (V.V.Mushinskiy, M.I.Karaman), o'zbekistonlik (S.X.Umarov, I.Nuritdinov, M.Y.Tashmetov, J.J. Ashurov, F.K.Hallokov) va boshqalar  $A^{III}B^{III}C_2^V$  tipidagi ko'p komponentli xalkogenid birikmalarining yetarlicha toza, birjinsli va turli xil aralashmalar bilan legirlangan yuqori sifatli kristallarini o'stirish texnologiyalarini ishlab chiqdilar, ushbu oiladagi ko'plab kristall birikmalarining kristall tuzilishlari aniqlandi, elektrofizik, fotovoltaik, ferroelektrik, dielektrik, spektral-optik, magnit va boshqa xususiyatlari juda yaxshi o'rganildi. Natijalar shuni ko'rsatdiki, bu birikmalar istiqbolli yarimo'tkazgich materiallari bo'lib, keng qamrovli tizimli tadqiqotlarni talab qiladi.

Qattiq jismlarning xususiyatlarini boshqarishning kuchli usullaridan biri bu ularning tarkibiga kirishmalar kiritish, shuningdek, ularni har xil turdagi yadroviy va ionlashtiruvchi nurlar bilan nurlantirishdir, bu esa legirlangan va nurlantirilgan materiallardagi fizikaviy jarayonlarni maqsadli o'rganishni talab qiladi. Ammo  $A^{III}B^{III}C_2^V$  turdagi xalkogenid birikmalarida, ayniqsa, legirlangan namunalardagi radiatsiyaviy hodisalar juda kam va tizimsiz o'rganilgandir. Mavjud ma'lumotlar ham ba'zan bir-biriga qarama-qarshi keladi.

**Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan ilmiy-tadqiqot muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog'liqligi.** Dissertatsiya ishi O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Yadro fizikasi instituti ilmiy-tadqiqot tadqiqot ishlari rejasining FA-F2-F065-F071 "O'rinbosar va kiritma qattiq eritmalarda termo va radiatsion-stimullangan hodisalar" (2007–2011), O'zbekiston Prezidentning 2019-yil 21-noyabrdagi PP-4526-son qarori bilan tasdiqlangan Yadro fizikasi instituti ilmiy-tadqiqot ishlar dasturi doirasida "Sintsillyatorlar va diodli nasosli lazerlar uchun istiqbolli keng zonali oksidli va ftoridli qattiq jisimli materiallarda radiatsion-stimullangan hodisalar va spektral-lyuminescent xususiyatlar" (2020–2024) mavzusidagi loyihalari doirasida bajarilgan.

**Tadqiqotning maqsadi**  $TlIn_{(1-x)}Fe_xS_2$  va  $TlIn_{(1-x)}Fe_xSe_2$  qattiq eritmalarining kristall strukturasi, elektrofizik, fotoelektrik va optik xossalariiga temir kirishmasi konsentratsiyasi hamda ionlashtiruvchi nurlanishlarning ta'sirini aniqlashdan iborat.

#### **Tadqiqotning vazifalari:**

o'stirilgan o'zgaruvchan tarkibli kristallarning rastri elektron-mikroskopik va zondli mikrorentgenospektroskopik tahlillarini o'tkazish, ularning o'sish jarayonida stexiometriyadan og'ish va birjinslilikning buzilish darajasini aniqlash; rentgenostrukturaviy tahlil yordamida gamma va elektron nurlanishlar ta'siri hamda indiy ionlarining temir ionlari bilan qisman almashinishi natijasida  $TlIn_{(1-x)}Fe_xSe_2$  kristallari panjara parametrlarining simmetriyasini va o'zgarish xarakterini aniqlash;

elektronlar bilan nurlantirishdan oldin va nurlantirilgandan keyin  $\text{TlIn}_{(1-x)}\text{Fe}_x\text{Se}_2$  kristallarning elektr, fotoelektr va optikaviy xususiyatlariga In ionlarining Fe ionlariga almashinishining ta'sirini o'rganish;

o'stirilgan yangi qatlamli yarimo'tkazgich kristallarining amaliy xususiyatlari va texnikaviy qo'llanilish istiqbollarini aniqlash.

**Tadqiqotning obyekti** sifatida  $\text{TlIn}_{(1-x)}\text{Fe}_x\text{S}_2$ ,  $\text{TlIn}_{(1-x)}\text{Fe}_x\text{Se}_2$  murakkab xalkogenid kristallarining qattiq eritmalari olingan.

**Tadqiqotning predmetini**  $\text{TlIn}_{(1-x)}\text{Fe}_x\text{S}_2$ ,  $\text{TlIn}_{(1-x)}\text{Fe}_x\text{Se}_2$  murakkab xalkogenid kristallarining qattiq eritmalari kristall tuzilishi, sirt morfologiyasi, elektrofizik, fotoelektrik va optik xossalari tashkil etadi.

**Tadqiqot usullari:** rentgen difraksiyasi, to'liq profilli tahlil (Ritveld), optik va fotoelektrik spektroskopiya, rastrli elektron-mikroskopik va zondli mikrorentgen-spektral tahlil usullari, atom-kuch va skanerlovchi elektron mikroskopiya.

**Tadqiqotning ilmiy yangiligi** quyidagilardan iborat:

$\text{TlIn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Se}_2$  ( $x = 0-0.02$ ) qattiq eritmalari  $I4/mcm$  fazoviy guruhli tetragonal singoniya asosida  $a = 8.068 \text{ \AA}$ ,  $b = 8.068 \text{ \AA}$ ,  $c = 6.816 \text{ \AA}$  parametrlari bilan bir fazali,  $\text{TlIn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{S}_2$  qattiq eritmalari ( $x = 0-0.01$ ) esa  $P2/m$  fazoviy guruhli, panjara parametrlari  $a = 10.896 \text{ \AA}$ ,  $b = 10.896 \text{ \AA}$ ,  $c = 15.173 \text{ \AA}$  bilan monoklin singoniya asosida kristallanishi aniqlangan: kristallarni Fe aralashmasi bilan legirlashda ularning bir fazaliligi, singoniyasi va fazoviy guruhlari saqlanib qoladi, bunda aralashma konsentratsiyasining ortishi bilan kristall panjaraning parametrlari asta-sekin kamayadi;

$\text{TlIn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Se}_2$  qattiq eritmalarida kichik dozalar (radiatsion silkinish) hodisasi aniqlangan: namunalarni  $^{60}\text{Co}$  manbaining gamma nurlari bilan  $10^7$  Rad dozagacha nurlantirish, shuningdek, elektronlar bilan  $5 \times 10^{15}$  elektron/ $\text{sm}^2$  flyuyensgacha nurlantirilganda, qattiq eritmalarning elementar yacheykasi parametrlari kamayadi, ularning taqiqlangan zonalarining kengligi  $E_g$  ortadi. Nurlanish dozasi yanada ortganda esa kristall panjaralar parametrlarining qiymatlari ortadi, taqiqlangan zonalarining kengligi  $E_g$  esa kamayadi;

temir ionlari bilan legirlash, shuningdek, gamma nurlari va elektronlar bilan nurlantirish  $\text{TlInSe}_2$  monokristallari hamda  $\text{TlIn}_{0,98}\text{Fe}_{0,02}\text{Se}_2$  qattiq qorishmalarining sirt morfologiyasini kuchli o'zgartirishi aniqlangan:  $\text{TlInSe}_2$  kristallariga temir kirishmalarining kiritilishi sirtning holatini yaxshilashga, profilning o'rtacha arifmetik og'ishining maksimal qiymatini kamaytirishga, shuningdek, o'rtacha g'adir-budirlik balandligining pasayishiga olib keladi,  $5 \times 10^{16}$  elektron/ $\text{sm}^2$  flyuyensli elektronlar bilan nurlantirish esa ham legirlanmagan, ham legirlangan kristallarda sirt holatini sezilarli darajada yomonlashtiradi;

temir ionlari konsentratsiyasining ortishi bilan o'rganilayotgan tarkiblar qattiq eritmalari monokristallarining solishtirma qarshiligi  $\rho$ , taqiqlangan soha kengligi  $E_g$ , spektral fotosezgirlik maksimumi  $(h\nu)_{\text{max}}$  ortishi aniqlangan.

**Tadqiqotning amaliy natijalari** quyidagilardan iborat:

$\text{TlInSe}_2$  monokristallariga temir kirishmalarining kiritilishi profilning o'rtacha arifmetik og'ishlarining maksimal qiymatlarini ( $R_a=40.9 \text{ nm}$  dan  $R_a=17.7 \text{ nm}$

gacha) kamaytirishga, shuningdek, o'rtacha g'adir-budurlik balandligining pasayishiga ( $R_z=398.1$  nm dan  $R_z=189.9$  nm gacha) olib keladi, bu esa ushbu material sirtining holatini yaxshilaydi.

**Tadqiqot natijalarining ishonchligi** zamonaviy ilmiy tadqiqot usullari, yuqori aniqlikdagi uskunalari, o'rganilayotgan namunaning strukturaviy, elektrofizik, fotoelektrik va optik parametrlarini o'lchash uchun standart aniqlik hamda yuqori sezgirlikka ega asboblardan foydalanish, tajribalarda zarur statistik ma'lumotlar to'plamini olish, olingan natijalarni boshqa, mustaqil tadqiqotchilarning natijalari bilan tasdiqlash, olingan ma'lumotlarning umumfizikaviy qonunlarga va mavjud sinovdan o'tgan fizik modellarga mos kelishligi bilan ta'minlanadi.

**Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati** temir kirishmasi konsentratsiyasining, gamma nurlantirishlar va tezlashtirilgan elektronlar dozalarining  $\text{TlInSe}_2$ ,  $\text{TlIn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Se}_2$ ,  $\text{TlInS}_2$ ,  $\text{TlIn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{S}_2$  kristallarining kristall tuzilishga, sirt holatiga, elektrofizik, fotovoltaik va optik xususiyatlariga ta'sirining belgilangan qonuniyatlarining aniqlanishi bilan belgilanadi, bular ko'p komponentli keng zonali yarimo'tkazgich qattiq eritmalarga nisbatan mavjud nazariy ishlanmalarni rivojlantirishga, xususan, turli xil kirishmalar ta'sirining nazariy masalalarini ishlab chiqish, tezlashtirilgan elektronlar va gamma nurlanishining ta'siri ostida radiatsiyaviy nuqsonlarning shakllantirishi masalalarini oydinlashtirishga imkon beradi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati  $\text{TlIn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Se}_2$  monokristallari qattiq eritmalarning tuzilishi, elektrofizik, fotoelektrik va optik xossalari temir konsentratsiyasining o'zgarishi, gamma-nurlari va tezlashtirilgan elektronlar ta'siriga barqarorligini aniqlashdan iborat bo'lib, bu ularni elektronika sanoati uchun radiatsiyaga chidamli istiqbolli yarimo'tkazgich materiallar sifatida ko'rib chiqishga zamin yaratadi.

**Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi.**  $\text{TlInSe}_2$ ,  $\text{TlInS}_2$  va  $\text{TlIn}_{1-x}\text{Fe}_x(\text{S},\text{Se})_2$  monokristallarining strukturaviy, optik, elektrofizik va fotoelektrik xossalari tadqiq qilish bo'yicha olingan natijalar asosida:

tetragonal tuzilishga ega  $\text{TlIn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Se}_2$  monokristallida (faz.gr.  $I4/mcm$ ) va monoklin singoniyali  $\text{TlIn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{S}_2$  ( $x=0-0.01$ ) qattiq eritmasida (faz.gr.  $P2/m$ ,  $\beta=100^\circ$ ) bir fazali holatlarni o'rnatish;

$\text{TlInSe}_2$  va  $\text{TlInS}_2$  kristallarini temir ionlari bilan legirlashda sirt holatini yaxshilash;

$\text{TlIn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{S}_2$  qattiq qorishma monokristallarining temir ionlari konsentratsiyasi ortishi bilan solishtirma qarshilik  $\rho$ , taqiqlangan zona kengligi  $E_g$ , spektral fototok  $(hv)_{\max}$  maksimumlari holatlari ortishi aniqlangani Ozarbayjon Respublikasi Fan va ta'lim vazirligi Fizika institutining "TlGaS(Se)<sub>2</sub>-Nd<sub>2</sub>S(Se)<sub>3</sub>, (TlGaSe<sub>2</sub>)<sub>x</sub>(TlBiSe<sub>2</sub>)<sub>1-x</sub>, TlGaS<sub>2</sub>-TlGaSe<sub>2</sub>, TlGaSe<sub>2</sub>-TlGaS<sub>2</sub>, TlInS<sub>2</sub> - TlInSe<sub>2</sub> sistemalar kristallofizikasi va ularga nodir yer elementlarining ta'siri" mavzusidagi tadqiqotlari doirasida foydalanilgan (Ozarbayjon Respublikasi Fan va ta'lim vazirligi Fizika institutining 25.11.2024-yildagi №029-08/476-son ma'lumotnomasi). Ilmiy natijalardan foydalanish murakkab yarimo'tkazgichlarning fizik xossalari, ularning tarkibi va

kirishmalar miqdoriga bog'liqligini tahlil qilish imkonini bergan; nodir yer kirishmalari bilan legirlashda  $\text{TlInS}_2$  va  $\text{TlInSe}_2$  qattiq qorishmalarining kristall panjaralari parametrlarining o'zgarish xarakterini aniqlashtirish, shuningdek, boshqa kirishmalar bilan legirlashda ushbu kristallarning sirt holatini yaxshilash imkonini bergan;

$\text{TlInSe}_2$  kristallarining Fe (2 mol.% gacha) aralashmasi bilan legirlanganda ularning bir fazaliligi, singoniyasi va fazoviy guruhi saqlanib qolishi, sirt holati yaxshilanishi, kristall panjara parametrlari kamayishi aniqlangan. Elektronlar bilan nurlantirilganda ( $5 \cdot 10^{15}$  el/sm<sup>2</sup> gacha) elementar yacheyka parametrlari kamayishi va taqiqlangan zona kengligi oshishi kuzatilgan. Olingan natijalardan xorijiy olimlar tomonidan foydalanilgan (xorijiy ilmiy jurnallarda iqtibos: Journal of Modern Physics B., 2024. – P. 2550103; Materials Research Innovations, 2024. – P. 1-5; Eurasian Physical Technical Journal, 2024. V. 21. No 2 (48). – P. 5-13). Ilmiy natijalarning qo'llanilishi  $\text{TlInSSe}$ ,  $\text{ZnSe}$  va  $\text{Md}_2\text{Zn}_2\text{O}_7$  turdagi kristallarni kirishmalar bilan legirlash va ionlashtiruvchi nurlanish ta'sirida ularning kristall panjara parametrlari, taqiqlangan zona kengligi va sirt holatlarining o'zgarish mexanizmlarini asoslash imkonini bergan.

**Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi.** Dissertatsiya ishining asosiy natijalari 11 ta xalqaro va respublika ilmiy-amaliy anjumanlarida ma'ruza qilingan hamda muhokamadan o'tkazilgan.

**Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi.** Dissertatsiya mavzusi bo'yicha jami 11 ta ilmiy ish chop etilgan, shulardan, Oliy attestatsiya komissiyasining doktorlik dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 4 ta maqola, jumladan, 1 tasi xorijiy ilmiy jurnallarda.

**Dissertatsiya ishining tuzilishi va hajmi.** Dissertatsiya kirish, to'rtta bob, xulosa va foydalanilgan adabiyotlar ro'yxatidan iborat. Dissertatsiyaning hajmi 107 betni tashkil qiladi.

## DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

**Kirish qismida** dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati asoslangan, tadqiqotning O'zbekiston Respublikasi fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga mosligi ko'rsatilgan, muammoning o'rganilganlik darajasi bayon etilgan, tadqiqotning maqsadi va vazifalari, obykti, predmeti va usullari tavsiflangan, tadqiqotning ilmiy yangiligi va amaliy natijalari bayon qilingan, olingan natijalarning ilmiy va amaliy ahamiyati ochib berilgan, tadqiqot natijalarini amaliyotga joriy qilish, nashr etilgan ishlar va dissertatsiya tuzilishi bo'yicha ma'lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiyaning " **$\text{TlInS}_2$ ,  $\text{TlInSe}_2$  monokristallari va ular asosidagi qattiq qorishmalarining fizik-kimyoviy xossalari**" deb nomlangan birinchi bobida tadqiq qilinayotgan  $\text{TlInS}_2$ ,  $\text{TlInSe}_2$  monokristallari va ular asosidagi qattiq eritmalarining kristall tuzilishi, fotoelektrik, elektrofizik va optik xossalari, kirishmalar va ionlashtiruvchi nurlanishlarning tadqiq qilinayotgan kristallar hamda qattiq eritmalarining xarakteristikalariga ta'siri bo'yicha adabiyotlar sharhi

keltirilgan. Adabiyot materiallari tahlili asosida tadqiqotning maqsadi va vazifalari shakllantirilgan.

Dissertatsiyaning **“Monokristallarni olish texnologiyasi, fazaviy tahlillar va o‘lchashlar metodikasi”** deb nomlangan ikkinchi bobida fazaviy muvozanat masalalari, monokristallarni sintez qilish va o‘stirish texnologiyalari, o‘stirilgan  $\text{TlIn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Se}_2$ ,  $\text{TlIn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{S}_2$  tizim kristallarining mukammalligini nazorat qilish masalalari bayon etilgan. Sintez uchun boshlang‘ich komponentlar sifatida o‘ta toza Tl, In, Fe, Se va S elementlaridan foydalanilgan. Sintez qilingan birikmalarning monokristallari takomillashtirilgan Brijmen usulida o‘stirilgan. Namunalar 2 MeV energiyali va  $0.085 \text{ mA/cm}^2$  tok zichligiga ega bo‘lgan elektronlar bilan nurlantirish O‘zR FA Yadro fizikasi institutidagi “Elektronika U-003” tezlatgichida, gamma nurlari bilan nurlantirish esa  $^{60}\text{Co}$  gamma nurlari manbasida amalga oshirildi. Elektronlar energiyasi namunaning zichligi va qalinligidan kelib chiqib tanlandi hamda alyuminiydan tayyorlangan standart o‘lchash ponasi (P4701) Riso 2 Piece Aluminum (Belgiya) yordamida aniqlandi. Namunalar elektronlar dastasi yo‘nalishiga perpendikulyar ravishda tezlatgich yoyilmasidan 0.4 m masofada o‘rnatildi va  $1.5 \times 10^{17}$  elektron/ $\text{cm}^2$  elektronlar flyuyensida nurlantirildi.

Rentgenodifraksion tadqiqotlari Malvern Panalytical Empyrean difraktometrda amalga oshirildi. Rentgen difraksiyasi spektrlari Malvern Panalytical Empyrean analitik difraktometri yordamida  $\text{CuK}_\alpha$  ( $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$ ) nurlanish generatori kuchlanishi 45 kV, emissiya toki – 40 mA bo‘lganda Bregg – Brentano dastasi geometriyasida  $2\theta = 20^\circ - 120^\circ$  oraliqda 0.33 grad/min uzluksiz skanerlash tezligi bilan qayd etildi.

Rentgenstrukturaviy tahlil ma’lumotlari FullProf dasturi yordamida Ritveld usuli bilan qayta ishlandi.

Namunalardan kukun holatida olingan rentgen-difraksion ma’lumotlar asosida Debay–Sherrer formulasi bo‘yicha kristallitlar o‘lchami aniqlandi:

$$D = K\lambda / (\beta \cos \theta) \quad (1)$$

bunda D – kristallitlarning o‘rtacha o‘lchami, K – geometrik koeffitsiyent ( $K= 0.9$ ),  $\lambda$  - rentgen nurlari to‘lqin uzunligi ( $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ ),  $\beta$  – yarim balandlikdagi difraksion refleks kengligi (FWHM),  $\theta$  – difraksiya burchagi.

Dislokatsiya zichligi quyidagi tenglamadan aniqlandi:

$$\delta = 1 / D^2 \quad (2)$$

Kristallardagi mikrokuchlanishi qiymati Stoks–Vilson tenglamasi bo‘yicha hisoblangan:

$$\varepsilon = \beta / (4 \tan \theta) \quad (3)$$

Namunalar yuzasi relefining uch o‘lchamli tasviri SPM 9700HT (Shimadzu) skanerlovchi zondli mikroskopda olingan. Tadqiqotlar skanerlovchi zondli mikroskopning kontakt rejimida o‘tkazildi. Buning uchun 30x30 mkm o‘lchamdagi namuna uchastkasi tanlandi va nurlantirishdan oldin va keyin "cho‘qqilar" soni, ularning yarim kengligi va balandligi aniqlandi. Keyinchalik

matnda quyidagi belgilardan foydalanamiz:  $R_a$  – bazaviy uzunlik doirasida eng kichik kvadratlar usuli bilan o‘tkazilgan profilning o‘rta chizig‘idan o‘rtacha arifmetik chetlanishi,  $R_z$  – 10 ta nuqta bo‘yicha profil notekisliklarining balandligi, ya’ni bazaviy uzunlik doirasida profilning beshta eng katta bo‘rtig‘ining mutlaq balandliklari va profilning beshta eng katta chuqurligining o‘rtacha qiymati. Sirtning g‘adir–budirligini tavsiflovchi notekisliklarni ajratish va uning parametrlarini miqdoriy aniqlash uchun ishlatiladigan chiziqning uzunligi bazaviy uzunlik hisoblanadi.

Monokristallarning optik yutilishi “Lambda-35” UF-B spektrofotometri (Perkin Elmer) yordamida 190-1100 nm to‘lqin uzunliklari oralig‘ida o‘rganildi. Yutilish spektrlari bo‘yicha kristallarning taqiqlangan zonasi kengligini aniqlash uchun Taus munosabatidan foydalanildi:

$$(\alpha hv)^2 = A(hv - E_g) \quad (4)$$

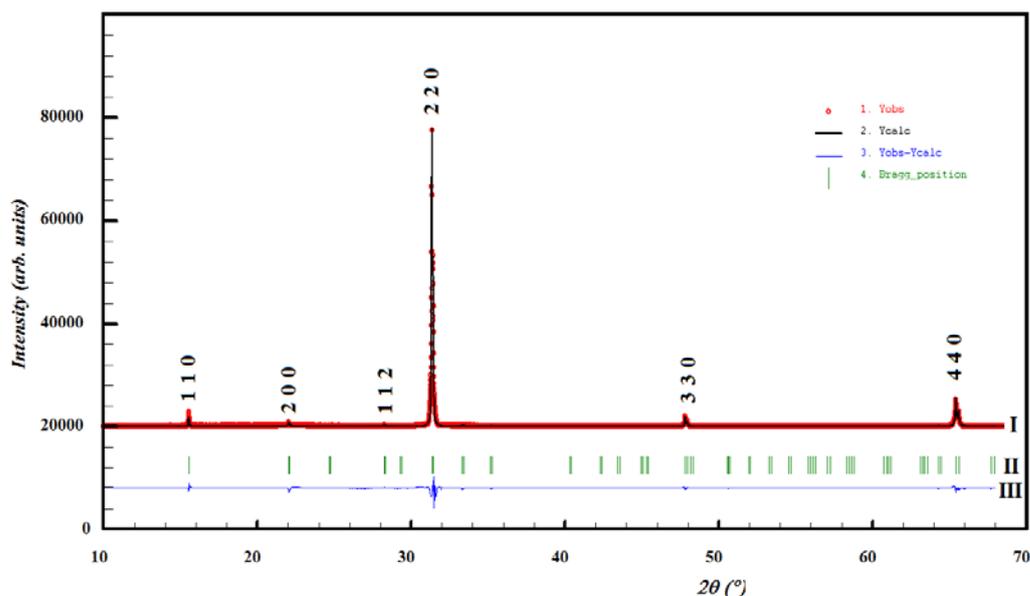
bu yerda  $E_g = hc/\lambda$  – taqiqlangan zona optik kengligining energiyasi,  $h$  – Plank doimiysi ( $6.626 \times 10^{-34}$  Dj·s),  $s$  – yorug‘lik tezligi ( $3 \times 10^8$  m/s),  $\lambda$  – yutilgan to‘lqin uzunligi,  $\alpha$  – yutilish koeffitsiyenti,  $hv$  – tushayotgan fotonning eV dagi energiyasi,  $A$  – polosa chetining tikligi doimiysi.

Shuningdek, dissertatsiya ishida foydalanilgan kristallarning fizik xossalarini o‘rganishning rastri elektron-mikroskopik va elektron-mikrozond tahlili, elektrofizik va fotoelektrik xarakteristikalarini o‘lchash, sirt mikrorelyefi va namunalarni nurlantirish kabi usullari qisqacha ko‘rib chiqilgan.

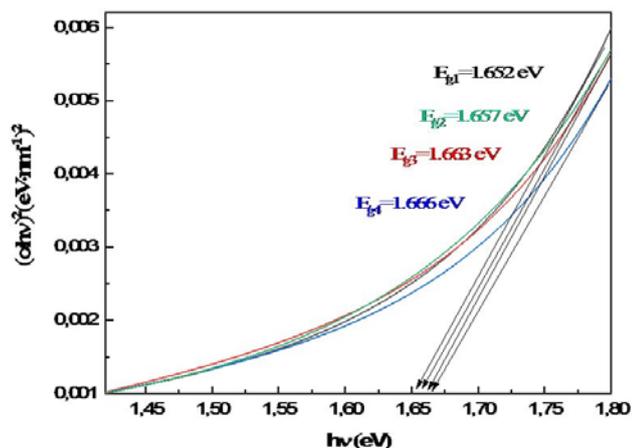
Dissertatsiyaning **“TlIn<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub>Se<sub>2</sub> monokristallarining kristall strukturasi, sirt mikrorelyefi va taqiqlangan zona kengligiga ionlashtiruvchi nurlanishning ta’siri”** deb nomlangan uchinchi bobida tadqiq qilinayotgan TlIn<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub>Se<sub>2</sub> monokristallarining rentgen difraksion xarakteristikalarini o‘lchash va qayta ishlash natijalari, taqiqlangan zona kengliklari va sirt mikrorelyefi keltirilgan.

Bir xil sharoitlarda olingan TlInSe<sub>2</sub> va TlIn<sub>0,98</sub>Fe<sub>0,02</sub>Se<sub>2</sub> monokristallarining rentgenodifraksion ma’lumotlarini o‘lchash hamda qayta ishlash natijalari 1-rasmda keltirilgan. Sintez qilingan namunalar bir fazali ekanligi aniqlandi. Rentgenogrammalardan hisoblangan tekisliklararo masofalarni tetragonal singoniya asosida bir qiymatli indekslash mumkin, ya’ni panjara parametrlari quyidagi qiymatlarga ega:  $a \sim b = 8.0677 \text{ \AA}$ ,  $c = 6.8155 \text{ \AA}$ , (fazo. gr. *I4/mcm*)  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ .

TlIn<sub>0,98</sub>Fe<sub>0,02</sub>Se<sub>2</sub> kristalining elementar yacheykasi parametrlari  $5 \times 10^{15}$  elektron/sm<sup>2</sup> flyuyensgacha bo‘lgan oraliqda elektronlar ta’sirida kamayishi, taqiqlangan zona kengligi  $E_g$  esa ortishi aniqlandi. Elektronlar flyuyensining yanada yuqoriroq qiymatga ortishi bilan kristallning taqiqlangan zonasi  $E_g$  ning kengligi esa kamayadi (2-rasm, 1-jadval).



**1-rasm. Dastlabki TIIn<sub>0,98</sub>Fe<sub>0,02</sub>Se<sub>2</sub> monokristalining rentgenogrammasi: I – eksperimental va hisoblangan ma’lumotlar; II – Bregg akslantirishlari; III – tajriba va hisoblash ma’lumotlari orasidagi ayirma egri chizig’i.**



**2-rasm. Turli elektron flyuyenslarida nurlantirilgan TIIn<sub>0,98</sub>Fe<sub>0,02</sub>Se<sub>2</sub> monokristallarining yutilish spektrlari: 1 - dastlabki; 2 -  $5 \times 10^{14}$  el/sm<sup>2</sup>; 3 -  $5 \times 10^{15}$  el/sm<sup>2</sup>; 4 -  $5 \times 10^{16}$  el/sm<sup>2</sup>**

Kuzatilayotgan holat past dozalar hodisasi nuqtayi nazaridan tushuntiriladi: qattiq jismlarga ionlashtiruvchi nurlar bilan ta’sir ettirilganda, ularda barqaror strukturaviy nuqsonlarga qaraganda 1-2 tartibga ko‘proq chastota bilan noturg’un Frenkel juftlari hosil bo‘ladi.

**1-jadval**

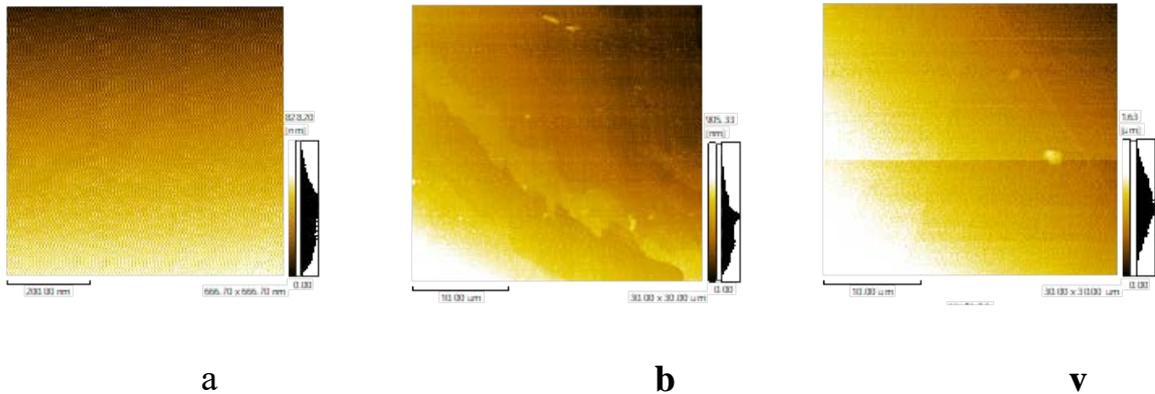
**Tezlashtirilgan elektronlar ta'sirida  $\text{TlIn}_{0,98}\text{Fe}_{0,02}\text{Se}_2$  kristallarining panjara parametrlari va taqiqlangan zona kengligining o'zgarishi [77]**

<b>№ n/n</b>	<b>Nurlanish dozasi, Ei/sm<sup>2</sup></b>	<b>Singoniya</b>	<b>Panjara parametrlari</b>	<b>E<sub>g</sub>, eV</b>
1	nurlantirilmagan	I4/mcm tetragonal	$a = 8.068;$ $b = 8.068;$ $c = 6.816;$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^0$	1,652
2	$5 \times 10^{14}$	I4/mcm tetragonal	$a = 8.061;$ $b = 8.061;$ $c = 6.795;$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^0$	1,657
3	$5 \times 10^{15}$	I4/mcm tetragonal	$a = 8.056;$ $b = 8.056;$ $c = 6.771;$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^0$	1,666
4	$5 \times 10^{16}$	I4/mcm tetragonal	$a = 8.062;$ $b = 8.062;$ $c = 7.136;$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^0$	1,663

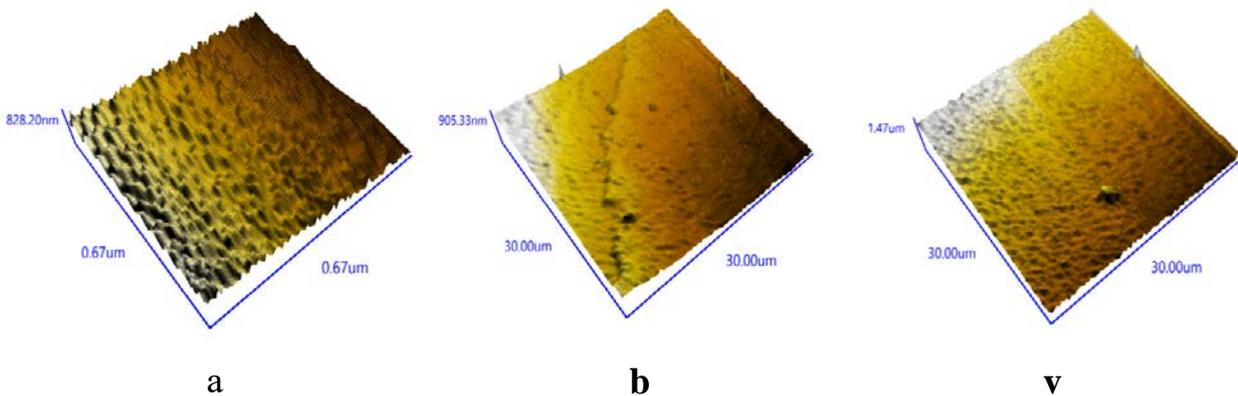
Noturg'un Frenkel juftligi nuqsonlarining paydo bo'lishi va annigilyatsiyasida kristalda hajmining qisqa muddatli mahalliy o'zgarishlari va uning tez tiklanishi sodir bo'ladi, natijada elastik kuchlanish to'lqinlari paydo bo'ladi. Bu to'lqinlarning mavjud nuqtali nuqsonlar bilan o'zaro ta'siri kristall hajmida mavjud tugunlararo atomlarning faollashtirilmagan ko'chishlariga va ularning tegishli vakansiyalar bilan annigilyatsiyalanishiga olib kelishi mumkin, bu esa ularning nuqsonlardan holi bo'lishiga va materialning dastlabki nuqsonli holatga nisbatan muvozanatliroq holatga o'tishiga olib keladi. Shuning uchun nurlanishning kichik dozalarida, bizning misolimizda  $5 \times 10^{15}$  elektron/sm<sup>2</sup> flyuyensgacha, biografik komplementar nuqson juftliklarining rekombinatsiyasi natijasida nurlantirilayotgan kristall yanada nuqsonsiz bo'lib qoladi.

Nurlantirish tufayli radiatsiyaviy nuqsonlar miqdori boshlang'ich biografik nuqsonlar sonidan ortib ketadigan dozalarida (bu bizning holatimizda elektronlar bilan nurlantirish flyuyensi  $F > 5 \times 10^{15}$  elektron/sm<sup>2</sup>), kristalda strukturaviy nuqsonlar to'plana boshlaydi, kristall panjaraning parametrlari kattalasha boshlaydi va mos ravishda kristallning taqiqlangan zonasi kengligi kamayadi. Legirlash, shuningdek, elektronlar bilan nurlantirish  $\text{TlInSe}_2$  va  $\text{TlIn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Se}_2$  kristallarining sirt morfologiyasini kuchli o'zgartiradi.  $\text{TlInSe}_2$  kristalli tarkibiga temir

kirishmasining kiritilishi sirt holatini yaxshilanishiga, profilning o‘rtacha arifmetik og‘ishining maksimal qiymatining kamayishiga, shuningdek, o‘rtacha g‘adirbudirlik balandligini kamayishiga olib keladi (3 va 4-rasmlar).

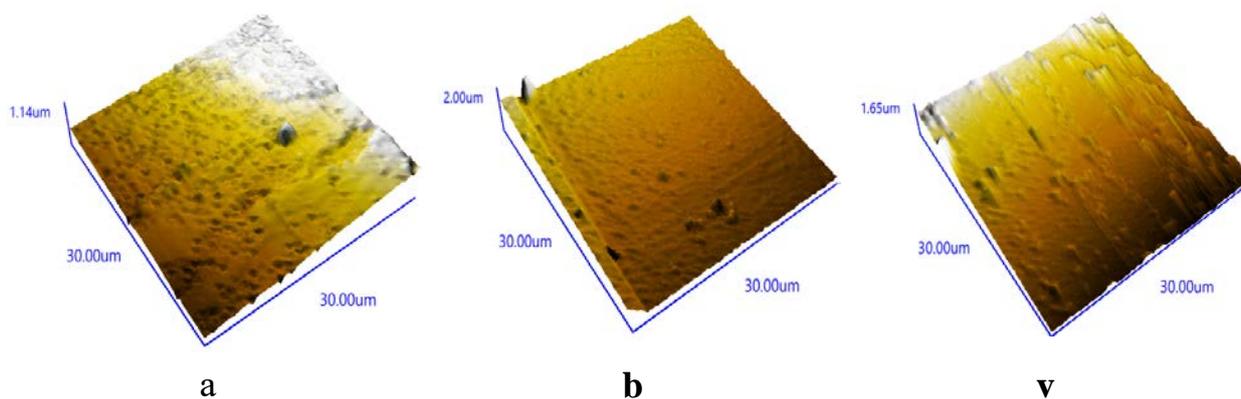


**3-rasm. Monokristallar yuzasining ikki o‘lchamli ASM tasviri:**  
**(a)  $\text{TIIn}_{0,999}\text{Fe}_{0,001}\text{Se}_2$ ; (b)  $\text{TIIn}_{0,995}\text{Fe}_{0,005}\text{Se}_2$ ; (v)  $\text{TIIn}_{0,98}\text{Fe}_{0,02}\text{Se}_2$ .**

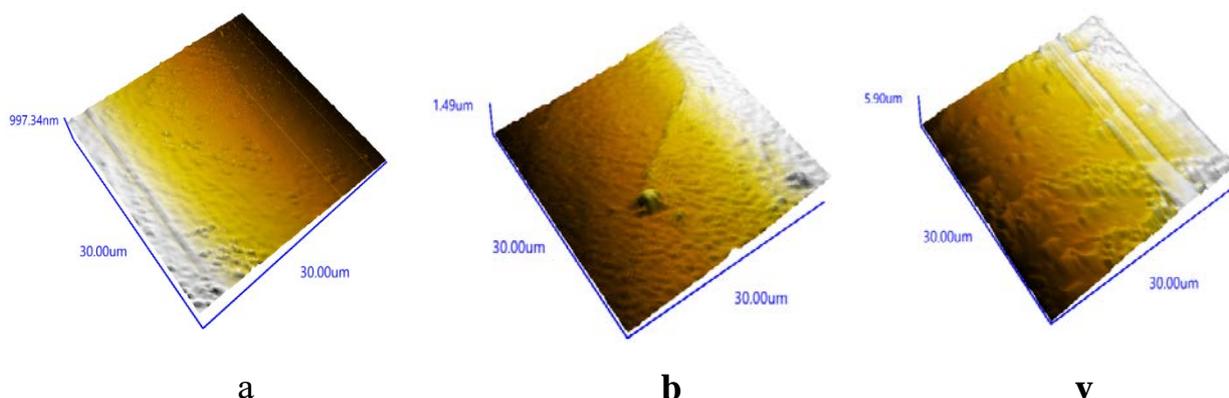


**4-rasm. Monokristallar yuzasining hajmiy ASM tasviri:**  
**(a)  $\text{TIIn}_{0,999}\text{Fe}_{0,001}\text{Se}_2$ ; (b)  $\text{TIIn}_{0,995}\text{Fe}_{0,005}\text{Se}_2$ ; (v)  $\text{TIIn}_{0,98}\text{Fe}_{0,02}\text{Se}_2$  [77].**

$\text{TIIn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Se}_2$  tizimi monokristallari yuzasining mikrorelefi  $x=0.001\div 0.005$  qiymatlarida 2 MeV energiyali va  $5\times 10^{16}$  elektron/ $\text{sm}^2$  flyuyensgacha bo‘lgan elektronlar ta‘siriga, shuningdek,  $10^7$  Rad/s gacha bo‘lgan dozalarda  $\gamma$ -nurlanishga chidamlidir (5- va 6-rasmlar).



**5-rasm.  $10^7$  rad dozada  $\gamma$ -nurlantirishdan keyin  $\text{TlIn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Se}_2$  monokristallari sirtining hajmiy ASM tasviri:**  
**a)  $\text{TlIn}_{0,999}\text{Fe}_{0,001}\text{Se}_2$ ; b)  $\text{TlIn}_{0,995}\text{Fe}_{0,005}\text{Se}_2$ ; v)  $\text{TlIn}_{0,98}\text{Fe}_{0,02}\text{Se}_2$**



**6-rasm.  $\text{TlIn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Se}_2$  monokristallarining  $5 \times 10^{16}$  elektron/ $\text{sm}^2$  flyuyensli elektronlar bilan nurlantirilgandan keyingi sirtining hajmiy ASM tasviri:**  
**a)  $\text{TlIn}_{0,999}\text{Fe}_{0,001}\text{Se}_2$ ; b)  $\text{TlIn}_{0,995}\text{Fe}_{0,005}\text{Se}_2$ ; v)  $\text{TlIn}_{0,98}\text{Fe}_{0,02}\text{Se}_2$ ]**

$\text{TlIn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Se}_2$  kristallarining bu xususiyati ularni yuqori radiatsiya sharoitida ishlaydigan fotoelektron asboblarni yaratish uchun samarali radiatsiyaga chidamli yarimo‘tkazgich materiallar sifatida ko‘rib chiqish imkonini beradi.  $x \geq 0.02$  qiymatlarida ionlashtiruvchi nurlanish bilan nurlantirish kristallar sirtining holatini sezilarli darajada yomonlashtiradi.

Dissertatsiyaning “**Fe kirishmasining  $\text{TlIn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{S}_2$  kristallarining fizikaviy xossalari ta’siri ( $x = 0,001 \div 0,01$ )**” deb nomlangan to‘rtinchi bobida  $\text{TlIn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{S}_2$  ning legirlangan qatlamli monokristallarini olish texnologiyasi va ularning ayrim fizikaviy xarakteristikalarini o‘rganish natijalari keltirilgan.

Fe ionlari bilan legirlangan  $\text{TlInS}_2$  kristallari to‘g‘ridan-to‘g‘ri eritish usuli bilan sintez qilindi va ularning fizikaviy xususiyatlari o‘rganildi. Temir indiy o‘rnini bosuvchi aralashma ko‘rinishida kiritilgan, ya’ni  $\text{TlIn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{S}_2$  – sintez qilingan kristallarining umumiy formulasi bo‘lib, bu yerda  $x = 0,001; 0,005, 0,01$ .

Sintez qilingandan so'ng ichida  $TlIn_{1-x}Fe_xS_2$  bo'lgan ampula sekinlik bilan sovutildi va olingan mahsulot qo'shimcha ravishda 900 K da gomogenlashtiruvchi toblash amalidan o'tkazildi. Shu tarzda sintez qilingan namunalar yirik blokli strukturaga ega polikristall quymalardan iborat bo'ldi. Termik tadqiqotlar asosida o'stirilgan monokristallarning bir fazalili ekanliklari aniqlandi.  $TlIn_{1-x}Fe_xS_2$  ( $x = 0 \div 0,01$ ) kristallarida Fe konsentratsiyasining ortishi bilan ularning erish harorati  $T_p$  va kristallanish harorati  $T_{kr}$  pasayishi aniqlandi (2-jadval). Ushbu ma'lumotlar asosida optimal rejim tanlandi va Brijmen-Stokbarger usuli bilan  $TlIn_{1-x}Fe_xS_2$  ( $x=0 \div 0,01$ ) monokristallarining qattiq eritmalari o'stirildi. Rentgenofazaviy tahlil natijasida sintez qilingan kristallarning bir fazali ekanligi ko'rsatildi.

## 2-jadval

### Siljigan kristallarning erish va kristallanish haroratlari $TlIn_{1-x}Fe_xS_2$

Namunalar		$TlInS_2$	$TlIn_{0,999}Fe_{0,001}S_2$	$TlIn_{0,995}Fe_{0,005}S_2$	$TlIn_{0,99}Fe_{0,01}S_2$
$T_{er}, ^\circ C$	Bosh.	735	730	730	723
	Tug.	778	776	760	756
$T_{kr}, ^\circ C$	Bosh.	680	678	665	660
	Tug.	665	665	660	653

Rentgenogrammalaridan aniqlangan  $TlIn_{1-x}Fe_xS_2$  namunalarining qatlamlari orasidagi masofalarni panjara parametrlari bilan monoklin singoniyasi asosida indekslanadi:  $a \sim b = 10,95 \text{ \AA}$ ,  $c = 15,1 \text{ \AA}$ ,  $TlIn_{1-x}Fe_xS_2$   $4 \text{ \AA}$ , fazoviy guruh  $P2/m$ ,  $\beta = 100^\circ$  (3-jadval). Eng intensiv difraksiya chiziqlaridan hisoblangan  $Tl(InS_2)_{1-x}(FeSe_2)_x$  kristallarining panjara parametrlari  $TlInS_2$  kristallarining panjara xarakteristikallari bilan qoniqarli ravishda mos keladi.

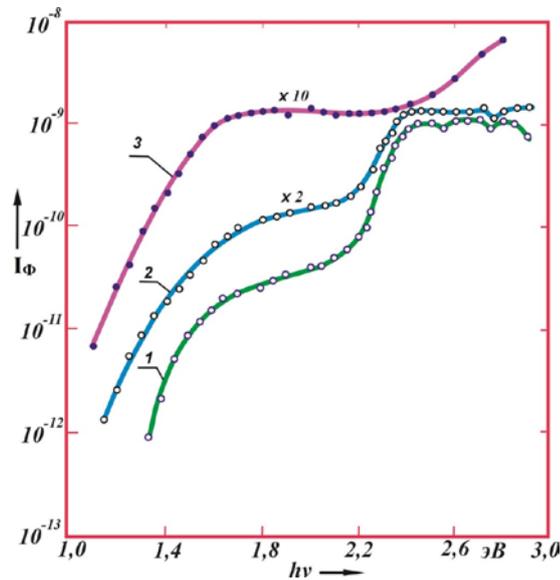
## 3-jadval

### $TlIn_{1-x}Fe_xS_2$ monokristallarining elementar yacheykasi parametrlari

Namunalar	$a$	$b$	$c$
$TlInS_2$	10,926	10,958	15,268
$TlIn_{0,999}Fe_{0,001}S_2$	10,915	10,947	15,244
$TlIn_{0,995}Fe_{0,005}S_2$	10,894	10,926	15,215
$TlIn_{0,99}Fe_{0,01}S_2$	10,864	10,896	15,173

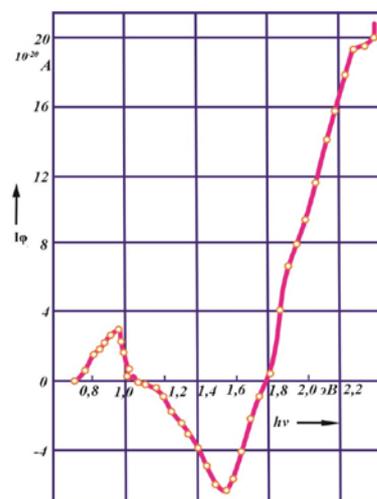
$TlIn_{1-x}Fe_xS_2$  kristallarining 77-300 K harorat oralig'ida fotoo'tkazuvchanligining statsionar xarakteristikalarini o'rganish orqali (7-rasm) kristallarning elektrofizik xarakteristikallari ularning tarkibi va tuzilishiga bog'liq

ravishda o'zgarishi aniqlandi:  $\text{TlIn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{S}_2$  kristallarining spektral fotosezgirliги ( $h\nu$ ) maksimumlari bo'yicha aniqlangan namunalarning solishtirma qarshiligi  $\rho$ , ularning taqiqlangan zonasining kengligi  $E_g^{\phi_{\max}}$  temir konsentratsiyasining ortishi bilan ortadi.



**7-rasm. 300 K da  $\text{TlIn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{S}_2$  monokristallarining fototokining spektral bog'liqligi: 1:  $x=0$ ; 2:  $x=0,001$ ; 3:  $x=0,005$ .**

$\text{TlIn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{S}_2$  kristallarida kontaktlardan zaryad tashuvchilarning injeksiyasi natijasida rekombinatsiya markazlarining qayta zaryadlanishi tufayli manfiy fotoo'tkazuvchanlik hodisasi vujudga kelishi aniqlandi (8-rasm). Elektronlarning rekombinatsiyasiga uzoq vaqt sarflanishi tufayli, o'tkazuvchan zonada zaryad tashuvchilarning miqdori keskin kamayishida manfiy fotoo'tkazuvchanlik hodisasi kuzatildi.



**8-rasm. Elektr maydon kuchlanganligi  $10^3 \text{ V/sm}$ , 77 K da  $\text{TlIn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{S}_2$  ( $x=0$ ) monokristallari fototokining spektral taqsimoti**

Manfiy fotoelektro'kazuvchanlikning spektral taqsimoti egri chizig'ining shakli aralashma yorug'ligining ikkita mahalliy markaz bilan o'zaro ta'sirlashuvini ko'rsatadi. Manfiy fotoelektro'kazuvchanlikning uzoq to'lqinli chegarasini shakllantiruvchi markaz o'tkazuvchanlik zonasi tubidan 1,05 eV masofada joylashgan. Ikkinchi mahalliy markaz qo'shilganda qorong'ulik tokining so'nish chuqurligi keskin ortadi. Bu sath s-zonadan 1,2 eV uzoqlikda joylashgan.

$\text{TlIn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{S}_2$  kristallarining volt-amper xususiyatlarini o'lchash taxminan 50 V/sm elektr maydon kuchlanganligiga qadar chiziqli bog'liqlikni ko'rsatdi. Yoritish kuchi past bo'lganda fototok yoritilganlikka to'g'ri proporsional bog'liq bo'ladi, yoritilganlik oshganda esa bu bog'liqlik nochiziqli tusga kiradi. Qo'zg'atuvchi yorug'lik oqimining energiyasi 2,4 eV ( $h\nu$ ) ni tashkil etdi. Qo'zg'atish intensivligi sezilarli darajada oshganda fototokning yoritilganlikka nisbatan o'ta chiziqli bog'liqligi kuzatiladi ( $I_\phi \sim L^\alpha$ , bunda  $\alpha > 1$ ) va bu bog'liqlik harorat pasayganda ham saqlanib qoladi. Avvalgi eksperimental sharoitlarda, 77 K haroratda olingan pastki egri chiziq fototokning yoritilganlikka bog'liqligi ( $I_\phi \sim L^\alpha$ ) bilan uchta xarakterli sohani ko'rsatadi, bunda  $\alpha$  1, 0 va 1 dan katta qiymatlarni qabul qiladi.  $\text{TlIn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{S}_2$  kristallarining fotoelektr o'tkazuvchanlik spektrlarida yutilish sohasida pasayuvchi qism mavjud emas. Bu esa namunalar yuzasining yuqori darajada mukammalligi va yuza qatlamida rekombinatsiya tezligining juda pastligidan dalolat beradi.

## XULOSA

Gamma nurlari va elektronlar oqimi bilan nurlantirilgan  $\text{TlIn}_{(1-x)}\text{Fe}_x\text{S}_2$  hamda  $\text{TlIn}_{(1-x)}\text{Fe}_x\text{Se}_2$  monokristallarining qattiq eritmalarining strukturaviy, optikaviy, elektrofizikaviy va fotoelektrikaviy xususiyatlarini o'rganish asosida quyidagi xulosalar qilindi:

1.  $\text{TlIn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Se}_2$  va  $\text{TlIn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{S}_2$  qattiq eritmaları mos ravishda tetragonal va monoklin singoniyalar asosida bir fazali kristallanadi. Kristallarni legirlashda, shuningdek, ularni 2 MeV energiyali va  $0.085 \text{ mA/cm}^2$  tok zichligiga ega bo'lgan tezlashtirilgan elektronlar bilan nurlantirishda  $10^{17}$  elektron/ $\text{cm}^2$  flyuyensgacha namunalarning bir fazaliligi, singoniyasi va fazoviy guruhlari saqlanadi.

2. Elektronlar ta'sirining  $5 \times 10^{15}$  elek/ $\text{cm}^2$  flyuyensgacha ortishi bilan  $\text{TlIn}_{0,98}\text{Fe}_{0,02}\text{Se}_2$  kristallariining elementar yacheykalari parametrlari kamayadi, taqiqlangan zona kengligi  $E_g$  esa ortadi. Elektronlar flyuyensining yanada ortishi bilan kristall panjara parametrining qiymati ortadi,  $E_g$  esa kamayadi. Kuzatilayotgan hodisa past dozalar hodisasi nuqtayi nazaridan tushuntirildi: kristallarni  $5 \times 10^{15}$  elektron/ $\text{cm}^2$  flyuyensgacha nurlantirilganda kristallda beqaror Frenkel juftlarining rekombinatsiyasi tufayli elastik to'lqinlar hosil bo'ladi, bu esa komplementar biografik nuqsonli juftliklarning rekombinatsiyasiga va kristallning nuqsonliligining kamayishiga olib keladi. Nurlanish dozalarida radiatsiyaviy nuqsonlar miqdori boshlang'ich biografik nuqsonlar sonidan ortib ketganda (bu bizning holatimizda elektronlar bilan nurlantirish flyuyensi  $F > 5 \times 10^{15}$

elektron/sm<sup>2</sup>), kristallda strukturaviy nuqsonlar to‘plana boshlaydi, kristall panjara parametrlari kattalasha boshlaydi va shunga mos ravishda taqiqlangan kenglik kamayadi.

3. TlInSe<sub>2</sub> kristallarini temir ionlari bilan legirlash, shuningdek, ularni gamma nurlari va elektronlar bilan nurlantirish kristallarning sirt morfologiyasini kuchli o‘zgartiradi. TlInSe<sub>2</sub> kristallariga temir kirishmasining kiritilishi sirt holatining yaxshilanishiga, ya’ni profilning o‘rtacha arifmetik og‘ishining maksimal qiymatining kamayishiga va sirtning o‘rtacha g‘adir-budirlik balandligining pasayishiga olib keladi.

4. TlIn<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub>Se<sub>2</sub> sistemasidagi monokristallar yuzasining mikrorelyefi  $x=0,001\div 0,005$  qiymatlarida 2 MeV energiyali va  $5\times 10^{16}$  elektron/sm<sup>2</sup> flyuyensli elektronlar ta’siriga, shuningdek,  $10^6$  va  $10^7$  R/s dozalarda  $\gamma$ -nurlanishga chidamli. TlIn<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub>Se<sub>2</sub> kristallarining bu xususiyati ularni yuqori radiatsiya sharoitida ishlaydigan fotoelektron asboblari yaratish uchun samarali radiatsiyaga chidamli yarimo‘tkazgich materiallar sifatida ko‘rib chiqish imkonini beradi.

5. TlIn<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub>S<sub>2</sub> ( $x=0\div 0,01$ ) kristallarida Fe konsentratsiyasining ortishi bilan erish harorati va kristallanish harorati pasayishi, ularning solishtirma qarshiligi  $\rho$ , taqiqlangan zona kengligi  $E_g$ , spektral fototok maksimumi  $(hv)_{\max}$  ortishi aniqlandi.

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

---

**ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ**

**ХОДЖАЕВ УТКИРЖОН ОКТАМОВИЧ**

**ОПТИЧЕСКИЕ, ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И  
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МОНОКРИСТАЛЛОВ  
 $TIn_{(1-x)}Fe_x(S,Se)_2$**

**01.04.07 – Физика конденсированного состояния**

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

**Ташкент – 2025**

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за номером B2024.2.PhD/FM1118.

Диссертация выполнена в Институте ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета ([www.inp.uz](http://www.inp.uz)) и Информационно-образовательном портале «Ziynet» ([www.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz)).

**Научный руководитель:** **Нуритдинов Иззатилло**  
доктор физико-математических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** **Раджабов Сали Аширович**  
доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник

**Парпиев Адхамжон Сабиржанович**  
PhD по физико-математическим наукам,  
старший научный сотрудник

**Ведущая организация:** **Ферганский политехнический институт**

Защита диссертации состоится «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 года в \_\_\_\_\_ часов на заседании Научного совета DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 при Институте ядерной физики (Адрес: 100174, г. Ташкент, пос. Улугбек. Тел.: (+99871) 289-31-41; факс: (+99871)289-36-65; e-mail: [info@inp.uz](mailto:info@inp.uz)).

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

Автореферат диссертации разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г.  
(протокол рассылки № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ 2025 г.).

**М.Ю.Ташметов**  
председатель Научного совета по присуждению  
ученых степеней, д.-ф.м.н., профессор

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

**Э.М.Турсунов**  
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 настоящее время во всём мире наблюдается устойчивый рост интереса исследователей к халькогенидным соединениям таллия класса  $A^{III}B^{III}C_2^{VI}$  с многослойной структурой. Отличительными особенностями кристаллов этого класса является то, что они могут проявлять полупроводниковые и пьезорезистивные свойства. Слоистая структура смешанных кристаллов этого типа способствует образованию политипных модификаций, которые оказывают весьма существенное влияние на их физические свойства. Перспективность применения таких материалов обусловлена их высокой эффективностью при использовании в качестве активных материалов в фотоэлектрических преобразователях, спектроанализаторах, а также детекторах рентгеновского, гамма- и нейтронного излучения. В связи с этим разработка методов целенаправленного управления свойствами таких материалов является актуальной научной задачей.

В настоящее время особое внимание уделяется изучению радиационных процессов в легированных слоистых и цепочечных кристаллах типа  $A^{III}B^{III}C_2^{VI}$ . Одним из эффективных подходов управления свойствами твердых тел является введение в их структуру примесных добавок, а также воздействие ионизирующего излучения, позволяющее управлять структурой и функциональными характеристиками материалов.

В последние годы в Республике наблюдается активное развитие исследований в области легированных полупроводниковых соединений, обусловленное их высокой прикладной значимостью. Эти материалы рассматриваются как ключевые компоненты для создания современных приборов фотоэлектрического преобразования, спектрального анализа и радиационного контроля. Разработка и совершенствование методов управления свойствами подобных материалов отражены в Стратегии<sup>1</sup> развития нового Узбекистана на 2022-2026 гг.

Результаты, полученные в настоящей диссертационной работе, в определенной мере, соответствуют задачам, обозначенным в Указах Президента Республики Узбекистан № УП-60 «О Стратегии развития нового Узбекистана на 2022-2026 гг.» от 28 января 2022 года, № УП-4958 «О дальнейшем совершенствовании системы послевузовского образования» от 16 февраля 2017 года, в Постановлении Президента Республики Узбекистан № ПП-2789 «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности» от 17 февраля 2017 года, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данном направлении.

**Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики.** Диссертационное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и

---

<sup>1</sup> Указ Президента Республики Узбекистан № УП-60 «О Стратегии развития нового Узбекистана на 2022-2026 годы» от 28 января 2022 г.

технологий республики П. «Энергетика, энергосбережение и альтернативные источники энергии».

**Степень изученности проблемы.** На сегодняшний день ведущими специалистами крупнейших научных центров мира, в том числе американскими (Т.Т.Исаакс), японскими (S.Kashida, Y.Kobayashi, R.Matsumoto), германскими (H.Hahn, W.Henkel, D.Muller, F.Poltmann), швейцарскими (E.Mooser), израильскими (A.M.Panich), турецкими (I.Guler, N.M.Gasanly), азербайджанскими (К.Р.Аллахвердиев, А.Е.Бахышев, Г.Д.Гусейнов, Г.Б.Абдуллаев, С.Н.Мустафаева, N.Mamedov, В.Д.Рустамов, Э.М.Керимова, Э.М.Годжаев), украинскими (A.V.Gomonai, Yu.M.Azhniuk, I.Petryshynets, O.O.Gomonai), российскими (В.М.Бурлаков, Е.А.Виноградов), белорусскими (А.У.Шелег, В.Г.Гуртовой), молдавскими (В.В.Мушинский, М.И.Караман), узбекистанскими (С.Х.Умаров, И.Нуритдинов, М.Ю.Ташметов, Дж.Дж.Ашуров, Ф.К.Халлоков) и другими учеными разработаны технологии выращивания достаточно чистых, однородных и легированных различными примесями высококачественных кристаллов многокомпонентных халькогенидных соединений типа  $A^{III}B^{III}C_2^{VI}$ .

Идентифицированы кристаллические структуры многих соединений кристаллов этого семейства, а также всесторонне исследованы их электрофизические, фотоэлектрические, сегнетоэлектрические, диэлектрические, спектрально-оптические, магнитные и другие характеристики. Полученные результаты убедительно свидетельствуют о высокой перспективности данных соединений как функциональных полупроводниковых материалов, что обуславливает необходимость их комплексного и систематического изучения.

Одним из эффективных подходов к управлению свойствами твердых тел является введение в их структуру примесей, а также облучение различными видами ядерного и ионизирующего излучения, что требует целенаправленного исследования физических процессов в легированных и облученных материалах. Однако радиационные эффекты в халькогенидных соединениях типа  $A^{III}B^{III}C_2^{VI}$ , особенно в легированных образцах, изучены недостаточно полно и несистематично. Имеющиеся в литературе данные зачастую носят противоречивый характер.

**Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация.** Диссертационная работа выполнена в рамках научно-исследовательских проектов Института ядерной физики АН РУз по темам: ФА-Ф2-Ф065-Ф071 «Термо- и радиационно-стимулированные явления в твердых растворах замещения и внедрения» (2007–2011), утвержденной Постановлением Президента № ПП-4526 от 21 ноября 2019 года «Радиационно-стимулированные явления и спектрально-люминесцентные характеристики в широкозонных оксидных и фторидных твердотельных материалах, перспективных для сцинтилляторов и лазеров с диодной накачкой» (2020-2024).

**Целью диссертационной работы** является исследование влияния концентрации примеси железа и ионизирующего излучения на кристаллическую структуру, электрофизические, фотоэлектрические и оптические свойства твердых растворов  $TlIn_{(1-x)}Fe_xS_2$  и  $TlIn_{(1-x)}Fe_xSe_2$ .

**Задачи исследования:**

провести растровые электронно-микроскопические и зондовые микрорентгеноспектральные анализы выращенных кристаллов переменного состава, определить степень отклонения от стехиометрии и нарушения однородности в процессе их роста;

определить с использованием рентгеноструктурного анализа симметрию и характер изменения соответствующих параметров решетки вследствие воздействия гамма и электронного облучения и частичного замещения ионов индия ионами железа;

изучить влияние замещения ионов индия (In) ионами железа (Fe) на электрические, фотоэлектрические и оптические свойства выращенных кристаллов до и после облучения электронами;

выявить перспективы технического применения выращенных твердых растворов новых слоистых полупроводниковых кристаллов.

**Объектом исследования** являются твердые растворы сложных халькогенидных кристаллов  $TlIn_{(1-x)}Fe_xS_2$  и  $TlIn_{(1-x)}Fe_xSe_2$ .

**Предметом исследования** являются кристаллическая структура, морфология поверхности, электрофизические, фотоэлектрические и оптические свойства твердых растворов сложных халькогенидных кристаллов  $TlIn_{(1-x)}Fe_xS_2$  и  $TlIn_{(1-x)}Fe_xSe_2$ .

**Методы исследования:** рентгеновская дифракция, полнопрофильный анализ (Ритвельда), оптическая и фотоэлектрическая спектроскопия, методы растрового электронно-микроскопического и зондового микрорентгено-спектрального анализа, атомно-силовая и сканирующая электронная микроскопия.

**Научная новизна исследования** заключается в следующем:

установлено, что твердые растворы  $TlIn_{1-x}Fe_xSe_2$  и  $TlIn_{1-x}Fe_xS_2$  кристаллизуются однофазно соответственно в тетрагональной (пространственная группа  $I4/mcm$  с параметрами  $a = 8.068 \text{ \AA}$ ,  $b = 8.068 \text{ \AA}$ ,  $c = 6.816 \text{ \AA}$ ) и моноклинной (пространственная группа  $P2/m$  и  $a = 10.896 \text{ \AA}$ ,  $b = 10.896 \text{ \AA}$ ,  $c = 15.173 \text{ \AA}$ ) сингониях: при этом при легировании кристаллов ионами Fe сохраняются сингонии и пространственные группы, а увеличение концентрации примеси приводит к уменьшению параметров кристаллической решетки;

обнаружен эффект малых доз в твердых растворах  $TlIn_{1-x}Fe_xSe_2$  (радиационная тряска): с увеличением дозы облучения образцов гамма-лучами источника  $^{60}Co$  до  $10^7$  рад, а также электронами до флюенса  $5 \times 10^{15}$  электрон/см<sup>2</sup>, параметры элементарной ячейки уменьшаются и ширины запрещенных зон  $E_g$  увеличиваются благодаря уменьшению степени дефектности кристаллов, однако при дальнейшем увеличении дозы

облучения, за счет радиационных дефектов, значения параметров кристаллических решеток возрастают, а  $E_g$  – уменьшается;

определено, что легирование ионами железа, а также облучение гамма-лучами и электронами значительно изменяет морфологию поверхности монокристаллов  $TlInSe_2$  и твердых растворов  $TlIn_{0,98}Fe_{0,02}Se_2$ : введение примеси железа улучшает состояние поверхности кристаллов  $TlInSe_2$ , в то время как облучение электронами с флюенсом  $5 \times 10^{16}$  электрон/см<sup>2</sup> значительно повышает дефектность поверхности как нелегированных, так и легированных кристаллов;

установлено, что удельное сопротивление  $\rho$ , ширина запрещенной зоны  $E_g$ , максимумы спектрального фототока  $(hv)_{max}$  монокристаллов твердых растворов  $TlIn_{1-x}Fe_xS_2$  увеличиваются с ростом концентрации ионов железа.

**Практические результаты исследования** заключаются в следующем:

выявлено, что введение в монокристаллы  $TlInSe_2$  примеси железа приводит к уменьшению максимального значения среднего арифметического отклонения профиля (от  $R_a=40.9$  нм до  $R_a=17.7$  нм) и понижению высоты средней шероховатости (от  $R_z=398.1$  нм до  $R_z=189.9$  нм), что улучшает состояние поверхности материала.

**Достоверность результатов исследования** обеспечивается использованием современных методов, высокоточного оборудования, стандартных точных и высокочувствительных приборов для измерения структурных, электрофизических, фотоэлектрических и оптических параметров исследованных образцов, набором необходимой статистики в экспериментах, подтверждением полученных результатов с данными других независимых исследователей, а также непротиворечием интерпретации полученных данных общефизическим законам и существующим апробированным физическим моделям.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.** Научная значимость результатов определяется установленными закономерностями влияния концентрации примеси железа, доз гамма-излучения и ускоренных электронов на кристаллическое строение, состояние поверхности, электрофизические, фотоэлектрические и оптические свойства кристаллов  $TlInSe_2$ ,  $TlIn_{1-x}Fe_xSe_2$ ,  $TlInS_2$ ,  $TlIn_{1-x}Fe_xS_2$ , которые позволяют развивать существующие теоретические разработки применительно к многокомпонентным широкозонным полупроводниковым твердым растворам, в частности, по вопросам влияния различных примесей, радиационного дефектообразования под действием ускоренных электронов и гамма излучения.

Практическая значимость результатов заключается в установлении стабильности структуры, электрофизических, фотоэлектрических и оптических свойств твердых растворов монокристаллов  $TlIn_{1-x}Fe_xSe_2$  в зависимости от изменения концентрации железа и воздействия ускоренных электронов и гамма-излучений, что позволяет рассматривать их в качестве радиационностойких перспективных полупроводниковых материалов для электронной промышленности.

**Внедрение результатов исследования.** На основе полученных результатов по исследованию структурных, оптических, электрофизических и фотоэлектрических свойств монокристаллов  $\text{TlInSe}_2$ ,  $\text{TlInS}_2$  и  $\text{TlIn}_{1-x}\text{Fe}_x(\text{S,Se})_2$ :

установление однофазных состояний в монокристалле  $\text{TlIn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Se}_2$  с тетрагональной структурой (пр.гр.  $I4/mcm$ ) и в твердом растворе  $\text{TlIn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{S}_2$  ( $x=0\div 0,01$ ) с моноклинной сингонией (пр.гр.  $P2/m$ ,  $\beta=100^\circ$ );

улучшение состояния поверхности при легировании кристаллов  $\text{TlInSe}_2$  и  $\text{TlInS}_2$  ионами железа;

установление, что с увеличением концентрации ионов железа монокристаллов твердых растворов  $\text{TlIn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{S}_2$ , возрастают удельное сопротивление  $\rho$ , ширина запрещенной зоны  $E_g$ , положения максимумов спектрального фототока  $(h\nu)_{\text{max}}$  использованы в рамках исследований Института физики Министерства науки и образования Азербайджанской Республики по плановой теме «Кристаллофизика систем  $\text{TlGaS}(\text{Se})_2 - \text{Nd}_2\text{S}(\text{Se})_3$ ,  $(\text{TlGaSe}_2)_x(\text{TlBiSe}_2)_{1-x}$ ,  $\text{TlGaS}_2\text{-TlGaSe}_2$ ,  $\text{TlGaSe}_2\text{-TlGaS}_2$ ,  $\text{TlInS}_2 - \text{TlInSe}_2$  и влияние на них редкоземельных элементов» (письмо Института физики Министерства науки и образования Азербайджанской Республики №029-08/476 от 25.11.2024). Использование научных результатов позволило провести анализ зависимости физических свойств сложных полупроводников от их состава и содержания примесей; уточнить характер изменения параметров кристаллических решеток твердых растворов  $\text{TlInS}_2$  и  $\text{TlInSe}_2$  с при легировании редкоземельными примесями, а также улучшить состояния поверхности этих кристаллов при легировании другими примесями;

показано, что при легировании кристаллов  $\text{TlInSe}_2$  примесью Fe (до 2 мол.%) сохраняется их однофазность, сингония и пространственная группа, улучшается состояние поверхности, уменьшаются параметры кристаллической решетки; при облучении электронами (до  $5 \cdot 10^{15}$  эл/см<sup>2</sup>) снижаются параметры элементарной ячейки и увеличивается ширина запрещенной зоны; полученные результаты использованы зарубежными учёными (ссылки в международных научных журналах *Journal of Modern Physics B.* - 2024. - С. 2550103; *Materials Research Innovations.* - 2024. - С. 1-5; *Eurasian Physical Technical Journal*, 2024, V.21, No2 (48), С.5-13). Использование научных результатов позволило обосновать механизмы изменения параметров кристаллической решетки, ширины запрещенной зоны и поверхностных состояний кристаллов типа  $\text{TlInSSe}$ ,  $\text{ZnSe}$  и  $\text{Mn}_2\text{Zn}_2\text{O}_7$  при их легировании примесями и воздействия ионизирующего излучения.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 4 международных и республиканских научно-практических конференциях.

**Опубликованность результатов исследований.** По теме диссертации опубликованы 11 научных работ, в том числе 4 статьи в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, из которых 1 статья в зарубежном научном журнале.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы. Объем диссертации составляет 107 страниц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, изложена степень изученности проблемы, сформулированы цель и задачи исследования, приведены сведения об объектах, предметах и методах исследования, изложены научная новизна и практические результаты исследования, раскрыты научная и практическая значимость полученных результатов, приведены сведения о внедрении результатов исследования, апробации работы, а также об объеме и структуре диссертации.

В первой главе диссертации **«Физико-химические свойства монокристаллов  $TlInS_2$ ,  $TlInSe_2$  и твердых растворов на их основе»** приведен обзор литературных источников по кристаллической структуре, фотоэлектрическим, электрофизическим и оптическим свойствам, влиянию примесей и ионизирующего излучения на характеристики исследуемых кристаллов и твердых растворов. На основе анализа литературного материала сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе диссертации **«Технология получения, фазовые анализы и методика измерений монокристаллов»** изложены вопросы фазовых равновесий, технология синтеза и выращивания монокристаллов, контроль совершенства выращенных кристаллов систем  $TlIn_{1-x}Fe_xSe_2$  и  $TlIn_{1-x}Fe_xS_2$ . Исследованные кристаллы синтезированы сплавлением компонентов в стехиометрическом соотношении в вакуумированных ( $\sim 10^{-3}$  Па) и запаянных кварцевых ампулах. В качестве исходных компонентов для синтеза использовались особо чистые элементы Tl, In, Fe, Se и S. Монокристаллы синтезированных соединений выращивались усовершенствованным методом Бриджмена. Облучение образцов электронами с энергией 2 МэВ и плотностью тока пучка  $0.085$  мкА/см<sup>2</sup> проводилось на ускорителе “Электроника У-003” ИЯФ АН РУз. Энергия электронов выбрана исходя из плотности и толщины образца и определялась с использованием стандартного измерительного клина (P4701) Riso 2 PieceAluminum (Бельгия) из алюминия. Образцы устанавливались перпендикулярно направлению пучка электронов на расстоянии 0.4 м от развертки ускорителя и проводилось облучение при флюенсах электронов  $1,5 \times 10^{17}$  электрон/см<sup>2</sup>.

Рентгенодифракционные исследования структуры  $TlIn_{0,98}Fe_{0,02}Se_2$  осуществлялись на дифрактометре Malvern Panalytical Empyrean. Спектры рентгеновской дифракции регистрировали с помощью аналитического дифрактометра Malvern Panalytical Empyrean с излучением  $CuK\alpha$  ( $\lambda = 1,54$  Å) при напряжении генератора излучения 45 кВ, тока эмиссии – на 40 мА в

геометрии пучка Брэгга – Brentano при  $2\theta = 20^\circ - 120^\circ$  непрерывно со скоростью сканирования 0.33 град/мин.

Данные рентгеноструктурного анализа обрабатывали методом Ритвельда с помощью программы FullProf.

На основе полученных порошковых рентгенодифракционных данных определяли размер кристаллитов по формуле Дебая-Шеррера:

$$D = K\lambda / (\beta \cos \theta) , \quad (1)$$

где  $D$  – средний размер кристаллитов,  $K$  – геометрический коэффициент ( $K = 0.9$ ),  $\lambda$  – длина волны рентгеновского излучения ( $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ ),  $\beta$  – ширина дифракционного рефлекса на полувысоте (FWHM),  $\theta$  – угол дифракции.

Плотность дислокаций определяли из уравнения:

$$\delta = 1 / D^2 . \quad (2)$$

Величина микронапряжения в кристаллах рассчитывалась по уравнению Стокса-Вильсона:

$$\varepsilon = \beta / (4 \tan \theta) . \quad (3)$$

Трехмерное изображение рельефа поверхности образцов получено на сканирующем зондовом микроскопе SPM 9700HT (Shimadzu). Исследования проводились в контактном режиме работы сканирующего зондового микроскопа. Для этого выбирался участок образца размером 30x30 мкм и определялось количество “пиков-выступов”, их полуширина и высота, до и после облучения. В дальнейшем в тексте будем использовать следующие обозначения:  $R_a$  – среднее арифметическое отклонение профиля от средней линии, проведенной по методу наименьших квадратов в пределах базовой длины,  $R_z$  – высота неровностей профиля по 10 точкам, т.е. среднее значение абсолютных высот пяти наибольших выступов профиля и глубин пяти наибольших впадин профиля в пределах базовой длины. Базовой длиной является длина линии, используемой для выделения неровностей, характеризующих шероховатость поверхности, и количественного определения ее параметров.

Оптическое поглощение монокристаллов исследовали с помощью УФ-В спектрофотометра «Lambda-35» (Perkin Elmer) в диапазоне длин волн 190–1100 нм. Для определения ширины запрещенной зоны кристаллов по спектрам поглощения пользовались соотношением Тауца:

$$(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g) , \quad (4)$$

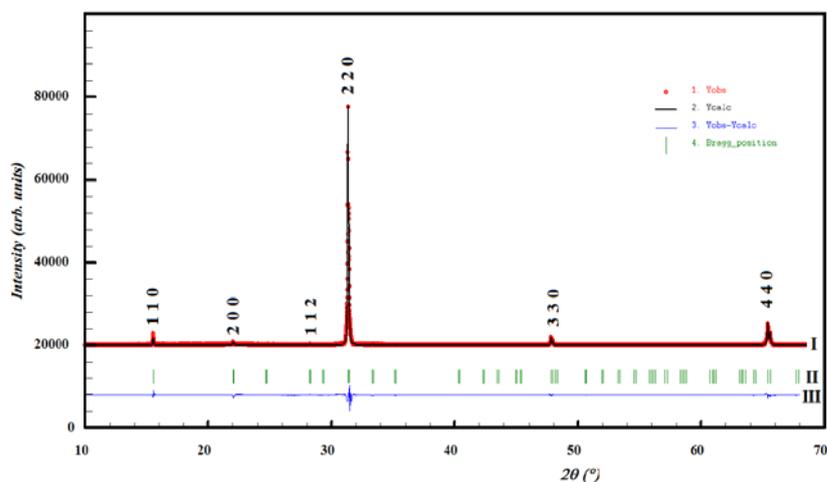
где  $E_g = hc/\lambda$  – энергия оптической ширины запрещенной зоны,  $h$  – постоянная Планка ( $6.626 \times 10^{-34}$  Дж·с),  $c$  – скорость света ( $3 \times 10^8$  м/с),  $\lambda$  – поглощенная длина волны,  $\alpha$  – коэффициент поглощения,  $h\nu$  – энергия падающего фотона в эВ,  $A$  – постоянная крутизны края полосы.

Также коротко рассматриваются такие методы исследования физических свойств кристаллов, как растровый электронно-микроскопический и

электронно-микронзондовый анализ кристаллов, измерения электрофизических и фотоэлектрических характеристик, микрорельефа поверхности и облучения образцов, использованные в настоящей диссертационной работе.

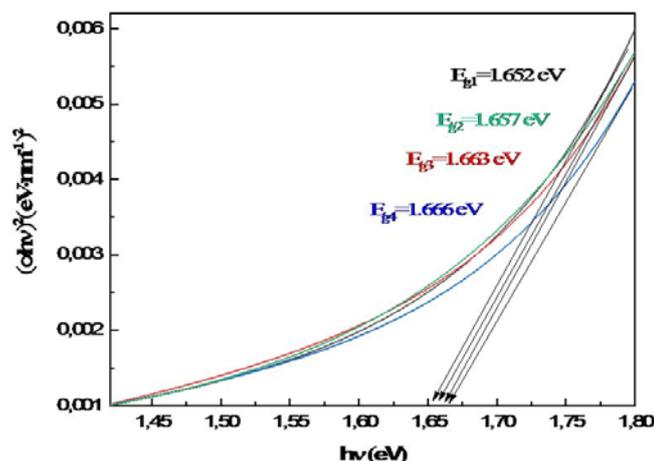
Третья глава «Влияние облучения ионизирующими излучениями на кристаллическую структуру, микрорельеф поверхности и ширины запрещенной зоны монокристаллов  $TlIn_{1-x}Fe_xSe_2$ » содержит результаты измерения и обработки рентгеновских дифракционных характеристик, ширины запрещенных зон и микрорельефа поверхности исследуемых кристаллов.

Результаты измерения и обработки рентгенодифракционных данных монокристаллов  $TlInSe_2$  и  $TlIn_{0,98}Fe_{0,02}Se_2$ , полученных при одинаковых условиях, приведены на рисунке 1. Установлено, что синтезированные образцы являются однофазными. Межплоскостные расстояния, рассчитанные по рентгенограммам, можно однозначно индексировать на основе тетрагональной сингонии. Параметры решетки имеют значения:  $a \sim b = 8.068 \text{ \AA}$ ,  $c = 6.816 \text{ \AA}$ , (пр. гр.  $I4/mcm$ )  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ .



**Рис.1. Рентгенограмма исходного монокристалла  $TlIn_{0,98}Fe_{0,02}Se_2$ :  
 I – экспериментальные и расчетные данные; II – Брэгговские отражения; III – разностная кривая между экспериментальными и расчетными данными**

Установлено, что при облучении кристаллов  $TlIn_{0,98}Fe_{0,02}Se_2$  электронами до флюенса  $5 \times 10^{15}$  электрон/ $cm^2$  происходит уменьшение параметров элементарной ячейки и увеличение ширины запрещенной зоны  $E_g$ . При дальнейшем увеличении флюенса электронов наблюдается противоположная тенденция: параметры кристаллической решетки увеличиваются, тогда как ширина запрещенной зоны – уменьшается (смотрите рисунок 2 и таблицу 1).



**Рис.2. Спектры поглощения монокристаллов  $TlIn_{0,98}Fe_{0,02}Se_2$ , облученных электронами при различных значениях флюенса: 1 - исходный (необлученный образец); 2 -  $5 \times 10^{14}$  эл/см<sup>2</sup>; 3 -  $5 \times 10^{15}$  эл/см<sup>2</sup>; 4 -  $5 \times 10^{16}$  эл/см<sup>2</sup>**

**Таблица 1**

**Изменение параметров решетки и ширины запрещенной зоны кристаллов  $TlIn_{0,98}Fe_{0,02}Se_2$  под воздействием ускоренных электронов [77]**

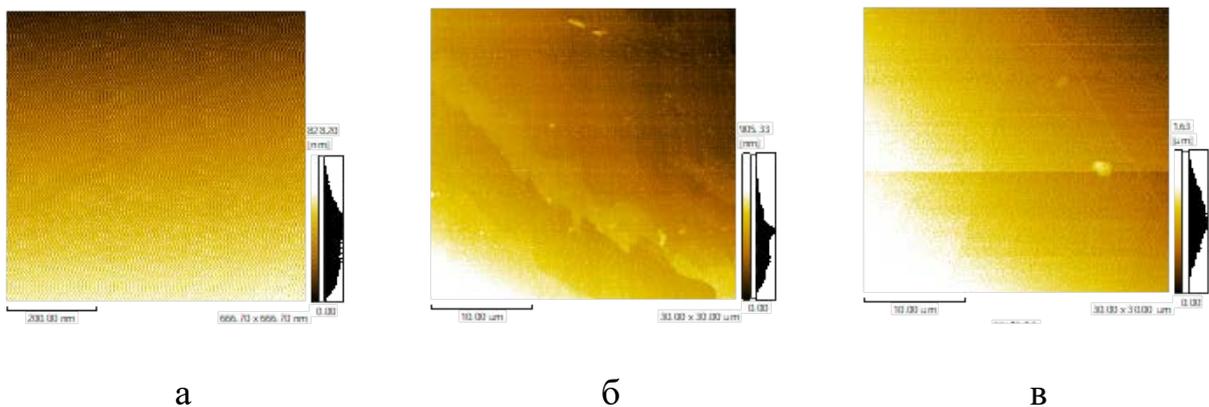
№ п/п	Доза облучения, эл/см <sup>2</sup>	Сингония	Параметры решетки	$E_g$ , эВ
1	необлученный	I4/mcm тетрагональная	$a = 8.068;$ $b = 8.068;$ $c = 6.816;$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^0$	1,652
2	$5 \times 10^{14}$	I4/mcm тетрагональная	$a = 8.061;$ $b = 8.061;$ $c = 6.795;$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^0$	1,657
3	$5 \times 10^{15}$	I4/mcm тетрагональная	$a = 8.056;$ $b = 8.056;$ $c = 6.771;$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^0$	1,666
4	$5 \times 10^{16}$	I4/mcm тетрагональная	$a = 8.062;$ $b = 8.062;$ $c = 7.136;$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^0$	1,663

Наблюдаемое явление объясняется с точки зрения эффекта малых доз. В процессе облучения твердых тел ионизирующим излучением в кристалле формируются неустойчивые пары Френкеля с частотой на 1-2 порядка выше, чем устойчивые структурные дефекты. При генерации и

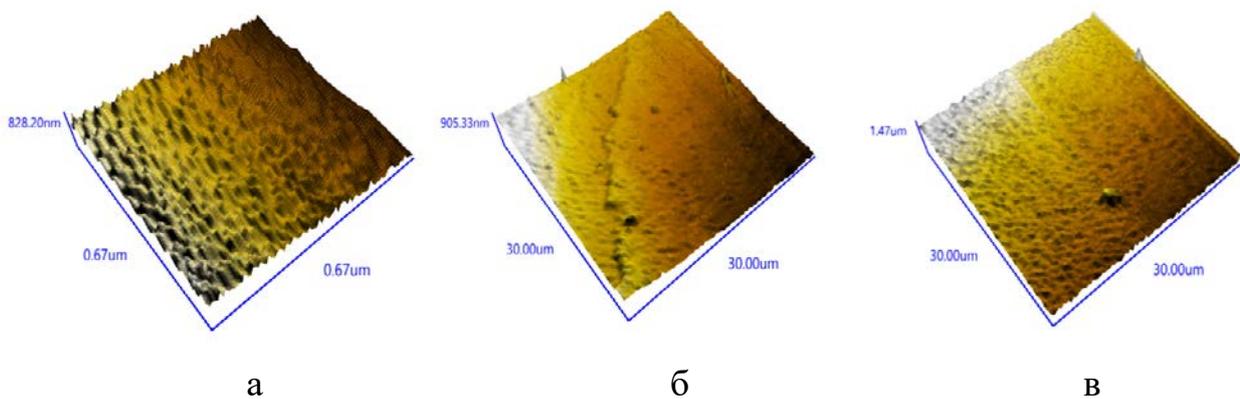
последующей аннигиляции этих неустойчивых френкелевских пар происходят кратковременные локальные изменения объема и его быстрое восстановление, в результате возникают волны упругих напряжений. Взаимодействие этих волн с существующими точечными дефектами может инициировать безактивационную миграцию существующих в объеме кристалла междоузельных атомов и их аннигиляцию с соответствующими вакансиями. Это приводит к «залечиванию» дефектов и переводу кристалла в более равновесное состояние по сравнению. Поэтому при малых дозах облучения (в нашем случае до флюенса эдектронов  $5 \times 10^{15}$  электрон/см<sup>2</sup>), в результате рекомбинации биографических комплементарных пар дефектов наблюдается снижение концентрации точечных нарушений в кристалле, что обуславливает его переход в более упорядоченное состояние.

При тех дозах облучения, при которых количество радиационно-наведенных дефектов превышает число исходных (биографических) дефектов (в данном случае при флюенсе электронов  $\Phi > 5 \times 10^{15}$  эл/см<sup>2</sup>), в кристалле начинается накопление устойчивых структурных нарушений. Это приводит к увеличению параметров кристаллической решётки и, как следствие, к уменьшению ширины запрещённой зоны.

Легирование, а также электронное облучение кристаллов  $\text{TlInSe}_2$  и  $\text{TlIn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Se}_2$ , существенно изменяют их морфологию поверхности. Введение примеси железа в состав кристалла  $\text{TlInSe}_2$  приводит к улучшению состояния поверхности, уменьшению максимального значения среднего арифметического отклонения профиля, а также снижению высоты средней шероховатости (смотрите рисунки 3 и 4).

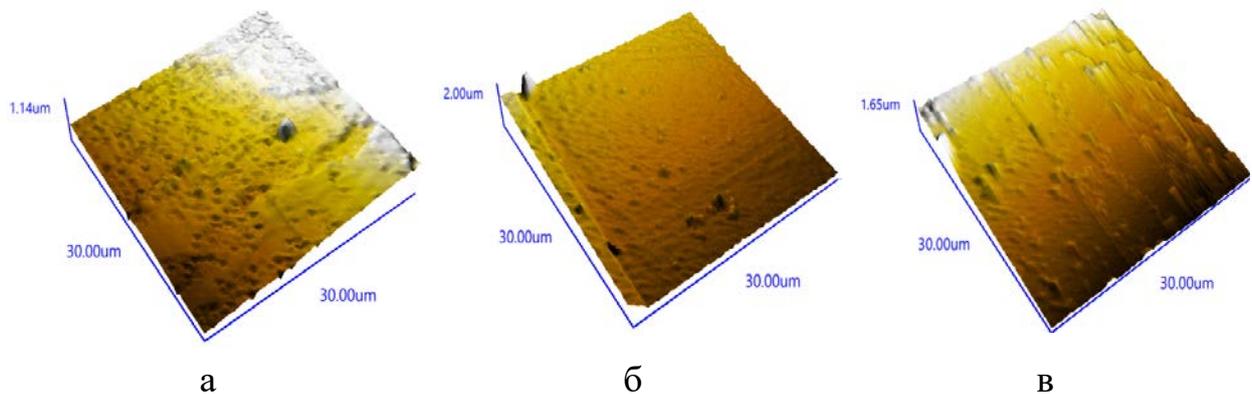


**Рис. 3. Двухмерное АСМ-изображение поверхности монокристаллов: (а)  $\text{TlIn}_{0,999}\text{Fe}_{0,001}\text{Se}_2$ ; (б)  $\text{TlIn}_{0,995}\text{Fe}_{0,005}\text{Se}_2$ ; (в)  $\text{TlIn}_{0,98}\text{Fe}_{0,02}\text{Se}_2$**

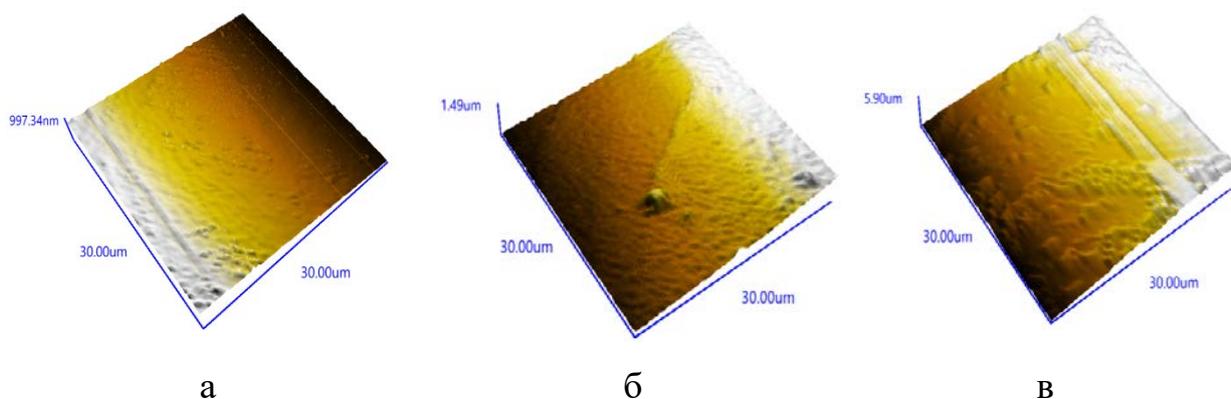


**Рис. 4. Объемное АСМ-изображение поверхности монокристаллов: (а)  $TlIn_{0,999}Fe_{0,001}Se_2$ ; (б)  $TlIn_{0,995}Fe_{0,005}Se_2$ ; (в)  $TlIn_{0,98}Fe_{0,02}Se_2$  [77]**

Микрорельеф поверхности монокристаллов системы  $TlIn_{1-x}Fe_xSe_2$  при значениях  $x=0.001\div 0.005$  является стойкими к воздействию электронов энергией 2 МэВ и до флюенсов  $5\times 10^{16}$  электрон/см<sup>2</sup>, а также  $\gamma$ -облучению дозами до  $10^7$  Р/с (смотрите рисунки 5 и 6).



**Рис. 5. Объемное АСМ-изображение поверхности монокристаллов  $TlIn_{1-x}Fe_xSe_2$  после  $\gamma$ -облучения дозой  $10^7$  рад: а)  $TlIn_{0,999}Fe_{0,001}Se_2$ ; б)  $TlIn_{0,995}Fe_{0,005}Se_2$ ; в)  $TlIn_{0,98}Fe_{0,02}Se_2$ ]**



**Рис. 6. Объемное АСМ-изображение поверхности монокристаллов  $TlIn_{1-x}Fe_xSe_2$  после облучения электронами флюенсом  $5\times 10^{16}$  электрон/см<sup>2</sup>: а)  $TlIn_{0,999}Fe_{0,001}Se_2$ ; б)  $TlIn_{0,995}Fe_{0,005}Se_2$ ; в)  $TlIn_{0,98}Fe_{0,02}Se_2$ ]**

Эта особенность кристаллов  $TlIn_{1-x}Fe_xS_2$  позволяет рассматривать их в качестве эффективных радиационно-стойких полупроводниковых материалов для создания фотоэлектронных приборов, работающих в условиях повышенной радиации. При значениях  $x \geq 0.02$  облучение ионизирующим излучением значительно ухудшает состояние поверхности кристаллов

В четвертой главе «Влияние примеси Fe на физические свойства кристаллов  $TlIn_{1-x}Fe_xS_2$  ( $x=0,001 \div 0,01$ )» приводятся технология получения легированных слоистых монокристаллов  $TlIn_{1-x}Fe_xS_2$  и результаты исследования их некоторых физических характеристик.

Методом прямого сплавления были синтезированы кристаллы  $TlInS_2$ , легированные ионами Fe и исследованы их физические характеристики. Железо вводилось в состав кристаллов в виде примеси, замещающей атомы индия в решетке. Таким образом общая формула синтезированных кристаллов имеет вид  $TlIn_{1-x}Fe_xS_2$ , где  $x = 0,001; 0,005, 0,01$ . После синтеза ампула с  $TlIn_{1-x}Fe_xS_2$  охлаждалась медленно и полученный продукт дополнительно подвергался гомогенизирующему отжигу при 900 К. Синтезированные таким образом образцы представляли собой поликристаллические слитки с крупноблочной структурой. На основе термографических исследований установлена однофазность выращенных монокристаллов. Выявлено, что в кристаллах  $TlIn_{1-x}Fe_xS_2$  ( $x = 0 \div 0,01$ ) с увеличением концентрации Fe понижаются температура плавления  $T_{пл}$  и температура кристаллизации  $T_{кр}$  (смотрите таблицу 2).

**Таблица 2**

**Температуры плавления и кристаллизации смещанных кристаллов  $TlIn_{1-x}Fe_xS_2$**

Образцы		$TlInS_2$	$TlIn_{0,999}Fe_{0,001}S_2$	$TlIn_{0,995}Fe_{0,005}S_2$	$TlIn_{0,99}Fe_{0,01}S_2$
$T_{пл}, ^\circ C$	Нач.	735	730	730	723
	Кон.	778	776	760	756
$T_{кр}, ^\circ C$	Нач.	680	678	665	660
	Кон.	665	665	660	653

На основании полученных данных подобран оптимальный режим, в соответствии с которым методом Бриджмена - Стокбаргера были выращены твердые растворы монокристаллов  $TlIn_{1-x}Fe_xS_2$  ( $x=0 \div 0,01$ ). Рентгенофазовый анализ показал однофазность синтезированных образцов. Межплоскостные расстояния, определенные по рентгенограммам образцов, однозначно индексируются в рамках моноклинной сингонии с параметрами решетки:  $a \sim b = 10,95 \text{ \AA}, c = 15,14 \text{ \AA}$ , пр. гр.  $P2/m$ ,  $\beta = 100^\circ$  (смотрите таблицу 3).

Таблица 3

Параметры элементарной ячейки монокристаллов  $\text{TlIn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{S}_2$   
( $x = 0.001-0.01$ )

Состав кристаллов	$a$	$b$	$c$
$\text{TlInS}_2$	10,926	10,958	15,268
$\text{TlIn}_{0,999}\text{Fe}_{0,001}\text{S}_2$	10,915	10,947	15,244
$\text{TlIn}_{0,995}\text{Fe}_{0,005}\text{S}_2$	10,894	10,926	15,215
$\text{TlIn}_{0,99}\text{Fe}_{0,01}\text{S}_2$	10,864	10,896	15,173

Параметры решетки кристаллов  $\text{Tl}(\text{InS}_2)_{1-x}(\text{FeSe}_2)_x$ , вычисленных по наиболее интенсивным дифракционным линиям, находятся в удовлетворительном согласии с решеточными характеристиками кристаллов  $\text{TlInS}_2$ .

Исследования стационарных характеристик фотопроводимости кристаллов  $\text{TlIn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{S}_2$  в температурном интервале 77–300 К (смотрите рисунок 7) показали, что электрофизические характеристики существенно зависят от состава и структуры кристаллов: с увеличением концентрации железа возрастает удельное сопротивление  $\rho$  образцов, ширина их запрещенной зоны  $E_g^\phi$ , определенная по максимумам спектральной фоточувствительности  $(h\nu)_{\max}$  кристаллов  $\text{TlIn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{S}_2$ .

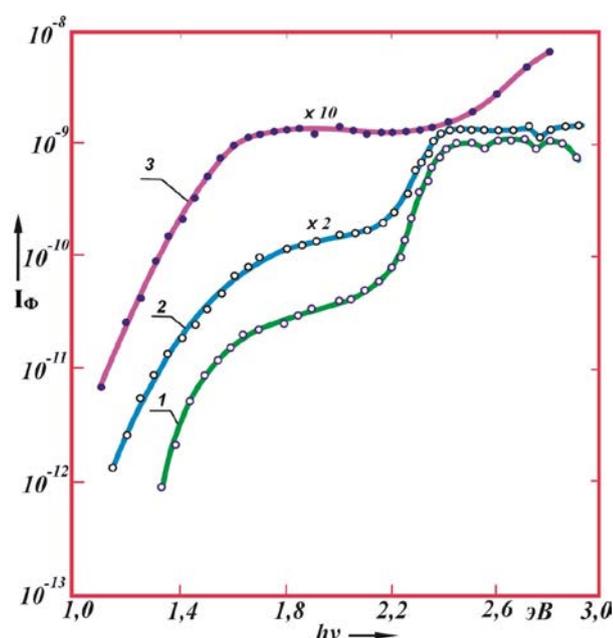
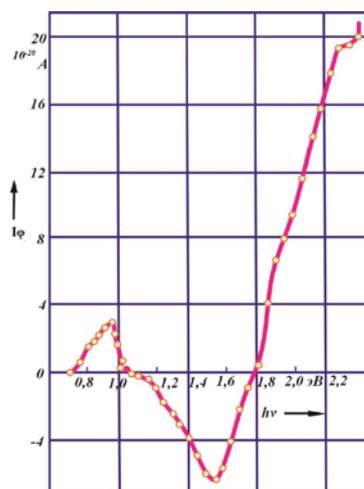


Рис. 7. Спектральные зависимости фототока монокристаллов  $\text{TlIn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{S}_2$  при 300 К.: 1 –  $x = 0$ ; 2 –  $x = 0,001$ ; 3 –  $x = 0,005$

В кристаллах  $TlIn_{1-x}Fe_xS_2$  обнаружено явление отрицательной фотопроводимости (смотрите рисунок 8), которая обусловлена перезарядкой рекомбинационных центров вследствие инжекции носителей заряда из контактов.



**Рис.8. Спектральное распределение фототока монокристалла  $TlIn_{1-x}Fe_xS_2$  ( $x=0$ ) при напряженности электрического поля  $10^3$  В/см при 77 К**

Форма кривой спектрального распределения отрицательной фотопроводимости свидетельствует о взаимодействии примесного света с двумя локальными центрами. Центр, ответственный за формирование длинноволновой границы отрицательной фотопроводимости, расположен на расстоянии 1,05 эВ от дна зоны проводимости. При участии второго локального центра наблюдается значительное увеличение глубины подавления темнового тока. Этот уровень находится на расстоянии 1,2 эВ от дна зоны проводимости.

Измерения вольт-амперных характеристик кристаллов  $TlIn_{1-x}Fe_xS_2$  показали линейную зависимость тока от напряжённости электрического поля вплоть до  $\sim 50$  В/см. При низких интенсивностях освещения фототок линейно зависит от освещённости, однако с увеличением освещённости зависимость становится нелинейной. Энергия возбуждающего светового потока составляла 2,4 эВ ( $h\nu$ ). При дальнейшем увеличении интенсивности возбуждения наблюдается сверхлинейная зависимость фототока от освещённости ( $I_{ph} \sim L^\alpha$ , где  $\alpha > 1$ ), которая сохраняется при понижении температуры.

В тех же экспериментальных условиях, при температуре 77 К, нижняя кривая демонстрирует три характерных участка зависимости фототока от освещённости ( $I_{ph} \sim L^\alpha$ ), где  $\alpha$  принимает значения 1, 0 и больше 1.

В спектрах фотопроводимости кристаллов  $TlIn_{1-x}Fe_xS_2$  в области поглощения отсутствует нисходящая ветвь, что свидетельствует о низкой скорости рекомбинации в поверхностном слое и высокой степени совершенства поверхности образцов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе исследования структурных, оптических, электрофизических и фотоэлектрических свойства твердых растворов монокристаллов  $TlIn_{(1-x)}Fe_xS_2$  и  $TlIn_{(1-x)}Fe_xSe_2$ , облученных гамма-лучами и потоком электронов, сделаны следующие выводы:

1. Твёрдые растворы  $TlIn_{1-x}Fe_xSe_2$  и  $TlIn_{1-x}Fe_xS_2$  однофазно кристаллизуются в тетрагональной и моноклинной сингониях соответственно. При легировании кристаллов, а также облучении ускоренными электронами с энергией 2 МэВ и плотностью тока пучка  $0.085 \text{ мкА/см}^2$  до флюенсов  $10^{17}$  электрон/см<sup>2</sup>, сохраняются однофазность, тип сингонии и пространственные группы образцов.

2. В процессе облучения кристалла  $TlIn_{0.98}Fe_{0.02}Se_2$  электронами до флюенса  $5 \cdot 10^{15}$  электронов/см<sup>2</sup>, отмечается уменьшение размеров элементарной ячейки, сопровождающееся ростом ширины запрещённой зоны ( $E_g$ ). При дальнейшем увеличении флюенса, наблюдается обратный эффект: размеры кристаллической решётки растут, в то время как значение  $E_g$  снижается.. Наблюдаемое явление объясняется с точки зрения эффекта малых доз: при облучении до флюенса  $5 \cdot 10^{15}$  электрон/см<sup>2</sup> в кристалле из-за рекомбинации нестабильных Френкелевских пар создаются упругие волны, которые приводят к рекомбинации комплементарных биографических дефектных пар и уменьшению дефектности кристалла. При тех дозах облучения, при которых количество радиационно-наведенных дефектов становится больше числа исходных биографических дефектов (при флюенсе облучения электронами  $\Phi > 5 \times 10^{15}$  электрон/см<sup>2</sup>), в кристалле накапливаются структурные дефекты, параметры кристаллической решетки увеличиваются, и соответственно уменьшается ширина запрещенной зоны кристалла.

3. Легирование кристаллов  $TlInSe_2$  ионами железа, а также облучение их гамма-лучами и электронами, существенно изменяют морфологию поверхности кристаллов. Введение примеси железа в кристаллы  $TlFeSe_2$  приводит к улучшению состояния поверхности, т.е. к уменьшению максимального значения среднего арифметического отклонения профиля и снижению высоты средней шероховатости поверхности.

4. Микрорельеф поверхности монокристаллов системы  $TlIn_{1-x}Fe_xSe_2$  при значениях  $x=0.001 \div 0.005$  является стойким к воздействию электронов энергией 2 МэВ и флюенсом  $5 \cdot 10^{16}$  эл/см<sup>2</sup>, а также  $\gamma$ -облучению дозами  $10^6$  и  $10^7$  Р/с. Эта особенность кристаллов  $TlIn_{1-x}Fe_xSe_2$  позволяет рассматривать их в качестве эффективных радиационностойких полупроводниковых материалов для создания фотоэлектронных приборов, работающих в условиях повышенной радиации.

5. Установлено, что с увеличением концентрации Fe в кристаллах  $TlIn_{1-x}Fe_xS_2$  ( $x=0 \div 0,01$ ) понижаются температура плавления и температура кристаллизации, а их удельное сопротивление  $\rho$ , ширина запрещенной зоны  $E_g^\phi$ , максимумы спектральной фототока  $(hv)_{\text{max}}$  увеличиваются.

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

---

**INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS**

**KHODJAEV UTKIRJON OKTAMOVICH**

**OPTICAL, ELECTROPHYSICAL AND PHOTOELECTRIC  
PROPERTIES OF  $\text{TlIn}_{(1-x)}\text{Fe}_x(\text{S,Se})_2$  MONOCRYSTALS**

**01.04.07 – Condensed matter physics**

**DISSERTATION ABSTRACT  
of the 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 at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number № B2024.2.PhD/FM1118.**

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

The abstract of the dissertation was posted in three (Uzbek, Russian, English (resume)) languages on the website of the Scientific Council at [www.inp.uz](http://www.inp.uz) and on the website of “Ziyonet” information and educational portal at [www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz).

**Scientific supervisor:** **Nuritdinov Izzatullo**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

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

**Parpiev Adhamjon**  
PhD on Physical and Mathematical Sciences,  
Senior Researcher

**Leading organization:** **Fergana Polytechnic Institute**

The defense of the dissertation will be held on “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2025 at \_\_\_ at the meeting of Scientific Council No. DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 at the Institute of Nuclear Physics (Address: Ulugbek settlement, 100124 Tashkent city, tel. (+99871)289-31-41; fax: (+99871)289-36-65; e-mail: [info@inp.uz](mailto:info@inp.uz)).

The doctoral (PhD) dissertation can be looked through in the Information Resource Center of Institute of Nuclear Physics (registered under No. \_\_\_\_\_) Address: Ulugbek settlement, 100124 Tashkent city. tel. (+99871)289-31-19).

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

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

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

**E.M. Tursunov**  
Chairman of scientific seminar of the Scientific  
Council on Award of Scientific Degrees,  
D.Ph.-M.S., Professor

## INTRODUCTION (annotation of PhD dissertation)

**The aim of the research work** The aim of the dissertation is to investigate the influence of iron impurity concentration and ionizing radiation on the crystal structure, electrophysical, photoelectric, and optical properties of solid solutions  $\text{TlIn}_{(1-x)}\text{Fe}_x\text{S}_2$ ,  $\text{TlIn}_{(1-x)}\text{Fe}_x\text{Se}_2$ .

### **The tasks of the research work:**

Conduct scanning electron microscopy and probe micro-X-ray spectral analyses of grown crystals with variable composition, determine the degree of deviation from stoichiometry and uniformity violations during their growth;

Determine the symmetry and nature of changes in the corresponding lattice parameters due to gamma and electron irradiation and partial substitution of indium ions with iron ions, using X-ray structural analysis;

Study the effect of substituting indium (In) ions with iron (Fe) ions on the electrical, photoelectric, and optical properties of grown crystals before and after electron irradiation;

Identify applied features and prospects for the technical application of the grown solid solutions of new layered semiconductor crystals.

**The object of research work** Solid solutions of complex chalcogenide crystals  $\text{TlIn}_{(1-x)}\text{Fe}_x\text{S}_2$ ,  $\text{TlIn}_{(1-x)}\text{Fe}_x\text{Se}_2$ .

**The subject of the research work** Crystal structure, surface morphology, electrophysical, photoelectric, and optical properties of solid solutions of complex chalcogenide crystals  $\text{TlIn}_{(1-x)}\text{Fe}_x\text{S}_2$ ,  $\text{TlIn}_{(1-x)}\text{Fe}_x\text{Se}_2$ .

### **Scientific novelty of the research work:**

It was established that the solid solutions  $\text{TlIn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Se}_2$  and  $\text{TlIn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{S}_2$  crystallize in a single phase in tetragonal (space group  $I4/mcm$  with parameters  $a = 8.068 \text{ \AA}$ ,  $b = 8.068 \text{ \AA}$ ,  $c = 6.816 \text{ \AA}$ ) and monoclinic (space group  $P2/m$  with  $a = 10.896 \text{ \AA}$ ,  $b = 10.896 \text{ \AA}$ ,  $c = 15.173 \text{ \AA}$ ) systems, respectively. Upon doping with Fe ions, the crystal systems and space groups are preserved, while an increase in impurity concentration leads to a reduction in crystal lattice parameters;

A low-dose effect was observed in  $\text{TlIn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Se}_2$  solid solutions (radiation shaking): with an increase in gamma-ray dose from a  $^{60}\text{Co}$  source up to  $10^7 \text{ Rad}$ , as well as electron irradiation up to a fluency of  $5 \times 10^{15} \text{ electrons/cm}^2$ , the unit cell parameters decrease, and the bandgap  $E_g$  increases due to defectness decrease in the crystals. However, with further dose growth, the lattice parameters increase, and  $E_g$  decreases due to radiation-induced defects;

It was determined that doping with iron ions, as well as irradiation with gamma rays and electrons, significantly alters the surface morphology of  $\text{TlInSe}_2$  single crystals and  $\text{TlIn}_{0.98}\text{Fe}_{0.02}\text{Se}_2$  solid solutions: iron impurity improves the surface condition of  $\text{TlInSe}_2$  crystals, while electron irradiation to a fluency of  $5 \times 10^{16} \text{ electrons/cm}^2$  causes significant defect states on the surface of both undoped and doped crystals;

It was established that the specific resistance  $\rho$ , bandgap  $E_g$ , and spectral photocurrent maxima  $(hv)_{\max}$  increase with rising iron ion concentration in single crystals of  $\text{TlIn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{S}_2$  solid solutions.

**Implementation of the research results.** Based on the obtained results on the study of the structural, optical, electrophysical and photovoltaic properties of single crystals  $\text{TlInSe}_2$ ,  $\text{TlInS}_2$  and  $\text{TlIn}_{1-x}\text{Fe}_x(\text{S},\text{Se})_2$ :

establishment of single-phase states in  $\text{TlIn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Se}_2$  monocrystals with a tetragonal structure (space group  $I4/mcm$ ) and in the solid solution  $\text{TlIn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{S}_2$  ( $x=0$  to  $0.01$ ) with a monoclinic structure (space group  $P2/m$ ,  $\beta = 100^\circ$ );

improvement of surface states upon doping  $\text{TlInSe}_2$  and  $\text{TlInS}_2$  crystals with iron ions;

determination that with increasing iron ion concentration in  $\text{TlIn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{S}_2$  solid solution monocrystals, the specific resistance  $\rho$ , bandgap width  $E_g$ , and the position of the spectral photocurrent maximum  $(hv)_{\max}$  increase.

These studies were conducted within the framework of the planned research theme "Crystal Physics of  $\text{TlGaS}(\text{Se})_2 - \text{Nd}_2\text{S}(\text{Se})_3$ ,  $(\text{TlGaSe}_2)_x(\text{TlBiSe}_2)_{1-x}$ ,  $\text{TlGaS}_2\text{-TlGaSe}_2$ ,  $\text{TlGaSe}_2\text{-TlGaS}_2$ ,  $\text{TlInS}_2\text{-TlInSe}_2$  Systems and the Influence of Rare-Earth Elements" at the Institute of Physics, Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan (letter No. 029-08/476 dated 25.11.2024).

The use of scientific results enabled the analysis of the dependence of physical properties of complex semiconductors on their composition and impurity content; clarification of the nature of changes in the crystal lattice parameters of  $\text{TlInS}_2$  and  $\text{TlInSe}_2$  solid solutions upon doping with rare-earth impurities, as well as improvement of the surface states of these crystals upon doping with other impurities.

It was shown that doping  $\text{TlInSe}_2$  crystals with Fe impurities (up to 2 mol.%) preserves their single-phase nature, crystal symmetry, and space group, improves surface states, and reduces crystal lattice parameters. Upon electron irradiation (up to  $5 \cdot 10^{15}$  el/cm<sup>2</sup>), the unit cell parameters decrease, and the bandgap width increases.

The obtained results were utilized by foreign scientists (references in international scientific journals: "Journal of Modern Physics B", 2024, p. 2550103; "Materials Research Innovations", 2024, pp. 1-5; "Eurasian Physical Technical Journal", 2024, V. 21, No. 2 (48), pp. 5-13). The use of these scientific results provided a basis for understanding the mechanisms of changes in crystal lattice parameters, bandgap width, and surface states of crystals such as  $\text{TlInSSe}$ ,  $\text{ZnSe}$ , and  $\text{Md}_2\text{Zn}_2\text{O}_7$  upon doping with impurities and exposure to ionizing radiation.

**The structure and volume of the dissertation.** The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion and a list of references. The volume of the dissertation is 107 pages.

**ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ**  
**СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**  
**LIST OF PUBLISHED WORKS**

**I бўлим (I часть; part I)**

1. Умаров С.Х., Нуритдинов И., Муминова З.А., Ашуров Ж.Ж., **Ходжаев У.О.**, Хамраев Р.Р. Методика и анализ экспериментов по измерению спектров поглощения и отражения кристаллов  $TlInS_2$  // Доклады Академии наук Республики Узбекистан. – Ташкент, 2008. – № 1. – С. 20 – 23 (01.00.00. №7)

2. Умаров С.Х., Облокулов А.Р., Муминова З.А., **Ходжаев У.О.**, Халлоков Ф.К., Нарзуллаева З.М., Сафарова Р.С. О механизме отрицательной фотопроводимости в кристаллах  $TlInS_2$  // Доклады Академии наук Республики Узбекистан. – Ташкент, 2019. – № 2. – С. 19 – 25 (01.00.00. №7)

3. Нуритдинов И., **Ходжаев У.О.**, Халлоков Ф.К., Гасанов Н.З., Умаров С.Х. Влияние ускоренных электронов, гамма-излучения на микрорельеф поверхности кристалла  $TlIn_{1-x}Fe_xSe_2$  ( $x=0.001, 0.005, 0.02$ ) // Физика полупроводников и микроэлектроника. – Ташкент, 2022. – № 2(4). – С. 60–67 (01.00.00. № 16).

4. Nuritdinov I., Tashmetov M.Yu., **Khodzhaev U.O.**, Umarov S.Kh., Khallokov F.K. Influence of electron irradiation on the crystal structure, surface microrelief and bandgap width of the triple crystals of iron doped monoselenide of thallium and indium // Eurasian Physical Technical Journal. – Karaganda State University (Kazakhstan), 2023. – Vol. 20. – No. 4 (46). – pp. 23-32 (№3. Scopus; IF=0,614)

**II бўлим (II часть; part II)**

5. Нуритдинов И., Ашуров Ж.Ж., Халлоков Ф.К., **Ходжаев У.О.** Исследование электрических и фотоэлектрических свойств монокристаллов  $Tl(InS_2)_{1-x}(FeSe_2)_x$  ( $x=0,001\div 0,015$ ) вблизи структурно – фазовых переходов // Fizika fanining rivojida istedodli yoshlarning o'zni: Ilmiy – amaliy konferensiya maqolalar to'plami. – Toshkent, 2015. – В. 151-152.

6. **Ходжаев У.О.**, Ашуров Ж.Дж., Нарзуллаева З.М., Намозов И.У. Исследование электрических и фотоэлектрических свойств монокристаллов  $Tl(InS_2)_{1-x}(FeSe_2)_x$  ( $x=0,001;0,01$ ) вблизи структурно-фазовых переходов // Ways of science development in modern crisis conditions: abstracts of the 1st International Scientific and Practical Internet Conference, May 28-29, 2020. – Dnipro, 2020. – P.2. – pp. 495 - 498.

7. Умаров С.Х., Матиев А.Х., **Ходжаев У.О.**, Сафарова Р.С., Нарзуллаева З.М. Фотоэлектрические характеристики светочувствительного материала  $TlIn_{1-x}Fe_xS_2$  ( $x=0-0.01$ ) // Global Science and Innovations 2019: Central Asia. Серия физико-математические науки. – Нурсултан (Казахстан), 2019. – С.7-11.

8. Умаров С.Х., Ашуров Ж.Дж., **Ходжаев У.О.**, Нарзуллаева З.М., Намозов И.У. Некоторые фотоэлектрические характеристики монокристаллов р-TlInSe<sub>2</sub> // Бухоро давлат университети магистрантлар ва иктидорли талабаларнинг «Тафаккур ва талкин» мавзусидаги илмий-амалий онлайн конференция. – Бухоро: Бухоро давлат университети, 2020. – С.106–113.

9. Умаров С.Х., Гасанов Н.З., Ашуров Ж.Дж., **Ходжаев У.О.**, Нарзуллаева З.М. Технология получения легированных слоистых монокристаллов TlMC<sub>2</sub><sup>VI</sup> (M- In, Ga; C- S, Se) // Integration of Education, Science and Business in Modern Environment: Summer Debates: abstracts of the 2nd International Scientific and Practical Internet Conference, August 17-18, 2020. – Dnipro, 2020.– С. 495 – 498.

10. Умаров С.Х., **Ходжаев У.О.**, Хожиев Т.С. Изучение дифференциально-термическим и рентгенофазовым анализом системы TlInS<sub>2</sub> - TlFeSe<sub>2</sub> // Материалы VIII Международной научно-практической конференции «Наука и образование в современном мире: вызовы XXI века» (Физико-математические науки). Апрель 2021. – Нурсултан (Казахстан), 2021. – С.26–27.

11. Нуриддинов И., **Ходжаев У.О.**, Халлоков Ф.К. Исследование кристаллической структуры TlIn<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub>Se<sub>2</sub> (x=0.001) после электронного облучения // Ёш олимлар ва физик талабаларнинг II Республика илмий анжумани материаллари. –Тошкент, 2023. – Б. 286-289.