

**ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМий
ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.02/30.12.2019.ФМ/Т.33.01 РАҚАМЛИ
ИЛМий КЕНГАШ**

ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ

ХАЛЛОКОВ ФАРХОД КАРИМОВИЧ

**ЛЕГИРЛАНГАН ВА ЭЛЕКТРОН БИЛАН НУРЛАНТИРИЛГАН $TlInS_2$
КРИСТАЛЛАРИНИНГ ТУЗИЛИШИ ВА ХОССАЛАРИ**

01.04.07 – Конденсирланган ҳолат физикаси

**физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси
АВТОРЕФЕРАТИ**

Тошкент – 2022

**Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD)
диссертацияси автореферати мундарижаси**

**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**

Халлоков Фарход Каримович

Легиранган ва электрон билан нурлантирилган TlInS_2
кристалларининг тузилиши ва хоссалари..... 3

Халлоков Фарход Каримович

Структура и свойства легированных и облученных электронами
кристаллов TlInS_2 23

Khallokov Farhod Karimovich

Structure and properties of doped and electron-irradiated TlInS_2
crystals..... 43

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works 48

**ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.02/30.12.2019.ФМ/Т.33.01 РАҚАМЛИ
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ

ХАЛЛОКОВ ФАРХОД КАРИМОВИЧ

**ЛЕГИРЛАНГАН ВА ЭЛЕКТРОН БИЛАН НУРЛАНТИРИЛГАН $TlInS_2$
КРИСТАЛЛАРИНИНГ ТУЗИЛИШИ ВА ХОССАЛАРИ**

01.04.07 – Конденсирланган ҳолат физикаси

**физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси
АВТОРЕФЕРАТИ**

Тошкент – 2022

Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2019.2.PhD/FM364 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Ўзбекистон Республикаси Фанлар Академияси Ядро физикаси институтида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифаси (www.inp.uz) ва “ZiyoNet” ахборот-таълим тармоғида (www.ziynet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:

Ташметов Маннаб Юсупович

физика-математика фанлари доктори, профессор

Расмий оппонентлар:

Ахмеджанов Фарҳад Рашидович

физика-математика фанлари доктори, доцент

Муссаева Малика Анваровна

физика-математика фанлари доктори, катта илмий ходим

Етакчи ташкилот:

Мирзо Улуғбек номидаги Ўзбекистон Миллий университети қошидаги Яримўтказгичлар физикаси ва микроэлектроника илмий-тадқиқот институти

Диссертация ҳимояси Ядро физикаси институти ҳузуридаги DSc.02/30.12.2019.FM/T.33 рақамли Илмий кенгашининг 2022 йил “__” _____ соат ____ даги мажлисида бўлиб ўтади (Манзил: 100214, Тошкент ш., Улуғбек кўрғони, ЯФИ; тел. (+99871)289-31-41; факс (+99871)289-36-65; e-mail: info@inp.uz).

Диссертация билан Ядро физикаси институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (_____ рақам билан рўйхатга олинган). Манзил: 100214, Тошкент ш., Улуғбек кўрғони, ЯФИ; тел. (+99871) 289-31-19.

Диссертация автореферати 2022 йил “__” _____ да тарқатилди.
(2022 йил “__” _____ даги ____ рақамли реестр баённомаси).

И.И.Садиков

Илмий даражалар берувчи
илмий кенгаш раиси ўринбосари,
т.ф.д., профессор

О.Р.Тожибоев

Илмий даражалар берувчи
илмий кенгаш илмий котиби, ф.-м.ф. PhD,
катта илмий ходим

Э.М.Турсунов

Илмий даражалар берувчи илмий
кенгаш қошидаги илмий семинар раиси,
ф.-м.ф.д., профессор

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Ҳозирги вақтда дунёда бир нечта элементларни ўз ичига олган ва уларнинг хусусиятлари ҳамда хоссаларини бошқариш имконини берувчи янги истиқболли ярим ўтказгич материалларни тадқиқ қилишга қизиқиш ортиб бормоқда. $A^{III}B^{III}C^{VI}_2$ типдаги $TlInS_2$ монокристаллари ана шундай кўп компонентли $1.22 \div 2.56$ эВ оралиғида кенг зонали яримўтказгичлардан биридир. Бундай яримўтказгичнинг таркибини ўзгартириш электрофизик, фотоэлектрик, оптик ва бошқа хусусиятларни ўзгартиришга кенг имкон беради. Кенг зонали $TlInS_2$ яримўтказгичлари фотоэлектрик конверторлар, спектр анализаторлари ва радиация детекторларини ишлаб чиқариш учун истиқболлидир.

$TlInS_2$ яримўтказгичининг тақиқланган зоналари локал сатҳлар билан тўйинган ва хоссаларини бошқариш учун кристалнинг тақиқланган зонасидаги локал ҳолатларининг спектрлари тўғрисида тўлиқ маълумот зарур. Яримўтказгичли бирикмаларнинг хоссаларини мақсадли бошқаришда кенг фойдаланадиган хусусиятларидан бири – бу аралашмалар ва структуравий нуқсонларнинг “аҳамиятсиз” кичик микдордаги концентрацияси, шунингдек, турли хил ташқи таъсирларга сезгирлиги (ҳарорат, ёритилиш, нурланиш, деформация ва бошқаларга) ва уларнинг электрофизик ҳамда фотоэлектрик характеристикаларига, структурасига таъсиридир. Шунинг учун легирланган ва электрон билан нурлантирилган $TlInS_2$ кристалларининг тузилиши ҳамда хоссаларини ўрганиш долзарб вазифа ҳисобланади.

Ўзбекистонда детекторлар ва датчикларни ишлаб чиқаришда ишлатиладиган янги яримўтказгичли материалларни тадқиқ қилишга, илмий базани яратиш бўйича дунё миқёсидаги фундаментал тадқиқотларни амалга оширишга ва замонавий ускуналарни ишлаб чиқаришда келгусида қўлланиладиган технологияларни ривожлантиришга катта эътибор қаратилмоқда. Мамлакатимизда илм-фанни ривожлантириш ва уни кенг амалда қўллаш учун муҳим аҳамиятга эга бўлган ушбу фундаментал тадқиқотларнинг йўналишлари 2022-2026 йилларга мўлжалланган Янги Ўзбекистоннинг тараққиёт Стратегиясида¹ ўз аксини топган.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2022 йил 28 январидagi ПФ-60-сонли “2022-2026 йилларга мўлжалланган янги Ўзбекистоннинг тараққиёт стратегияси тўғрисида”, 2017 йил 16 февралдаги ПФ-4958-сонли “Олий ўқув юртидан кейинги таълим тизимини янада такомиллаштириш тўғрисида”ги фармонлари, 2017 йил 17 февралдаги ПҚ-2789-сонли “Фанлар академияси фаолиятини янада такомиллаштириш, илмий ишларни ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштириш бўйича чора тадбирлар тўғрисида”ги қарори ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳукукий ҳужжатларда

¹ 2022 йил 28 январдаги ПФ-60-сонли “2022-2026 йилларга мўлжалланган Янги Ўзбекистоннинг тараққиёт стратегияси тўғрисида”ги Ўзбекистон Республикаси Президентининг Фармони.

белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот иши республика фан ва технологиялари ривожланишининг II. “Энергетика, энергия тежамкорлиги ва муқобил энергия манбалари” устувор йўналишига мувофиқ бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Бугунги кунга қадар ўта тоза ва ҳар хил киришмалар билан легирланган TlInS_2 монокристалларини синтез қилиш технологияси ишлаб чиқилган. TlInS_2 кристалларининг структураси, спектроскопияси ва хоссалари дунё тадқиқот марказларининг етакчи олимлари, жумладан: япониялик (С.Кашида, Й.Кобояши, Р.Матсумото), исроиллик (А.М.Панич), германиялик (В.Хенкел), озарбайжонлик (К.Р.Аллабердиев, Г.Д.Хусейнов, Г.В.Абдуллаев, С.Н.Мустафаева, Н.Мамедов, В.Д.Рустамов, Е.М.Керимова, Е.М.Гожаев), украиналик (А.В.Гомоннаи, Ю.М.Азхнук, И.Петришейнц, О.О.Гомоннаи), белоруссиялик (А.У.Шелег, В.Г.Гуртовой), туркиялик (И.Гулер, Н.М.Гасанли), ўзбекистонлик (С.Н.Умаров, И.Нуритдинов) мутахассислар томонидан ўрганилган. Тадқиқот натижалари шуни кўрсатадики, бу бирикмалар фотоэлектрон қурилмаларни яратиш учун истиқболли яримўтказгич материаллардир.

Ҳозирги кунга қадар олиб борилган тадқиқотлар натижасида TlInS_2 кристаллининг структураси аниқланган ва унда гамма нурларининг юқори дозаларида юпқа сирт қатламида дастлабки моноклиник фазадан гексагонал фазага фазавий ўтиш топилган. TlInS_2 да олтингугурт атомларининг бир қисмига селен атомларини киритиш орқали $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{III}}\text{C}_2^{\text{VI}}$ типдаги TlInSSe нинг структураси, фазавий диаграммаси, оптик хусусиятлари ва Раман спектроскопияси ўрганилган. $\text{TlInS}_{2-x}\text{Se}_{2(1-x)}$ да структурали фазавий ўтиш тадқиқ қилинган.

Бироқ тезлаштирилган электронларнинг TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) ва $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) хоссаларига, сирт морфологиясига ва структурасига таъсири ўрганилмаган. Бундай тадқиқотлар кўп кизиқиш уйғотади, чунки электронларнинг модда билан ўзаро таъсири механизмлари гамма нурланиш билан ўзаро таъсир механизмидан фарқ қилади, бу эса бошқа структуралар ва хоссаларнинг пайдо бўлишига олиб келиши мумкин. Шунинг учун TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) ва $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) системалардаги структураларни, нуқсонларни ва электронлар билан нурлантиришининг физик жараёнлар хусусият ҳамда қонуниятларига таъсирини ўрганиш долзарб вазифадир.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган илмий тадқиқот муассасасининг илмий тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация иши Ядро физикаси институти илмий тадқиқот ишлари режасининг Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2019 йил 21 ноябрдаги ПҚ-4526-сонли қарори асосида 2020-2024 йилларга мўлжалланган илмий тадқиқот ишлари дастури юзасидан “Легирланган монокристаллик

кремний ядро трансмутациясида радиацион-стимулланган жараёнлар” ва “Истикболли сцинтилляторлар ва диодли лазерларда қўлланиладиган кенг зонали оксидлар ҳамда фторид қаттиқ жисм материалларининг спектрал-люминисцент тавсифлари ва радиациявий фаоллаштирилган ходисалар” мавзулар доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади легирланган ва электронлар билан нурлантирилган TlInS_2 кристалларининг структураси ҳамда хусусиятларини аниқлашдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

энергияси 2 МэВ ва турли флюенсли электронларнинг TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) ва $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) монокристалларнинг сирт морфологиясига таъсирини ўрганиш;

TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) ва $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) монокристаллар ҳамда поликристалларнинг структураларини рентген дифракцион фазавий таҳлил орқали аниқлаш;

TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) ва $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) монокристалл ҳамда поликристалларнинг кристалл структураларига ва структура параметрларига турли флюенсдаги электронларнинг таъсирини ўрганиш;

TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) ва $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$)ларда турли флюенсли электронлар таъсиридан олдин ҳамда кейин ёруғликнинг комбинацион сочилиши (Раман спектрлари)ни тадқиқ қилиш;

TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) ва $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$)ларни турли флюенсли электронлар билан нурлантиришдан олдин ҳамда кейин кристаллитлар ўлчамлари ва дислокация зичликларини аниқлаш;

TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) ва $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) монокристалларнинг 2 МэВ энергияли ҳамда турли флюенсли электронлар таъсирида тақиқланган зоналарининг кенглигини ва микроқаттиқлигини ўрганиш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) ва $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) кристаллари структураси ва хоссалари олинган.

Тадқиқотнинг предметини TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) ва $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) кристалларининг кристалл тузилиши, морфологияси, хоссалари, Раман спектрларининг электронлар флюенсига боғлиқлиги ташкил этади.

Тадқиқотнинг усуллари: рентген нурлари дифракцияси, тўлиқ профилли таҳлил (Ритвельд усулида), атом-куч ва электрон сканерлаш микроскопияси, Раман спектроскопияси, Виккерс микроқаттиқлиги ва оптик спектроскопия усуллари.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

энергияси 2 МэВ бўлган электронлар билан $2 \cdot 10^{17}$ эл/см² флюенсда нурлантирилиш натижасида ва “радиациявий силкитиш” туфайли TlInS_2 монокристаллининг икки фазали (ф.г.Р6₃/mmc гексагонал ва ф.г.С2/с моноклин структура) ҳолатдан гексагонал структура эга бўлган бир фазали (ф.г.Р6₃/mmc) ҳолатга ўтиши аниқланган;

биринчи марта моноклин структурага эга $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) монокристалл ва поликристаллининг радиацияга чидамлилиги электронлар билан $2 \cdot 10^{17}$ эл/см² флюенсгача нурлантириш орқали далилланган;

TlInS_2 даги индий атомларини хром атомлари билан қисман алмаштириш $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) монокристаллида гексагонал структурага эга бўлган бир фазага ҳолатнинг шаклланишига ёрдам бериши ва бу структура эса $2 \cdot 10^{17}$ эл/см² флюенсда электронлар билан нурлантирилганда сақланиши аниқланган;

биринчи марта TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) ва $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) монокристалларини $1.5 \cdot 10^{17}$ эл/см² флюенсда электронлар билан нурлантирилгандан сўнг кристаллитлар ўлчамининг ошиши ҳамда дислокациялар зичлигининг камайиши ҳисобига, уларни микрокаттиқлигининг ошиши исботланган;

TlInS_2 монокристаллидаги олтингугурт атомларининг бир қисмини селен билан алмаштирилганда тақиқланган зона кенглигининг камайиши, индий атомларининг бир қисмини хром билан алмаштирилганда тақиқланган зона кенглигининг ортиши ҳамда TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) ва $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) монокристалларини $1.5 \cdot 10^{17}$ эл/см² флюенсда электронлар билан нурлантирилганда эса атомлараро масофаларнинг ўзгариши туфайли тақиқланган зонанинг кенглигининг камайиши аниқланган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

$1.5 \cdot 10^{17}$ эл/см² флюенсли электронлар билан нурлантириш таъсирида TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) ва $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) монокристалларнинг сиртга яқин қатлами мустаҳкамланганлиги кўрсатилган;

TlInS_2 монокристаллидаги олтингугурт атомларининг селен атомлари билан қисман алмаштирилиши $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) да моноклиник тузилишга эга бўлган бир фазага (ф.г. С2/с) ҳолатнинг ҳосил бўлишини рағбатлантириши аниқланган;

электронлар билан нурлантириш натижасида монокристаллнинг кристаллик даражасининг яхшиланиши аниқланган, бу намунани синтез қилиш жараёнида ҳосил бўлган нуқсонлар (дислокациялар, кучланиш) радиациявий тобланиши билан боғлиқ.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги замонавий юқори аниқликдаги қурилма ва асбоблардан ҳамда бир-бирини тўлдирувчи физик тажриба усуллар мажмуасидан фойдаланилганлик, натижаларнинг барқарорлиги, шунингдек, уларнинг мавжуд адабиёт маълумотлари ва умумий физик қонуниятларига мос келиши билан тасдиқланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Натижаларнинг илмий аҳамияти тезлаштирилган электронларнинг TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) ва $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) кристаллари тузилиши, сирт морфологияси ва хоссаларига таъсир қилиш қонуниятини аниқлашдан иборат бўлиб, бу уларни кенг зонали ярим ўтказгичларда радиация таъсирида, хусусан, юқори энергияли электронлар таъсирида нуқсонлар ҳосил бўлиши,

кристаллитлар ўлчамининг ва микроқаттиқликнинг ўзгариши, фаза ўтишлар ҳақидаги мавжуд назарияларни ривожлантириш имконини беради.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти электронлар билан нурлантирилганда $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) монокристалл ва поликристалл нурлантиришга чидамлилигини аниқлашдан иборат бўлиб, бу уларни фотоэлектрик конверторлар, спектр анализаторлари ва ионлаштирувчи нурланиш детекторлари, деформация ўлчагичлар ишлаб чиқариш учун истиқболли яримўтказгич материаллар сифатида тадбиқ қилиш билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Легирланган ва электронлар билан нурлантирилган TlInS_2 кристалларининг тузилиши ҳамда хоссаларини аниқлаш учун олинган натижаларга асосланиб:

TlInS_2 монокристаллида икки фазали ҳолатдан гексагонал структурага эга бўлган бир фазали ҳолатга ўтишга оид хулосалари Физика институтида қўлланилган (Озарбайжон Республикаси фан ва таълим вазирлиги Физика институти 06.09.2022 йилдаги 029-08/479-сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш полиморф ўзгаришларга мойил бўлган монокристалларнинг кристалл панжараси параметрларини аниқлаштиришга имкон берган;

электронлар билан нурлантирилганда аниқланган $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) монокристалл ва поликристаллининг моноклиник структурасининг радиацияга чидамлилиги Физика институти “Кристаллофизика” лабораториясининг режалаштирилган мавзуси доирасидаги тадқиқотларда қўлланилган (Озарбайжон Республикаси фан ва таълим вазирлиги Физика институти 06.09.2022 йилдаги 029-08/479-сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш мураккаб яримўтказгичларнинг физик хоссалари уларнинг таркибига боғлиқлигини таҳлил қилишга хизмат қилган;

$\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0,01$) монокристаллида электронларнинг $2 \cdot 10^{17}$ эл/см² флюенсгача нурлантиришда бир фазали барқарор гексагонал структуранинг юзага келиши Физика институтининг “Кристаллофизика” лабораториясининг режалаштирилган мавзуси бўйича тадқиқотлар доирасида қўлланилган (Озарбайжон Республикаси фан ва таълим вазирлиги Физика институти 06.09.2022 йилдаги 029-08/479-сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш мураккаб яримўтказгичлар хоссаларининг киритмалар миқдорига боғлиқлигини таҳлил қилишга имкон берган;

TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ва $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ монокристаллари $1.5 \cdot 10^{17}$ эл/см² флюенсли электронлар билан нурлантирилгандан сўнг микроқаттиқлик белгиланган тартибда ўсиши Физика институтида қўлланилган (Озарбайжон Республикаси фан ва таълим вазирлиги Физика институти 06.09.2022 йилдаги 029-08/479-сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш мураккаб яримўтказгичларнинг физик хоссалари уларнинг таркибига боғлиқлигини таҳлил қилишга ёрдам берган;

TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ва $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ монокристалларнинг легирланиши ҳамда $1.5 \cdot 10^{17}$ эл/см² флюенсли электронлар билан нурлантиришида TlInS_2

монокристаллида тақиқланган зона кенглигининг ўзгаришлари режалаштирилган “ $\text{TlGaS}(\text{Se})_2 - \text{Nd}_2\text{S}(\text{Se})_3$, $\text{TlInS}_2 - \text{TlInSe}_2$ системаларининг кристаллофизикаси ва уларга ноёб Ер элементларининг таъсири” мавзусидаги тадқиқотлар доирасида фойдаланилган (Озарбайжон Республикаси фан ва таълим вазирлиги Физика институти 06.09.2022 йилдаги 029-08/479-сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш мураккаб яримўтказгичларнинг физик хоссалари уларнинг таркиби ва киритмалар миқдорида боғлиқлигини таҳлил қилишга имкон берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Тадқиқот асосий натижалари 4 та халқаро ва республика миқёсидаги илмий-амалий анжуманларда маъруза ҳамда муҳокама қилинган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мавзуси доирасида жами 9 та илмий иш нашр этилган, жумладан, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 3 та мақола, шулардан, 2 таси хорижий журналларда.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация иши кириш, учта боб, хулоса ва фойдаланилган адабиётлар рўйхатидан иборат. Диссертация ҳажми 121 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги, унинг асосланганилиги ёритилган, ўтказилган тадқиқотнинг Ўзбекистон Республикаси фан ва технологиялари тараққиётининг устувор йўналишларига мослиги ҳамда муаммонинг ўрганилганлик даражаси белгиланган, тадқиқотнинг мақсади ва вазифаларини шакллантирилган, илмий тадқиқотлар ҳақида маълумот берилган тадқиқот объектлари, субъектлари ва усуллари, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, олинган натижаларнинг илмий ва амалий аҳамиятини очиқ берилган, тадқиқот натижаларини амалга ошириш, ишни синовдан ўтказиш, шунингдек, диссертациянинг кўлами ва тузилиши тўғрисида маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг “ $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{III}}\text{C}_2^{\text{VI}}$ типдаги яримўтказгичли бирикмаларнинг структураси ва сирт морфологияси” деб номланган биринчи бобида TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) ва $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) кристаллар структураси тизимида сирт топографияси ҳамда Раман спектроскопиясига оид адабиётлар таҳлили ҳақида умумий маълумот берилган. Боб охирида адабиётлардаги материални таҳлил қилиш асосида тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари шакллантирилган.

Диссертациянинг “Тадқиқот объектлари ва тажриба усуллари” деб номланган иккинчи бобида тадқиқот объектларини танлаш асослаб берилган, уларни олиш усули ҳақида маълумот берилган, қўлланилган тадқиқот усуллариининг ўзига хос хусусиятлари баён этилган.

Тезлаштирилган электронларнинг кристалларнинг структурасига ва хоссаларига таъсирини ўрганиш учун “Электроника У-003” электрон тезлатгичидан фойдаланилган. Намуналар ток оқимининг зичлиги 0.375 мкА/см^2 бўлган, $\sim 2 \text{ МэВ}$ энергияли тезлаштирилган электронлар билан нурлантирилган.

Структурани ўрганиш учун сирт топографияси ва кристалларнинг элементлар таркибини аниқлашда, электрон дисперсия спектроскопияси, сканерлаш электрон микроскопи (СЭМ) ва атом кучи микроскопи (АСМ), шунингдек, кристалли тузилиш ва фазали ўтишни ўрганиш учун рентген дифракцияси усули танланган.

FullProf дастури асосида Ритвельд усули ёрдамида рентген структуравий маълумотларни структуравий таҳлил қилиш ўрганилаётган намуналарнинг структураси тўғрисида аниқ ва тўлиқ маълумот олиш имконини берди.

Раман спектроскопияси ёрдамида монокристалларни ўрганиш молекуляр тебранишларнинг ўзгаришини аниқлашга ва таркибий тадқиқотларни тўлдиришга имкон берди. Оптик ютилиш спектрлари “Lambda 35” спектрофотометрида (Perkin Elmer) 190-1100 нм тўлқин узунлиги оралиғида, Тауц формуласи олинган:

$$(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g) \quad (1)$$

бунда $E_g = hc/\lambda$ – оптикавий тақиқланган зона кенглиги, h – Планк доимийси ($6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$), c – ёруғлик тезлиги ($3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$), λ – ютилган тўлқин узунлиги, α – ютилиш коэффициенти, $h\nu$ – тушаётган фотон энергияси, эВ да, A – полоса чети тиклиги доимийси.

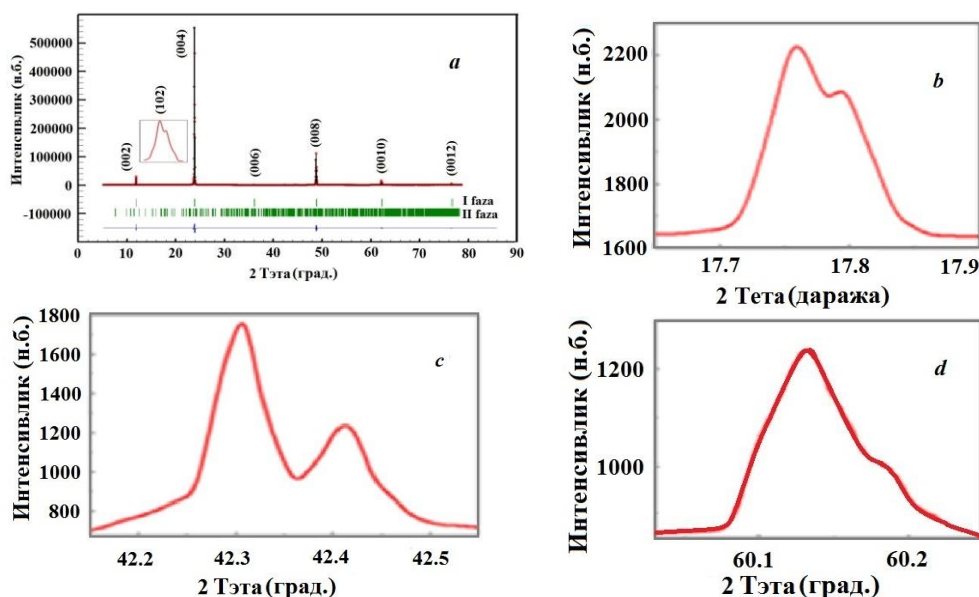
Намуналарнинг микрокаттиклиги замонавий Micro-Vickers HVS-1000Z каттикликни ўлчаш қурилмаси ёрдамида аниқланди.

Диссертациянинг “**Электрон нурланишининг TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) ва $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) кристаллари сирт қатлами, Раман спектри ва структурасига таъсирини ўрганиш**” деб номланган учинчи бобида тезлаштирилган электронларнинг TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) ва $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) кристалларида структура сиртига ҳамда Раман спектри ва тақиқланган зона кенглигига таъсири таҳлилининг натижалари келтирилган.

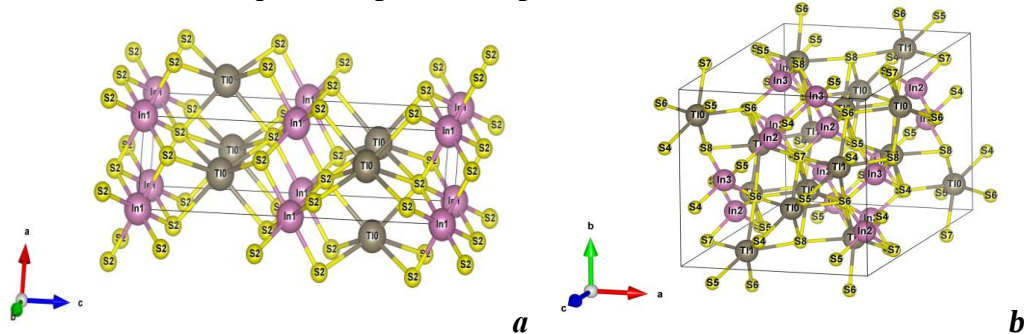
Дастлабки TlInS_2 монокристалли сиртини сканерловчи электрон микроскопда тадқиқ қилиш, профилнинг ўртача арифметик четланиши $R_a=19.8 \text{ нм}$, чўққисининг ўртача баландлиги $R_z=387.6 \text{ нм}$ эканлигини кўрсатди. 1-расмда TlInS_2 монокристалл (a) ва унинг айрим бўлимлари (b,c,d) рентгенограммаси кўрсатилган. Рентгенограмма таҳлили шуни кўрсатдики, дифрактограммадаги асосий рефлекслар гексагонал структураси (ф.г.Р6₃/mmc) бўлган, параметрлари $a=b=10 \text{ Å}$, $c=14.9218(5) \text{ Å}$ элементар ячейкага мос келади.

Бироқ рентгенограммада гексагонал структурага мос келувчи рефлекслар билан бирга (ф.г.Р6₃/mmc) интенсивлиги $2\Theta_B=17.7560^\circ$, $2\Theta_B=29.8560^\circ$, $2\Theta_B=42.2280^\circ$ ва $2\Theta_B=69.1250^\circ$ нисбатан кучсиз интенсивликка эга бўлган қўшимча рефлекслар мавжуд. Бажарилган ҳисоблашлар $2\Theta_B$

$=17.7560^\circ$, $2\Theta_B = 29.8560^\circ$, $2\Theta_B = 42.2280^\circ$ ва $2\Theta_B = 69.1250^\circ$ да рефлекслар моноклиник структурага мос келишини кўрсатди (ф.г.C2/c). Шундай қилиб, дастлабки TlInS_2 намунаси икки фазага бўлиб гексагонал (ф.г. $P6_3/mmc$) ва моноклин (ф.г.C2/c) элементар ячейкаларга эга (2-расм).



1-расм. TlInS_2 рентгенограммаси (a) ва (b,c,d) соҳада (ф.г.C2/c) моноклин фазадан рентгенограмма рефлекслари.



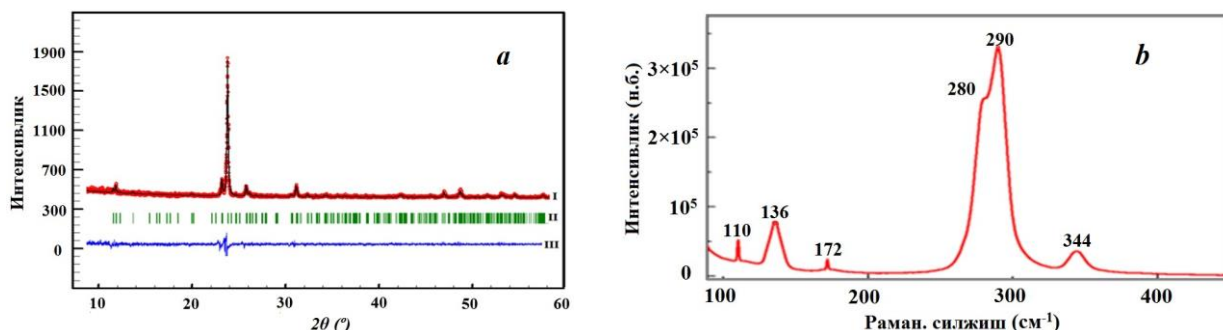
2-расм. (a) TlInS_2 нинг гексагонал (ф.г. $P6_3/mmc$) ва (b) моноклиник (ф.г.C2/c) кристалл тузилишлари.

Моноклин (ф.г.C2/c) ва гексагонал фазанинг (ф.г. $P6_3/mmc$) дастлабки TlInS_2 намунада мавжудлиги турли хил структураларнинг шаклланиши, намунанинг синтези ва совутиш режимига боғлиқлиги эҳтимолини кўрсатади. Структура ҳақида тўлиқроқ маълумот олиш ҳамда структуранинг ташқи таъсирларга чидамлилигини аниқлаш учун кукунсимон TlInS_2 ўрганилди. 3a-расмда TlInS_2 кукунининг рентгенограммаси кўрсатилган.

Намуна структурасининг рентгенограммаси таҳлили элементар ячейка параметрлари: $a = 10.926 \text{ \AA}$; $b = 10.938 \text{ \AA}$; $c = 15.208 \text{ \AA}$ моноклин фазага (ф.г.C2/c) мос келишини кўрсатди. Кристаллитларнинг ўртача ўлчамларига мос келадиган рентген нурларининг когерент сочилиш соҳасининг ўлчами дифракцион рефлексларнинг кенглиги билан аниқланди. Бунинг учун Шеррер формуласи олинган:

$$D = K\lambda / (\beta \cos \theta) \quad (2)$$

бунда D – кристаллитларнинг ўртача ўлчами, K – геометрик коэффициент (0.9), λ – рентген нурланиш тўлкин узунлиги (1.5406 Å), β – ярим баландликдаги дифракцион рефлекс кенглиги (FWHM), θ – дифракция бурчаги.



3-расм. (а) Кукусимон TlInS_2 рентгенограммаси: I-экспериментал ва ҳисобланган маълумотлар; II-Брег рефлекслари; III-экспериментал ва ҳисобланган маълумотлар орасидаги фарқ ҳамда (b) дастлабки TlInS_2 намунасининг Раман спектрлари.

Кристаллитларнинг ўлчамларини ҳисоблаш учун $2\theta_B = 23.8327^\circ$ бўлган рефлекс танлаб олинди ва ярим баландликдаги тўла энининг қиймати (FWHM) ҳисобланди. Ҳисоблашлар дастлабки TlInS_2 кукунининг кристаллитлар ўртача ўлчами $d = 54.7$ нм эканлигини кўрсатди. TlInS_2 монокристаллининг Раман спектри (3b-расм) турли интенсивликдаги олти та чўққини ўз ичига олади.

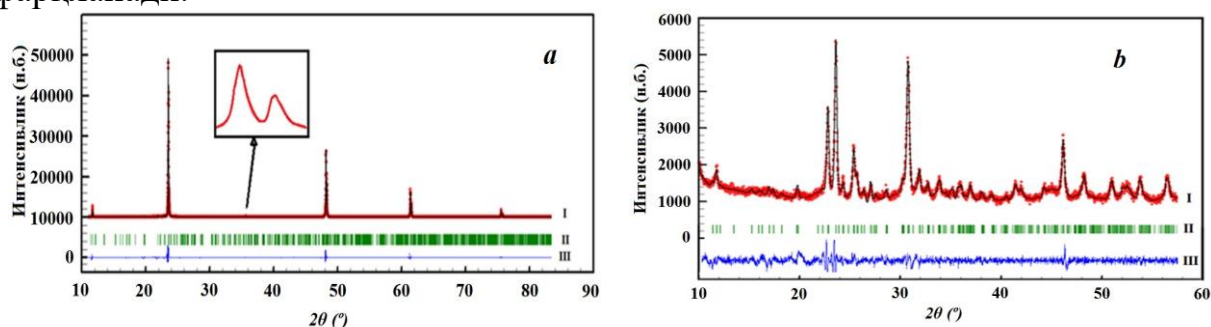
Шуни айтиб ўтиш лозимки, 110 см^{-1} ва 136 см^{-1} чўққилар In ва S атомлари орасидаги қатламлараро боғланишга, 172 см^{-1} Tl ва S атомлари орасидаги қатламлараро боғланишга, 284 , 291 ва 344 см^{-1} чўққилар эса In_4S_{10} тетраэдрнинг молекулалари орасидаги тебранишларга мос келади.

Гауссианга мослаш усули билан энг интенсив чўққининг шакли ассиметриясини таҳлил қилиш шуни кўрсатадики, у 280 ва 290 см^{-1} бўлган иккита чўққидан иборат.

TlInS_2 кристалларининг хоссаларининг маълум бир киритма киритилганда ўзгаришини тадқиқ қилиш учун олтингугурт атомларининг бир қисми селен атомларига алмаштирилди. $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) монокристалл ва кукун намуналарининг рентгенограммалари 4-расмда кўрсатилган. Моноклин элементар ячейкаси параметрлари қуйидагича эканлиги аниқланган: $a = 1.1566$ нм, $b = 1.1223$ нм, $c = 1.5319$ нм. Кукусимон шаклидаги $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) рентген дифракцияси маълумотларини тўла профили усул билан қайта ишлаш шуни кўрсатадики, намунанинг, $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) монокристалли каби, моноклин элементар ячейкага (ф.г. $C2/c$) эга бўлиб, панжара параметрлари қуйидагича: $a = 1.1109$ нм, $b = 1.1126$ нм, $c = 1.535$ нм, экан.

Идеал ҳолатдаги кристалл панжаранинг бир хил позицияларида жойлашган S ва Se атомлари бир хил координаталарга эга. Бироқ

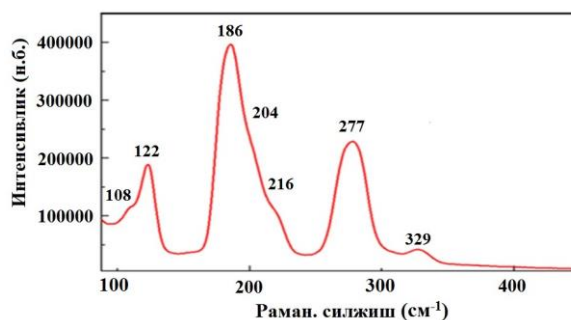
ҳисоблашлар шуни кўрсатдики, S ва Se атомларининг координаталари фарқланади.



4-расм. Дастлабки $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) монокристалл (a) ва кукунсимон (b) $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) рентгенограммалари: I-экспериментал ва ҳисобланган маълумотлар; II-Брегг рефлекслари; III-экспериментал ва ҳисобланган маълумотлар орасидаги фарқ.

Масалан, S(4) позицияларда жойлашган олтингугурт атомлари координаталари $x = 0.0344$, $y = 0.3415$, $z = 0.8576$ бўлса, шу позицияларда олтингугурт атомларининг ўрнига киритилган селен атомлари $x = 0.0344$, $y = 0.3415$, $z = 0.7985$ координаталарга эга.

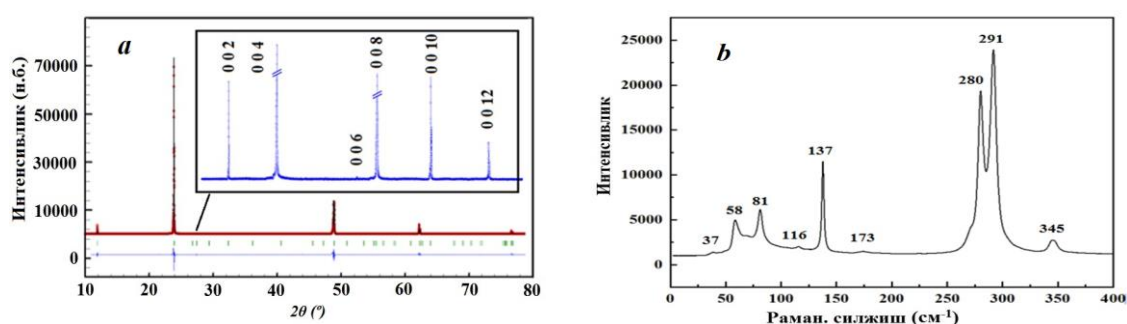
S (5) ҳолатда олтингугурт атоми $z = 0.8742$ координатага эга бўлиб, Se атомининг координатаси $z = 0.7985$ га тенг ёки, S(8) атомининг координаталари $x = 0.0000$, $y = 0.4182$, $z = 0.7982$, Se атомлари эса $x = 0.0000$, $y = 0.4182$, $z = 0.8547$ координаталар билан характерланади. Дастлабки ҳисоблашлар кукунсимон намунада $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) кристаллитларининг ўртача ўлчамлари $d = 56.5$ нм эканлигини кўрсатди. Дастлабки $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) кристаллининг Раман спектроскопиясини ўрганиш натижалари 5-расмда келтирилган. Кўриниб турибдики, 186 cm^{-1} даги чўққи ассиметрик ва урта чўққидан иборат. Ҳисоблашлар чўққи маркази 186 cm^{-1} га тўғри келишини кўрсатди. Кристалл тебраниш частоталарини таққослаш шуни кўрсатадики, $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) кристалларда ўхшаш тебраниш гуруҳларининг тебраниш частоталари паст частотали йўналишда ўртача $10\text{-}15 \text{ cm}^{-1}$ га силжиши, бу атом оғирликлари ва ковалент радиусларнинг қийматлари ўзаро фарқ қилувчи S ионлари Se ионлари билан алмаштирилганда ички-молекуляр ҳамда молекулалараро боғланиш кучларининг ўзгаришини кўрсатади.



5-расм. Дастлабки $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) Раман спектри.

Зондли сканерловчи микроскопдаги ўлчашлар дастлабки кристалл $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) профилининг арифметик ўртача оғишининг максимал қиймати ($x=0.01$) $R_a=5.4$ нм, ўртача ғадир-будурлик баландлиги $R_z = 72.0$ нм эканлигини кўрсатди. Дастлабки монокристалл $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) рентгенограммаси 6a-расмда келтирилган. Рентгенограммага ишлов бериш (6a) расм) шуни кўрсатдики, дастлабки монокристалл гексагонал (ф.г.Р6₃/mmc) структура ва параметрлари $a= 3.958 \text{ \AA}$, $b= 3.958 \text{ \AA}$, $c= 14.922 \text{ \AA}$. эга экан.

Куқунсимон $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) рентгенограммасини ҳисоблашлар C2/c фазовий гуруҳга мансуб ва элементар ячейка параметрлари $a = 10.864 \text{ \AA}$, $b = 10.948 \text{ \AA}$, $c = 15.151 \text{ \AA}$ бўлган моноклин фаза мавжудлиги, шунингдек, дастлабки $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) куқун намунаси кристаллитлари ўртача ўлчами $d = 36.87$ нм эканлигини кўрсатди.



6-Расм. $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) монокристалл рентгенограммаси (a): I-экспериментал ва ҳисобланган маълумотлар; II-Брег рефлекслари; III-экспериментал ва ҳисобланган маълумотлар орасидаги фарқ ва (b) дастлабки $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) намунасининг Раман спектри.

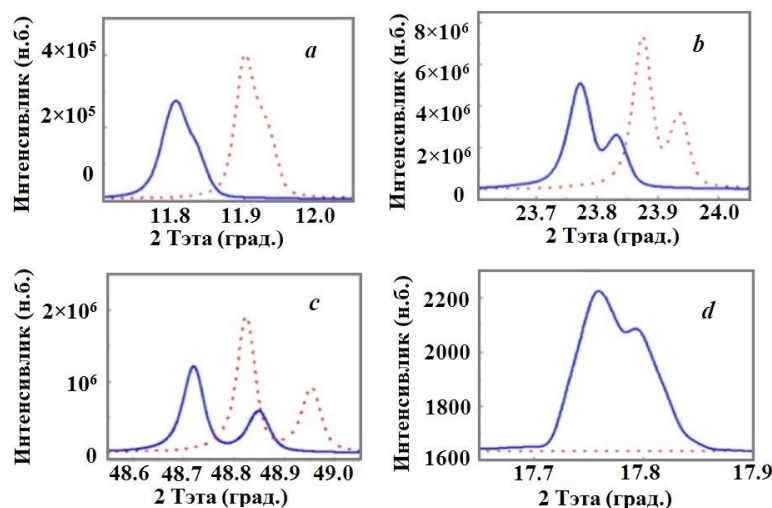
$\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) дастлабки нурлантирилмаган намунанинг Раман сочилиш спектри 6b-расмда кўрсатилган. Тебраниш частоталарининг максимуми нурлантирилмаган TlInS_2 кристаллининг тебраниш частоталарига тўғри келади, бироқ легирланган намунанинг тебраниш интенсивликлари бироз кичикроқ ва чўққилари торроқ бўлади.

Тебраниш частоталари $<100 \text{ см}^{-1}$ соҳасида бир нечта янги паст частотали тебраниш чизиқлари кузатилади. Легирлангандаги индий атомлари ўрнига хром атомлари алмаштирилиши сабабли $<100 \text{ см}^{-1}$ соҳада, эҳтимол, Cr_4S_{10} тетраэдр ва Tl^+ ни CrS_2 ионлари билан боғлайдиган ион кучлари ўртасидаги алоқалар учун заиф ўзаро таъсирлар туфайли трансляция тебранишлари билан боғлиқ бўлиши мумкин.

Электронлар билан нурлантирилгандан ($2 \cdot 10^{17} \text{ эл/см}^2$ флюенсли) кейин TlInS_2 монокристаллининг сиртида профилнинг ўртача арифметик четланиши $R_a=48.1$ нм ни ташкил этди, чўққининг ўртача баландлиги – $R_z=694.4$ нм. $2 \cdot 10^{17} \text{ эл/см}^2$ флюенсли электронлар билан нурлантирилган TlInS_2 кристалларининг рентген тасвирларини рентгенографик тадқиқотлар гексагонал (ф.г.Р6₃/mmc) структурага мос рефлекслар мавжудлигини кўрсатди (расм.7 (a, b, c, d)) ва иккинчи фазада (ф.г.C2/c) рефлексларнинг йўқлиги дастлабки намунада топилган (расм.7 (d)). Рефлексларнинг катта

бурчакларга силжиши, $2\Theta_B = 11.9060^\circ$ билан биринчи рефлекснинг сезиларли даражада бузилиши ҳамда дастлабки намунага нисбатан рефлексларнинг интенсивлигининг ошиши кузатилди.

7-расм шуни кўрсатадики, нурлантирилган TlInS_2 да нафақат биринчи рефлекс (a) нинг бузилиши, балки $\text{Cu-K}_{\alpha 1}$ ва $\text{Cu-K}_{\alpha 2}$ нурланишининг (b, c) аниқроқ бўлиниши кузатилди.



7-расм. TlInS_2 нинг (a,b,c,d) соҳалардаги (кўк чизик) дастлабки ва (қизил нуқталар) $2 \cdot 10^{17}$ эл/см² флюенсли электронлар билан нурлантирилган рентгенограммалари.

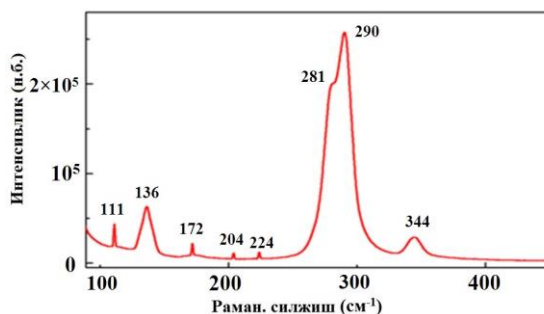
Радацион ишловдан кейин чўққиларнинг шакли симметрик ҳамда тор бўлиб қолиши ва $2\Theta_B = 17.7560^\circ$ (Расм. 7(d)), $2\Theta_B = 29.8560^\circ$, $2\Theta_B = 42.2280^\circ$ ва $2\Theta_B = 69.1250^\circ$ да рефлекслар йўқлиги кўрсатилди. $2 \cdot 10^{17}$ эл/см² флюенсли электронлар билан нурлантирилган структуранинг таҳлили барча рефлексларнинг моноклин структурага (ф.г.C2/c) мос келишини кўрсатди. Бу шундан далолат берадики, электронлар билан нурлантириши кристаллликнинг ошишига ва намунанинг бир фазали ҳолатини шакллантиришга ёрдам беради. Кукунсимон TlInS_2 ни электронлар билан нурлантиришдан сўнг моноклин структураси (ф.г.C2/c) сақланиши ва кристаллитлар ўртача ўлчами 114.32 нм эканлиги аниқланди.

$2 \cdot 10^{17}$ эл/см² флюенсли электронлар билан нурлантирилган TlInS_2 намунасида ўлчанган Раман спектрлари, дастлабки нурлантирилмаган намунада мавжуд бўлган олтита чўққининг интенсивлиги дастлабки намуналарга нисбатан пасайганлиги кўрсатилган (8-расм.).

Шунингдек, иккита чўққи марказлари (110 см^{-1} , 135 см^{-1}), намунадаги ўхшаш чўққилар билан солиштирганда, юқори частоталар (силжиши) соҳасига силжиди, 172 см^{-1} , 291 см^{-1} ва 344 см^{-1} чўққилар эса ўзгармайди, аммо 204 ва 224 см^{-1} да заиф интенсивлик билан янги чўққилар топилди.

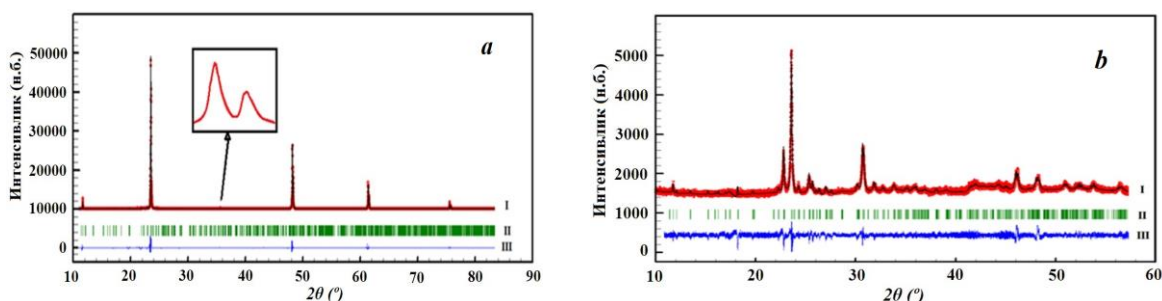
Электронлар билан намуна нурлантирилганда Раман спектрлари интенсивлигининг пасайиши, боғланишнинг узилиши натижасида Раман сочилиши учун танлаш қоидаларини бузилиши ва материалнинг оптик хусусиятларини ўзгариши сабабли юз берган бўлиши мумкин ҳамда бу

кўзғатувчи тўлқин узунлигида ютилиш коэффицентининг ошишига олиб келиши мумкин. Натижада нурланиш соҳаси сиртида ғадир-будурлик пайдо бўлиши сочилишнинг кўпайишига ва нурнинг линзага тушмаслигига олиб келиши мумкин. Электрон билан нурлантирилган $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) монокристаллнинг рентген дифракциясини ўрганиш (расм.9а) дастлабки моноклин структуранинг (ф.г.C2/c) элементар ячейка параметрлари: $a=1.0969$ нм, $b=1.106$ нм, $c=1.5327$ нм ва $\beta=100.47^\circ$ сақланишини кўрсатади.



8-расм. $2 \cdot 10^{17}$ эл/см² флюенсли электронлар билан нурлантирилган TlInS_2 намунасининг Раман спектри.

Электрон билан нурлантирилган кукунсимон $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) рентген дифракцияси маълумотларининг таҳлили, намуна структураси моноклин бўлиб (ф.г.C2/c), параметрлари $a=1.1115$ нм, $b=1.1128$ нм, $c=1.5359$ нм ва $\beta=100.72^\circ$ (расм.9b) эга эканлигини кўрсатди. Мос позициялардаги S ва Se атомларининг координаталари бир хил.



9-расм. $2 \cdot 10^{17}$ эл/см² флюенсли электронлар билан нурлантирилган $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) рентгенограммалари: (a) монокристалл ва (b) кукунсимон намуна: I-экспериментал ва ҳисобланган маълумотлар; II-Брегг рефлекслари; III-экспериментал ва ҳисобланган маълумотлар орасидаги фарқ.

Тегишли позициялардаги S ва Se атомларининг координаталари бир хил, аммо иссиқлик факторлари турлича. Модел ва тажриба маълумотларининг мослигини характерловчи қийматлар $R_B=2.78$, $R_F=2.05$ ҳамда $\chi^2=3.45$. Намунани $2 \cdot 10^{17}$ эл/см² флюенсли электронлар билан нурлантиригандан сўнг кристаллитнинг ўртача ўлчами $d=65$ нм гача ошди. Шундай қилиб, тадқиқот натижаларидан келиб чиқадики, S атомларининг бир қисмини Se атомлари билан алмаштирилиши моноклин структурага (ф.г.C2/c). эга бўлган бир фазага ҳолат ҳосил бўлишига ёрдам беради.

$2 \cdot 10^{17}$ эл/см² флюенсли электронларнинг $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) сиртига таъсирини ўрганиш шуни кўрсатдики, намуна сиртида ғадир-будурлик янада кўпроқ бўлади, тепаликларнинг кенглиги ҳам, баландлиги ҳам ортди, профилнинг ўртача арифметик оғишининг максимал қиймати $R_a=25.2$ нм, ўртача ғадир-будурлик баландлиги $R_z=152.9$ нм.

Рентгенограмма ҳисоб-китоблари бўйича $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) монокристалларни энергияси 2 МэВ ва $2 \cdot 10^{17}$ эл/см² флюенсли электронлар билан нурлантирилгандан сўнг панжара параметрлари $a=3.852$ Å, $b=3.852$ Å, $c=14.911$ Å ва $\alpha=90^\circ$, $\beta=90^\circ$, $\gamma=120^\circ$ ни ташкил этади. Олинган натижалар шуни кўрсатадики, $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) монокристаллнинг элементар ячейкалари ҳажми электронлар билан нурлантирилгандан сўнг бироз камайган, яъни 0.01 мол% миқдорида Cr киритилиши TlInS_2 матричасининг кристалл панжараси параметрларига кучсиз таъсир қилади.

Дастлабки $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) кукунсимон намунасининг кристаллитлар ўртача ўлчами $d=36.87$ нм ташкил этади. Намунани электронлар билан нурлантирилгандан сўнг эса кристаллитларнинг ўртача ўлчами $d=41.76$ нм гача ошди. $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) дан фарқли равишда $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) кристалларнинг электронлари билан нурлантирилганда Раман спектрлари ҳеч қандай ўзгаришга учрамайди.

Шуни таъкидлаш керакки, $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) ва $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) кристалларни электронлар билан нурлантиришгача ҳамда нурлантиришдан сўнгги сирт морфологияси бўйича тажриба маълумотлари адабиётларда мавжуд эмас.

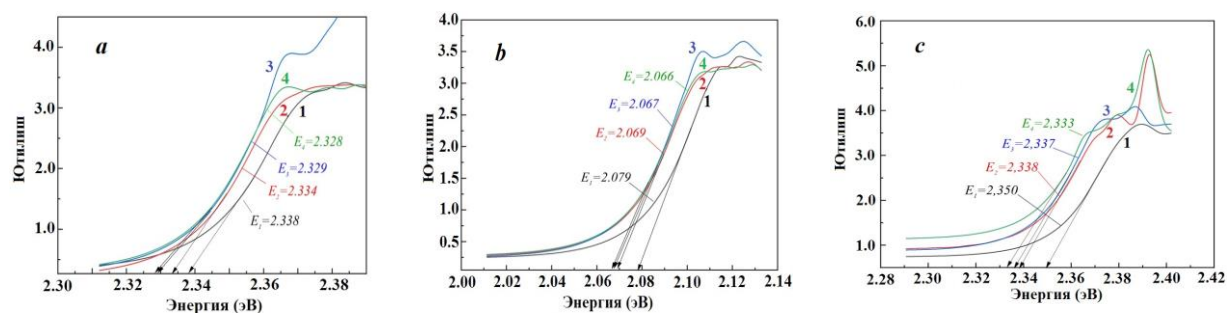
TlInS_2 ҳар хил структурага, таркибий ҳолатларга эга, бу эҳтимол намунани синтез қилиш, тобланиш ва совутишнинг ўзига хос хусусиятларига боғлиқ. TlInS_2 да олтингугурт атомларининг бир қисмини селен атомлари билан, шунингдек, индий атомларининг бир қисмининг хром атомлари билан алмаштирилиши, $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) ва $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) намуналарда бир фаза ҳолат ҳосил бўлишини рағбатлантиради. TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) ва $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) намуналарнинг ўхшашлиги шундаки, ҳар учала ҳолатда ҳам электронлар билан нурлантиришидан сўнг рефлексларнинг кенглиги камаяди, бу эса кристаллитларнинг катталашганлигидан далолат беради.

Дастлабки $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ монокристали моноклин (ф.г.С2/с) ($x=1$) с $a=11.566$ Å, $b=11.223$ Å, $c=15.319$ Å и $\beta=100.21^\circ$) структурага эга. $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) монокристаллни электронлар билан нурлантириш элементар ячейка параметрлари $a=10.96$ Å, $b=11.06$ Å, $c=15.32$ Å и $\beta=100.47^\circ$ ни ўзгартиришга ёрдам берди, кукун шаклидаги $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) эса моноклин фазада бўлиб, панжара параметрлари $a=11.10$ Å, $b=11.12$ Å, $c=15.35$ Å и $\beta=100.69^\circ$ ва кристаллитларнинг ўртача ўлчами 56.5 нм эди. Нурлантирилгандан кейин намунанинг структуравий ҳолати сақланиб қолди, элементар ячейка параметрлари a ўқи бўйича бироз ўзгарди.

TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) ва $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) кристаллар $A^{\text{III}}B^{\text{III}}C^{\text{VII}}$ кўринишдаги бир хил умумий кимёвий формулага эга. Уларнинг рентгенограммалари ўхшаш бўлиб, $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) ва $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$)

даги рефлекслар TlInS_2 нинг рефлексларига нисбатан каттароқ ёки кичикроқ дифракция бурчаклари томонга силжиган. Бунинг сабаби, $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($a=11.109 \text{ \AA}$; $b=11.126 \text{ \AA}$; $c=15.350 \text{ \AA}$)нинг панжара даврлари селен атомининг ўлчами ($1.16 \text{ \AA}$) олтингугурт атомининг ўлчамидан ($1.04 \text{ \AA}$) каттароқ бўлгани учун $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($a=10.864 \text{ \AA}$; $b=10.948 \text{ \AA}$, $c=15.151 \text{ \AA}$)нинг панжара даврлари хром атоми $1.27 \text{ \AA}$ индий атомининг ўлчами ($1.63 \text{ \AA}$) дан кичик бўлгани учун TlInS_2 ($a=10.926 \text{ \AA}$; $b=10.983 \text{ \AA}$, $c=15.208 \text{ \AA}$)нинг панжара даврларининг қийматлари TlInS_2 никидан кичикроқ бўлади.

Кристалларга киритмалар киритилганда кўпгина физикавий характеристикалар, жумладан, тақиқланган зона кенглиги, дислокациялар зичлиги ва микрозўриқишлар ўзгариши мумкин. Тақиқланган зона кенглигини аниқлаш учун легирланган ва легирланмаган TlInS_2 кристалларининг оптик ютилиш спектрлари, фундаментал ютилиш соҳасида 2 МэВ энергияли электронлар билан нурлантиришдан олдин ва кейин тадқиқ қилинди. TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) и $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ $x=0.01$ кристаллар тақиқланган зоналари кенгликлари фундаментал ютилишнинг тўғри чизиқли қисмининг давоми нурланиш энергияси ўқи билан кесишиши усулида аниқланди (10 - расм).



10 -расм . Турли хил флюенсли электрон билан нурлантирилган TlInS_2 (a), $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) (b), $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) (c) монокристаллар ютилиш спектрлари: 1- дастлабки; $2-5.5 \cdot 10^{16} \text{ эл/см}^2$; 3- $1.0 \cdot 10^{17} \text{ эл/см}^2$; 4- $1.5 \cdot 10^{17} \text{ эл/см}^2$

Бундан кўриниб турибдики, тезлаштирилган электронлар билан таъсирлашганда TlInS_2 кристаллида тақиқланган зона кенглиги $E_{g1} = 2.338 \text{ эВ}$ дан $E_{g4} = 2.328 \text{ эВ}$ гача камайган (10a-расм). Атом ўлчамлари катта бўлган Se атомларининг S атомлари ўрнига қисман киритилиши билан TlInS_2 кристалларининг панжара параметрлари ортиши туфайли тақиқланган зона кенглиги 2.338 эВ дан (TlInS_2 да) 2.079 эВ ($\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ да) гача камаяди. $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) монокристаллар $5.5 \cdot 10^{16} \text{ эл/см}^2$ ва $1.0 \cdot 10^{17} \text{ эл/см}^2$ флюенсли электронлар билан нурлантирилганда тақиқланган зона кенглиги мос равишда 2.079 эВ дан 2.069 эВ ва 2.066 эВ гача камаяди (10b-расм.).

$\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) намунасида In ($r_a=1.63 \text{ \AA}$) атомларининг бир қисми ўрнига Cr ($r_a=1.27 \text{ \AA}$) атомларининг киритилиши сабабли панжара параметрлари камаяди, бу эса тақиқланган зона кенглигининг 2.338 эВ дан (TlInS_2 да) 2.35 эВ гача ортишига олиб келади. Бироқ тезлаштирилган электронлар билан нурлантирилгандан сўнг тақиқланган зона кенглигининг $E_{g1} = 2.35 \text{ эВ}$ дан $E_{g4} = 2.333 \text{ эВ}$ гача пасайиши кузатилди (10c-расм).

Тадқиқотлар натижасида 2 МэВ энергияли ва $3 \cdot 10^{17}$ эл/см² флюенсли тезлаштирилган электронлар таъсирида TlInS_2 да 54.7 дан 119.3 нм гача, $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) да 36.87 нм дан 50.15 нм гача ва $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) да 56.5 нм дан 72 нм гача кристаллит ўртача ўлчамларининг ўсиши кузатилди (1-жадвал), бу кристаллитлар ўсишининг нормал механизми бўйича кристаллитлар катталашиши туфайли бўлим чегаралари камайиши натижасида келиб чиқиши аниқланган.

Барча тадқиқ қилинган намуналарда электронлар флюенси ортиб бориши билан дислокациялар зичлиги ва микроўриқишлар камайиши аниқланди.

1-жадвал

Электронлар билан нурлантирилган TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) ва $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) нинг характеристикалари

Характерис- тика	TlInS ₂			TlInS _x Se _{2-x} (x=1)			TlIn _{1-x} Cr _x S ₂ (x=0.01)		
	флюенс, 10 ¹⁷ эл/см ²								
	0	2	3	0	2	3	0	2	3
D, нм	54.7	114.32	119.3	56.5	65	72	36.87	41.76	50.15
σ×10 ¹⁴ , м ⁻²	4	1	1	4	3	2	8	6	4
ε, ×10 ⁻³	11.43	6.55	3.48	4.25	3.36	2.64	6.2	5.13	3.85

(D – кристаллитларнинг ўртача ўлчами; σ – дислокациялар зичлиги; ε – микроўриқиш).

Монокристалларни электрон билан нурлантиришдан олдин ва кейин микроқаттиқлигини баҳолаш учун Виккерс HVS-1000 бўйича микроқаттиқлик ўлчовлари ўтказилди. TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) ва $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) монокристалларнинг электрон билан нурлантиришдан олдин ҳамда кейин микроқаттиқлигини ўлчаш натижалари 2-жадвалда кўрсатилган.

2-жадвал

TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) ва $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) монокристалларининг нурлантиришдан олдин ва электронлар билан нурлантирилгандан кейинги микроқаттиқлиги

Намуна	Юклама	Виккерс микроқаттиқлиги, HV			
		Даст-лабки	Нурлантирилган		
			$5.5 \cdot 10^{16}$ эл/см ²	$1 \cdot 10^{17}$ эл/см ²	$1.5 \cdot 10^{17}$ эл/см ²
TlInS_2	50	14.6	19.0	20.1	21.4
$\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$)	50	16.8	18.5	19.1	21.6
$\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$)	50	17.9	18.2	21.5	22.9

Нурлантирилгандан кейин 50 г юкламада кристаллитларнинг катталашиши туфайли $H\mu$ ортади, бу эса сиртости қатламининг радиация билан индуцирланган мустаҳкамланишини билдиради.

ХУЛОСА

“Легириланган ва электрон билан нурлантирилган TlInS_2 кристалларининг тузилиши ва хоссалари” мавзусидаги фалсафа доктори даражасини (PhD) олиш учун ёзилган диссертация иши бўйича ўтказилган тадқиқотлар асосида қуйидаги хулосалар келтирилади:

1. TlInS_2 ни энергияси 2 МэВ ва $2 \cdot 10^{17}$ эл/см² флюенсли электронлар билан нурлантириш намуна сиртида тепалик баландлиги ҳамда унинг кенглигини икки мартадан кўпроқ оширишга олиб келишини кўрсатди.

2. $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) монокристалли гексагонал структурали (ф.г.Р6₃/mmc) ва параметрлари: $a=3.958$ Å, $b=3.958$ Å, $c=14.922$ Å ва $\alpha=90^\circ$, $\beta=90^\circ$, $\gamma=120^\circ$ эканлиги аниқланди.

3. TlInS_2 монокристаллида олтингугурт атомларининг бир қисмининг селен атомлари билан алмаштирилиши $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) да моноклин структурали (ф.г. C2/c) бир фазали ҳолатнинг ҳосил бўлишига олиб келиши исботланди.

4. Монокристалл ва поликристалл $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) да $2 \cdot 10^{17}$ эл/см² флюенсли 2 МэВ энергияли электронлар билан нурлантирилганда моноклин (ф.г. C2/c) структура радиацияга чидамлилиги биринчи марта аниқланди.

5. $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) монокристаллини $2 \cdot 10^{17}$ эл/см² флюенсли ва 2 МэВ энергияли электронлар билан нурлантирилганда дастлабки гексагонал структура сақланиши аниқланди, профил ўрта арифметик четланишининг энг катта қиймати беш барабардан кўп ортади, ғадир-будурликнинг ўртача баландлиги $R_z=72.0$ нм дан $R_z=152.9$ нм гача ортади.

6. Кукурсимон TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) ва $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) намуналарда моноклин структура (ф.г. C2/c) борлиги ҳамда электронлар билан нурлантирилганда структураларнинг сақланиб қолиши, лекин кристаллитларнинг ўртача қиймати ортиши кўрсатилган.

7. Биринчи марта TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) ва $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) монокристалларни 2 МэВ энергияли ҳамда $1.5 \cdot 10^{17}$ эл/см² флюенсли электронлар билан нурлантирилганда микроқаттиқликнинг ортиши ва флюенс $3 \cdot 10^{17}$ эл/см² бўлганда кристалларда микрозўриқиш камайиши кўрсатиб берилди.

8. Раман спектрометриясида TlInS_2 электронлар билан нурлантириб ишлов бериш 204 см⁻¹, 224 см⁻¹ янги чўққиларни пайдо бўлишини ва айрим чўққиларнинг ички-қатлам ўзаро боғланиш ҳамда молекулалараро тебраниши (281 см⁻¹) туфайли силжиши кўрсатилди.

9. Кукурсимон $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) ни 2 МэВ энергияли ва $3 \cdot 10^{17}$ эл/см² флюенсли электронлар билан нурлантирилганда, кристаллитларнинг ўлчамлари 36.87 нм дан 50.15 нм гача ортишига олиб келади, бу эса, бўлиниш чегараларининг камайиши билан боғлиқ бўлиши мумкин.

10. Биринчи марта TlInS_2 монокристаллида тақиқланган зоналар кенглигининг камайиши олтингугурт атомларининг бир қисмини селен

атомлари билан, ортиши эса индий атомларининг бир қисми хром атомлари билан алмаштирилиши сабабли экани кўрсатилган.

11. Биринчи марта TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) ва $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) монокристалларни $1.5 \cdot 10^{17}$ эл/см² флюенси электронлар билан нурлантириш кристаллитлар ўлчамининг ортишига ҳамда атомлараро масофаларнинг ўзгариши сабабли тақиқланган зона кенглигининг камайишига олиб келиши аниқланган.

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

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

ХАЛЛОКОВ ФАРХОД КАРИМОВИЧ

**СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ЛЕГИРОВАННЫХ И ОБЛУЧЕННЫХ
ЭЛЕКТРОНАМИ КРИСТАЛЛОВ TlInS_2**

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

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

Ташкент – 2022

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за номером B2019.2.PhD/FM364.

Диссертация выполнена в Институте ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан.

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

Научный руководитель:

Ташметов Маннаб Юсупович
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Ахмеджанов Фархад Рашидович
доктор физико-математических наук, доцент

Муссаева Малика Анваровна
доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник

Ведущая организация:

**НИИ Физики полупроводников и микроэлектроники
при НУУз им. Мирзо Улугбека**

Защита диссертации состоится «_____» _____ 2022 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, ИЯФ. Тел.: (+99871) 289-31-41; факс: (+99871)289-36-65; e-mail: info@inp.uz).

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

Автореферат диссертации разослан «_____» _____ 2022 г.
(протокол рассылки № _____ от _____ 2022 г.).

И.И.Садиков

зам.председателя Научного совета по присуждению
ученых степеней, д.т.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 в мире растет интерес к исследованиям новых перспективных полупроводниковых материалов, содержащих несколько элементов, с возможностью управлять их характеристиками и свойствами. Монокристаллы TlInS_2 являются одними из таких многокомпонентных сложных широкозонных от 1.22 до 2.56 эВ полупроводников типа $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{III}}\text{C}^{\text{VI}}_2$. Изменение состава такого полупроводника позволяет широко варьировать электрофизические, фотоэлектрические, оптические и другие свойства. Широкозонные полупроводники TlInS_2 перспективны для изготовления фотоэлектрических преобразователей, анализаторов спектров и детекторов радиационных излучений.

TlInS_2 представляет собой полупроводник, запрещенная зона которого насыщена локальными уровнями, и для управления свойствами необходима полная информация о спектре локальных состояний в запрещенной зоне кристалла. Одной из особенностей полупроводниковых соединений, которые широко применяются при целенаправленном управлении их свойствами являются малая концентрация примесей и дефектов структуры, а также чувствительность к различным внешним воздействиям (температуре, освещению светом, облучению, деформации и др.) и их влияние на электрофизические и фотоэлектрические характеристики, структуру. Поэтому исследование структуры и свойств легированных и облученных TlInS_2 является актуальной задачей.

В настоящее время в Узбекистане уделяется огромное внимание исследованию новых полупроводниковых материалов, используемых для изготовления детекторов и датчиков, выполнению фундаментальных исследований мирового уровня для создания научной базы и разработки технологий с дальнейшим применением в производстве современных оборудования. Направления этих фундаментальных исследований, имеющих огромное значение для развития науки нашей страны и её широкого практического применения, отражены в Стратегии¹ развития нового Узбекистана на 2022–2026 гг.

Исследования, проведенные в данной 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-

¹Указ Президента Республики Узбекистан № УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» от 07 февраля 2017 г.

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 проведено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий республики II. «Энергетика, энергосбережение и альтернативные источники энергии».

Степень изученности проблемы. Структура, спектроскопия и свойства кристаллов TlInS_2 активно изучались ведущими учеными мировых исследовательских центров, в том числе японскими (S. Kashida, Y. Kobayashi, R. Matsumoto), израильскими (A.M. Panich), немецкими (W. Henkel), азербайджанскими (K.R. Allakhverdiev, Г.Д. Гусейнов, Г.Б. Абдуллаев, С.Н. Мустафаева, N. Mamedov, В.Д. Рустамов, Э.М. Керимова, Э.М. Годжаев), украинскими (A.V. Gomonnai, Yu.M. Azhniuk, I. Petryshynets, O.O. Gomonnai), белорусскими (А.У. Шелег, В.Г. Гуртовой), турецкими (I. Guler, N.M. Gasanly), узбекистанскими (С.Х. Умаров, И. Нуритдинов) и другими. Результаты исследований свидетельствуют о том, что эти соединения являются перспективными полупроводниковыми материалами для создания фотоэлектронных приборов.

В результате исследований, проведенных до настоящего времени, определена кристаллическая структура TlInS_2 и установлен фазовый переход в структуре TlInS_2 из исходной моноклинной фазы в гексагональную в тонком поверхностном слое при высоких дозах облучения гамма-лучами; изучены структура, фазовая диаграмма, оптические характеристики, рамановская спектроскопия TlInSSe типа $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{III}}\text{C}_2^{\text{VI}}$; исследован структурный фазовый переход в $\text{TlInS}_{2x}\text{Se}_{2(1-x)}$.

Однако, не изучено влияние быстрых электронов на структуру, морфологию поверхности, свойства TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) и $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$). Такие исследования представляют интерес, так как механизмы взаимодействия электронов с веществом отличаются от механизма взаимодействия с гамма-излучением, что может способствовать образованию других структур и свойств. Поэтому исследование структур, дефектов и влияния электронного облучения на характеристики и закономерности физических процессов в системах TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) и $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) является актуальной задачей.

Связь темы диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнена в рамках утвержденной Постановлением Президента № ПП-4526 от 21 ноября 2019 года программы научно-исследовательских работ Института ядерной физики АН РУз на 2020–2024 годы по темам: «Радиационно-стимулированные процессы при ядерной трансмутации легированного монокристаллического кремния» и «Радиационно-стимулированные явления и спектрально-

люминесцентные характеристики в широкозонных оксидных и фторидных твердотельных материалах, перспективных для сцинтилляторов и лазеров с диодной накачкой».

Целью исследования является выявление особенностей структуры и свойств, легированных и облученных электронами кристаллов TlInS_2 .

Задачи исследования:

изучение влияния электронов с энергией 2 МэВ и различными флюенсами на морфологию поверхности монокристаллов TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) и $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$);

определение структуры монокристаллов и поликристаллов TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) и $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) методом рентгеноструктурного фазового анализа;

изучение влияния электронов различных флюенсов на кристаллические структуры, структурные параметры монокристаллов и поликристаллов TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) и $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$);

исследование комбинационного рассеяния света (Рамановские спектры) в TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) и $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) до и после воздействия электронов различных флюенсов;

определение размера кристаллитов и плотности дислокаций до и после облучения электронами различных флюенсов TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) и $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$);

определение ширины запрещенных зон и микротвердости монокристаллов TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) и $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) при воздействии электронов с энергией 2 МэВ и различных флюенсов.

Объектом исследования являются структура и свойства кристаллов TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) и $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$).

Предметом исследования являются кристаллическая структура, морфология, свойства, спектры комбинационного рассеяния кристаллов TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x = 1$) и $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) в зависимости от флюенса электронов.

Методы исследования: методы рентгеновской дифракции, полнопрофильного анализа (Ритвельда), атомно-силовой и сканирующей электронной микроскопии, спектроскопия комбинационного рассеяния света, микротвердость по Виккерсу и оптическая спектроскопия.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

установлен фазовый переход из двухфазного состояния (гексагональная структура с пр.гр. $R\bar{6}_3/mmc$ и моноклинная структура с пр.гр. $C2/c$) в однофазное состояние с гексагональной структурой (пр.гр. $R\bar{6}_3/mmc$) в монокристалле TlInS_2 , индуцированный облучением электронами энергией 2 МэВ и флюенсом $2 \cdot 10^{17}$ эл/см² и обусловленный “радиационной тряской”;

впервые обнаружена радиационная стойкость моноклинной структуры (пр.гр. $C2/c$) в монокристаллическом и поликристаллическом $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) при облучении электронами до флюенса $2 \cdot 10^{17}$ эл/см²;

определено, что частичное ($x=0.01$) замещение в TlInS_2 атомов индия атомами хрома способствует образованию в монокристалле $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) однофазного состояния с гексагональной структурой (пр.гр. $R\bar{6}_3/mmc$), являющейся стабильной до флюенса электронов $2 \cdot 10^{17}$ эл/см²;

впервые выявлено увеличение микротвердости монокристаллов TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ и $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ после облучения электронами флюенсом $1.5 \cdot 10^{17}$ эл/см², обусловленное ростом размера кристаллитов и уменьшением плотности дислокаций;

установлено, что замещение в монокристалле TlInS_2 части атомов серы селеном уменьшает, а части атомов индия хромом увеличивает ширину запрещенной зоны, облучение электронами флюенсом $1.5 \cdot 10^{17}$ эл/см² монокристаллов TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ и $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ приводит к уменьшению ширины запрещенной зоны, связанному с увеличением размера кристаллитов и изменением межатомных расстояний.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

показано, что под действием электронного облучения флюенсом $1.5 \cdot 10^{17}$ эл/см² приповерхностный слой монокристаллов TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x = 1$) и $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) упрочняется;

установлено, что замещение части атомов серы в монокристалле TlInS_2 атомами селена стимулирует образование однофазного состояния с моноклинной структурой (пр.гр. $C2/c$) в $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$);

выявлено улучшение кристалличности монокристалла при облучении электронами, связанное с радиационным отжигом дефектов (дислокаций, напряжения), образовавшихся в процессе синтеза образца.

Достоверность результатов исследования обуславливается использованием современных высокоточных оборудования и приборов и подтверждается применением комплекса дополняющих друг друга методов физического эксперимента, хорошей воспроизводимостью результатов, а также согласованностью их с существующими литературными данными и общезначимыми представлениями.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов заключается в установлении закономерности влияния быстрых электронов на структуру, морфологию поверхности и свойства TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) и $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$), позволяющей развить существующие теории в широкозонных полупроводниках под действием радиации, в частности, образование дефектов под действием электронов с высокой энергией, изменение размеров кристаллитов и микротвердости, фазовых переходов.

Практическая значимость результатов исследования заключается в установлении радиационной стойкости монокристалла и поликристалла $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) при облучении электронами, что позволяет рассматривать их в качестве перспективных полупроводниковых материалов для изготовления фотоэлектрических преобразователей, анализаторов спектров и детекторов

ионизирующих излучений, тензопреобразователей.

Внедрение результатов исследования. На основе полученных результатов по выявлению особенностей структуры и свойств легированных и облученных электронами кристаллов TlInS_2 :

установленный фазовый переход из двухфазного состояния в однофазное с гексагональной структурой (пр.гр. $R\bar{6}_3/mmc$) в монокристалле TlInS_2 использован в Институте физики (письмо Института физики Министерства науки и образования Азербайджанской Республики №029-08/479 от 06.09.2022). Использование научных результатов позволило уточнить параметры кристаллической решетки склонных к полиморфным превращениям монокристаллов;

обнаруженная радиационная стойкость моноклинной структуры в монокристаллическом и поликристаллическом $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) при облучении электронами использована в рамках исследований по плановой теме лаборатории «Кристаллофизика» Института физики (письмо Института физики Министерства науки и образования Азербайджанской Республики №029-08/479 от 06.09.2022). Использование научных результатов позволило провести анализ зависимости физических свойств сложных полупроводников от их состава;

установленное образование в монокристалле $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0,01$) однофазного состояния со стабильной до флюенса электронов $2 \cdot 10^{17}$ эл/см² гексагональной структурой (пр.гр. $R\bar{6}_3/mmc$) использовано в рамках исследований по плановой теме лаборатории «Кристаллофизика» Института физики (письмо Института физики Министерства науки и образования Азербайджанской Республики №029-08/479 от 06.09.2022). Использование научных результатов позволило провести анализ зависимости свойств сложных полупроводников от содержания примесей;

установленное увеличение микротвердости монокристаллов TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ и $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ после облучения электронами флюенсом $1,5 \cdot 10^{17}$ эл/см² использовано в Институте физики (письмо Института физики Министерства науки и образования Азербайджанской Республики №029-08/479 от 06.09.2022). Использование научных результатов позволило провести анализ зависимости физических свойств сложных полупроводников от их состава;

установленные изменения ширины запрещенной зоны в монокристалле TlInS_2 при легировании и облучении электронами флюенсом $1,5 \cdot 10^{17}$ эл/см² монокристаллов TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ и $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ использованы в рамках исследований по плановой теме «Кристаллофизика систем $\text{TlGaS}(\text{Se})_2$ – $\text{Nd}_2\text{S}(\text{Se})_3$, TlInS_2 - TlInSe_2 и влияние на них редкоземельных элементов» (письмо Института физики Министерства науки и образования Азербайджанской Республики №029-08/479 от 06.09.2022). Использование научных результатов позволило провести анализ зависимости физических свойств сложных полупроводников от их состава и содержания примесей.

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

Опубликованность результатов исследований. По теме диссертации опубликованы 9 научных работ, из них 3 статьи в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, из которых 2 в зарубежных научных журналах.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы. Объем диссертации составляет 121 страницу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность темы диссертации, ее обоснованность, определено соответствие проведенных исследований приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан, 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 «**Морфология поверхности и структура полупроводниковых соединений типа $A^{III}B^{III}C_2^{VI}$** » приводится обзор литературного материала о поверхностной топографии и спектроскопии комбинационного рассеяния света, кристаллической структуре систем $TlInS_2$, $TlInS_xSe_{2-x}$ ($x=1$) и $TlIn_{1-x}Cr_xS_2$ ($x=0.01$), ширине запрещенной зоны. На основе анализа литературного материала в конце главы сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе диссертации «**Объекты для исследования и методика экспериментов**» обоснован выбор объектов исследования, приведены сведения о способе их получения, изложены специфические особенности использованных методов исследования.

Для исследования влияния быстрых электронов на структуру и на свойства кристаллов использовался ускоритель электронов "Электроника У-003". Образцы облучались ускоренными электронами с энергией 2 МэВ при плотности тока пучка 0.375 мкА/см².

Для изучения структуры, топографии поверхности и определения элементного состава кристаллов выбраны электронно-дисперсионная спектроскопия, сканирующий электронный микроскоп и атомно-слоевой микроскоп, а также рентгеноструктурный метод исследования

кристаллической структуры и фазовых переходов. Получение информации о кристаллической структуре исследуемых образцов осуществлено применением метода Ритвельда с использованием программы FullProf. Исследование монокристаллов методом рамановской спектроскопии позволило определить изменение молекулярных колебаний и дополнить структурные исследования. Определение ширины запрещенной зоны осуществлялось измерением спектра оптического поглощения на спектрофотометре «Лямбда 35» (Перкин Элмер) в диапазоне длин волн 190-1100 нм с использованием формулы Тауц:

$$(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g) \quad (1)$$

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

Микротвердость образцов определялась с помощью твердомера Micro-Vickers HVS-1000 Z.

В третьей главе диссертации «**Исследование влияния электронного излучения на поверхность, структуру и рамановский спектр кристаллов TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) и $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$)**» представлены результаты исследования по влиянию ускоренных электронов на поверхность, структуру, плотность дислокаций, рамановский спектр, ширину запрещенной зоны, микротвердость TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) и $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$).

Исследованиями на сканирующем электронном микроскопе поверхности исходного монокристалла TlInS_2 установлено, что среднее арифметическое отклонение профиля $R_a=19.8$ нм, средняя максимальная высота пика $R_z=387.6$ нм. На рис. 1 показана рентгенограмма монокристалла TlInS_2 (a) и некоторые ее участки (b, c, d). Анализ рентгенограммы показал, что основные рефлексы на дифрактограмме соответствуют гексагональной структуре (пр.гр. $P6_3/mmc$) с параметрами элементарной ячейки: $a = b = 10 \text{ \AA}$, $c = 14.9218(5) \text{ \AA}$.

Однако на рентгенограмме наряду с рефлексами, соответствующими гексагональной структуре (пр.гр. $P6_3/mmc$), присутствуют дополнительные отражения с относительно слабыми интенсивностями $2\Theta_B=17.7560^\circ$, $2\Theta_B=29.8560^\circ$, $2\Theta_B=42.2280^\circ$ и $2\Theta_B=69.1250^\circ$. Выполненные расчеты показали, что эти рефлексы соответствуют моноклинной структуре (пр.гр. $C2/c$). Таким образом, исходный образец TlInS_2 является двухфазным с гексагональной (пр.гр. $P6_3/mmc$) и моноклинной (пр.гр. $C2/c$) элементарными ячейками (рис.2).

Существование в исходном образце моноклинной (пр.гр. $C2/c$) и гексагональной фазы (пр.гр. $P6_3/mmc$) свидетельствует о том, что образование различных типов структур в TlInS_2 , скорее всего, зависит от условий синтеза и охлаждения образца.

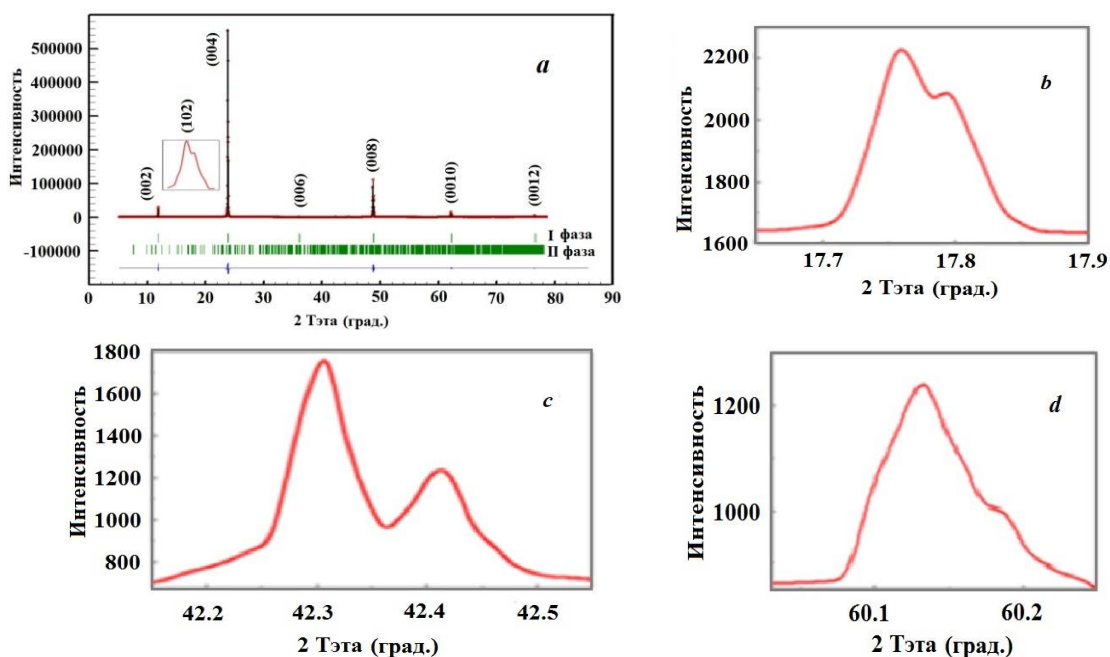


Рис.1. Рентгенограмма TlInS_2 (a) и участки (b,c,d) рентгенограммы с рефлексами от моноклинной фазы (пр.гр.C2/c)

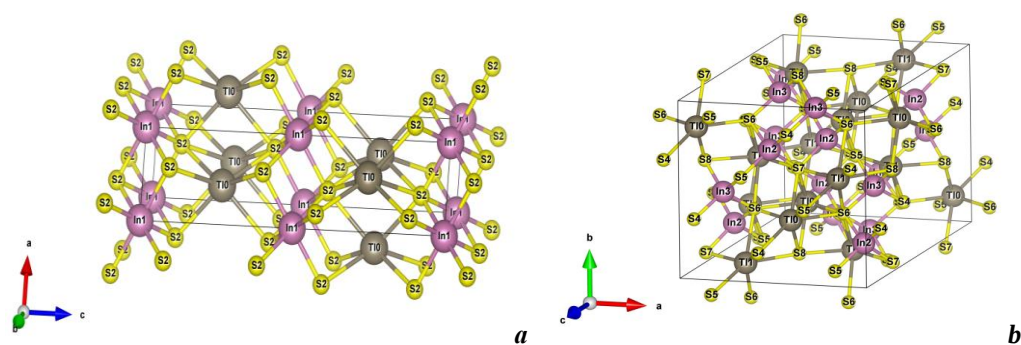


Рис.2. Гексагональная (пр.гр.P63/mmc) (a) и моноклинная (пр.гр.C2/c) (b) кристаллические структуры TlInS_2

Для получения более полной информации о структуре и выяснения “стойкости” структуры к внешним воздействиям был исследован порошкообразный TlInS_2 . На рис.3a приведена рентгенограмма порошка TlInS_2 .

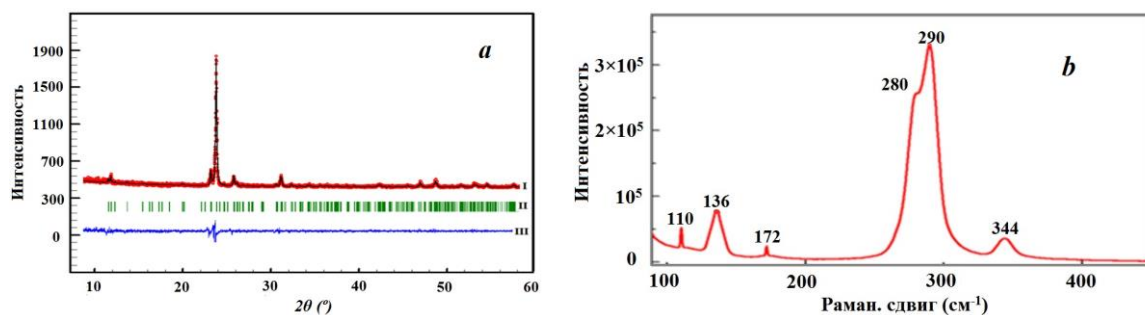


Рис.3. Рентгенограмма порошкообразного TlInS_2 : I – экспериментальные и расчетные данные; II – Брэгговские отражения; III – разностная кривая между экспериментальными и расчетными данными (a) и спектры рамановского рассеяния исходного TlInS_2 (b)

Расшифровка структуры образца показала, что рентгенограмма соответствует моноклинной фазе (пр.гр.C2/c) с параметрами элементарной ячейки: $a = 10.926 \text{ \AA}$; $b = 10.938 \text{ \AA}$; $c = 15.208 \text{ \AA}$.

Размер области когерентного рассеяния рентгеновских лучей, соответствующий средним размерам кристаллитов, определялся по ширине дифракционных рефлексов. Для этого использовали формулу Шеррера:

$$D = K\lambda / (\beta \cos\theta) \quad (2)$$

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

Для определения размера кристаллитов выбирался рефлекс с $2\theta_B = 23.8327^\circ$ и рассчитано значение полной ширины на полувысоте. Расчеты показали, что средний размер кристаллитов исходного порошкообразного TlInS_2 составляет $d = 54.7 \text{ нм}$. Рамановский спектр монокристалла TlInS_2 , приведенный на рис.3б, содержит шесть пиков с различными интенсивностями. Анализ асимметрии формы самого интенсивного пика подгонкой Гауссианом свидетельствует о том, что он состоит из двух пиков с 280 и 290 см^{-1} .

Следует отметить, что пики с 110 см^{-1} и 136 см^{-1} обусловлены внутрислойной связью между атомами In и S, а пик с 172 см^{-1} обусловлен межслойной связью между атомами Tl и S, а пики с 284 , 291 и 344 см^{-1} соответствуют межмолекулярным колебаниям тетраэдра In_4S_{10} .

Для исследования влияния замещения атомов на структуру и характеристики TlInS_2 часть атомов серы были замещены атомами селена. Рентгенограммы монокристалла и порошкообразного образца $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) показаны на рис.4. Установлено, что моноклинной элементарной ячейке соответствуют следующие параметры: $a = 1.1566 \text{ нм}$, $b = 1.1223 \text{ нм}$, $c = 1.5319 \text{ нм}$. Обработка полнопрофильным методом данных рентгенодифракционного исследования порошкообразного $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) показала, что образец, так же как и монокристалл $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$), имеет моноклинную элементарную ячейку (пр.гр.C2/c) с параметрами решетки: $a = 1.1109 \text{ нм}$, $b = 1.1126 \text{ нм}$, $c = 1.535 \text{ нм}$.

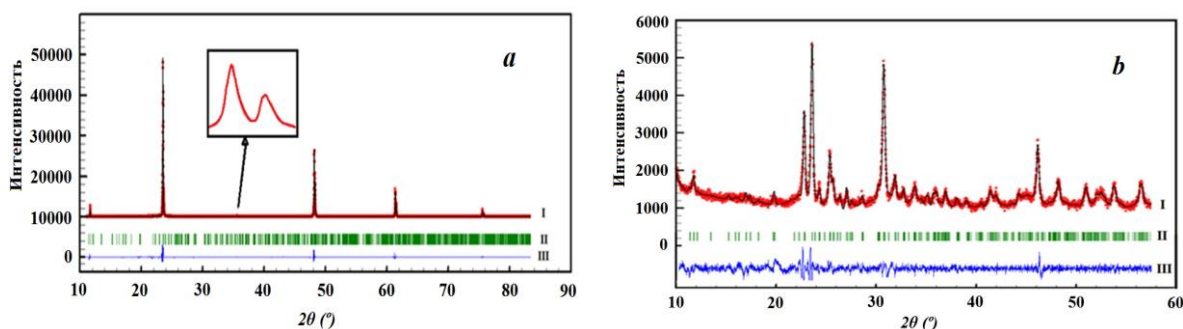


Рис.4. Рентгенограммы $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) исходного монокристалла (a) и порошкообразного образца (b): I – экспериментальные и расчетные данные; II – Брэгговские отражения; III – разностная кривая между экспериментальными и расчетными данными

В идеальном случае атомы S и Se, находящиеся в одинаковых позициях кристаллической решетки, имеют одинаковые координаты. Однако, как показывают расчеты, координаты атомов S и Se отличаются. Например, атомы серы, находящиеся в позициях S(4) имеют координаты $x = 0.0344$, $y = 0.3415$, $z = 0.8576$, то атомы селена, замещающие атомы серы в тех же позициях, имеют координаты $x = 0.0344$, $y = 0.3415$, $z = 0.7985$. В позиции S(5) атом серы имеет координаты по оси $z = 0.8742$, а координата атома Se равна $z = 0.7985$, или же, координаты атома S(8) равны $x = 0.0000$, $y = 0.4182$, $z = 0.7982$, тогда как атомы Se характеризуются координатами $x = 0.0000$, $y = 0.4182$, $z = 0.8547$. Расчеты показали, что средний размер кристаллитов исходного порошкообразного образца $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) составляет $d = 56.5$ нм. Результаты исследования Рамановской спектроскопии исходного кристалла $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) приведены на рис.5. Видно, что пик при 186 см^{-1} асимметричен и состоит из трех пиков. Расчеты показали, что центр пика соответствует 186 см^{-1} . Сопоставление частот колебаний кристаллов показывает, что частоты колебания подобных колебательных групп в кристаллах $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) в среднем на $10\text{-}15 \text{ см}^{-1}$ смещены в низкочастотную сторону, что свидетельствует об изменении внутримолекулярных и межмолекулярных сил связи при замене части атомов серы на селен, отличающихся атомными весами и значениями ковалентных радиусов.

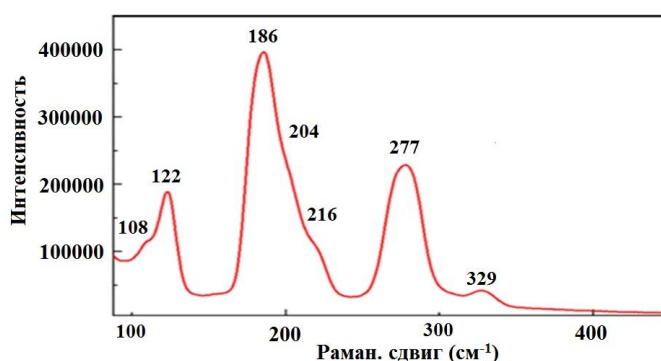


Рис.5. Спектры рамановского рассеяния исходного $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$).

Измерения $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) на сканирующем зондовом микроскопе показали, что максимальное значение среднего арифметического отклонения профиля исходного кристалла составляет $R_a=5.4$ нм, высота средней шероховатости $R_z=72.0$ нм. Рентгенограммы исходного монокристалла и порошкообразного $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) приведены на рис.6а.

Обработка рентгенограммы показала, что исходный монокристалл имеет гексагональную (пр.гр. $P6_3/mmc$) структуру с параметрами элементарной ячейки $a = 3.958 \text{ Å}$, $b = 3.958 \text{ Å}$, $c = 14.922 \text{ Å}$. Расчеты рентгенограммы показали образование в порошкообразном $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) моноклинной фазы (пр.гр. $C2/c$) с $a=10.864 \text{ Å}$, $b = 10.948 \text{ Å}$, $c=15.151 \text{ Å}$ и средним размером кристаллитов $d = 36.87$ нм.

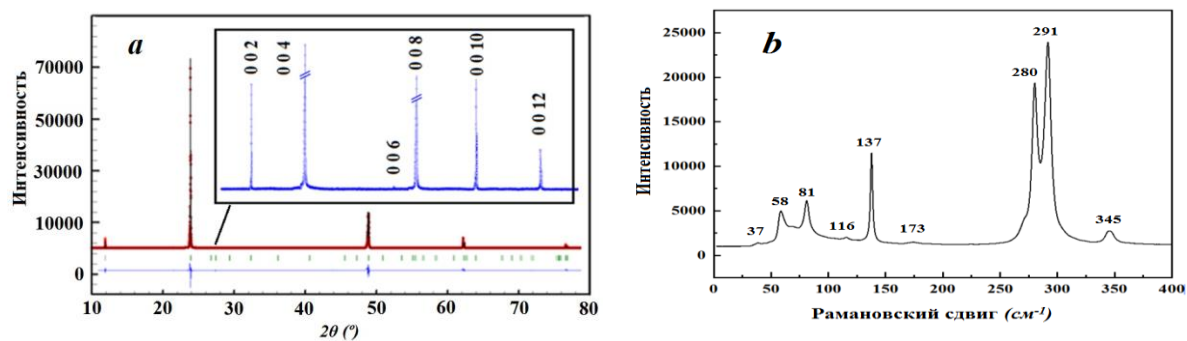


Рис.6. Рентгенограмма монокристалла $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) (a), I – экспериментальные и расчетные данные; II – Брэгговские отражения; III – разностная кривая между экспериментальными и расчетными данными, b-спектры рамановского рассеяния $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$)

Спектр рамановского рассеяния исходного образца $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) показан на рис.6б. Максимумы частот колебаний совпадают с частотами колебания нелегированного кристалла TlInS_2 , однако интенсивности спектров колебания легированного образца несколько меньше и пики более узкие.

В области $<100 \text{ см}^{-1}$ наблюдается несколько новых более низкочастотных полос колебаний. Так как при легировании атомы хрома занимают место атомов индия, то полосы в области $<100 \text{ см}^{-1}$, возможно, связаны с трансляционными колебаниями, обусловленными более слабыми взаимодействиями для связей между тетраэдрами Cr_4S_{10} и ионными силами, связывающими Tl^+ с ионами CrS_2 .

Установлено, что на поверхности монокристалла TlInS_2 максимальное значение среднего арифметического отклонения профиля после облучения электронами (флюенс $2 \cdot 10^{17} \text{ эл/см}^2$) составляет $R_a=48.1 \text{ нм}$, средняя высота пика - $R_z=694.4 \text{ нм}$. Рентгенографические исследования монокристалла TlInS_2 , облученного электронами флюенсом $2 \cdot 10^{17} \text{ эл/см}^2$, показали присутствие рефлексов, соответствующих гексагональной структуре (пр.гр. $R\bar{6}_3/mmc$) (рис.7(a, b, c, d)) с параметрами элементарной ячейки $a \approx b=10 \text{ Å}$, $c=14.923 \text{ Å}$ и отсутствие рефлексов второй фазы (пр.гр. $C2/c$), обнаруженных в исходном образце (рис.7(d)). Наблюдается смещение рефлексов в сторону больших углов, более заметное искажение первого рефлекса с $2\Theta_B=11.9060^\circ$ и увеличение интенсивности рефлексов по сравнению с исходным образцом.

Из рис.7 видно, что в облученном TlInS_2 более заметно выражено искажение не только первого рефлекса (a), но и наблюдается более четкое расщепление $\text{Cu-K}_{\alpha 1}$ и $\text{Cu-K}_{\alpha 2}$ излучений (b, c). Форма пиков после радиационной обработки стала симметричной и узкой, а также отсутствуют рефлексы при $2\Theta_B = 17.7560^\circ$ (Рис.7(d)), $2\Theta_B=29.8560^\circ$, $2\Theta_B=42.2280^\circ$ и $2\Theta_B=69.1250^\circ$. Это свидетельствует о том, что облучение электронами способствует увеличению кристалличности и образованию однофазного состояния образца.

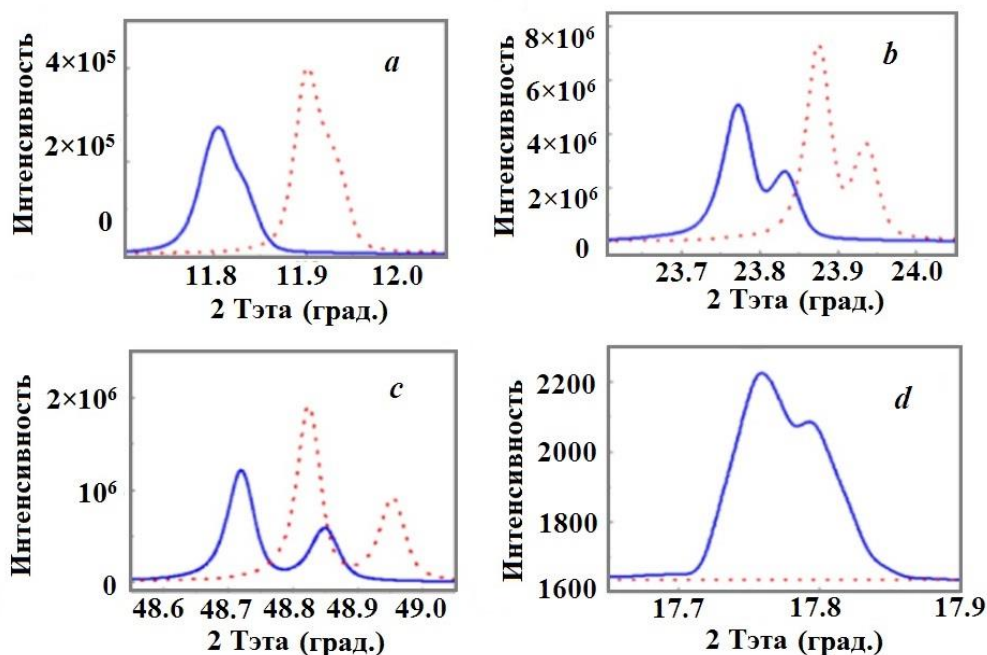


Рис.7. Участки рентгенограмм (a,b,c,d) TlInS₂ до (сплошная синяя) и после облучения электронами флюенсом $2 \cdot 10^{17}$ эл/см² (точки красные)

Результаты обработки рентгенодифракционных данных порошкообразного TlInS₂ после облучения электронами флюенсом $2 \cdot 10^{17}$ эл/см² свидетельствуют о сохранении моноклинной структуры (пр.гр.C2/c), а средний размер кристаллитов 114.32 нм.

Измеренные рамановские спектры облученных электронами флюенсом $2 \cdot 10^{17}$ эл/см² образца TlInS₂ показали (рис.8), что интенсивности шести пиков, имеющих в исходном необлученном образце, уменьшились по сравнению с исходными. Также центры двух пиков (110 см^{-1} , 135 см^{-1}) по сравнению с аналогичными пиками исходного образца сместились в область больших частот (смещений), а пики с 172 см^{-1} , 291 см^{-1} и 344 см^{-1} не изменились, однако обнаружены новые пики при 204 и 224 см^{-1} со слабыми интенсивностями.

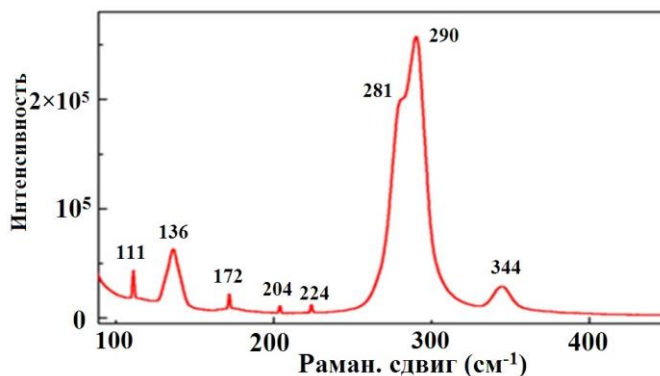


Рис.8. Спектры рамановского рассеяния TlInS₂, облученного электронами флюенсом $2 \cdot 10^{17}$ эл/см²

Уменьшение интенсивности рамановских спектров при облучении быстрыми электронами может быть обусловлено нарушением правил отбора для рамановского рассеяния из-за разрыва связей и изменением оптических свойств материала, что может привести к росту коэффициента поглощения на длине волны возбуждения. Возникающая поверхностная шероховатость в области облучения может привести к росту рассеяния и непопадания луча в объектив.

Рентгенодифракционное исследование облученного электронами флюенсом $2 \cdot 10^{17}$ эл/см² монокристалла $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) (рис.9а) свидетельствует о сохранении исходной моноклинной структуры (пр.гр. $C2/c$) с параметрами элементарной ячейки: $a = 1.0969$ нм, $b = 1.106$ нм, $c = 1.5327$ нм. Расчеты данных рентгеноструктурного исследования облученного электронами порошкообразного образца $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) показали, что образец имеет моноклинную структуру (пр.гр. $C2/c$) с параметрами $a = 1.1115$ нм, $b = 1.1128$ нм, $c = 1.5359$ нм (рис.9б). Координаты атомов S и Se соответствующих позиций одинаковы.

После облучения образца ускоренными электронами с флюенсом $2 \cdot 10^{17}$ эл/см² средний размер кристаллита увеличился до $d = 65$ нм.

Таким образом, из результатов исследования следует, что замещение части атомов S атомами Se в TlInS_2 способствует образованию однофазного состояния с моноклинной структурой (пр.гр. $C2/c$).

Изучение воздействия ускоренных электронов с флюенсом $2 \cdot 10^{17}$ эл/см² на $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) показало, что поверхность становится более шероховатой: увеличиваются и ширина, и высота бугорков; максимальное значение среднеарифметического отклонения профиля составляет $R_a = 25.2$ нм, высота средней шероховатости - $R_z = 152.9$ нм.

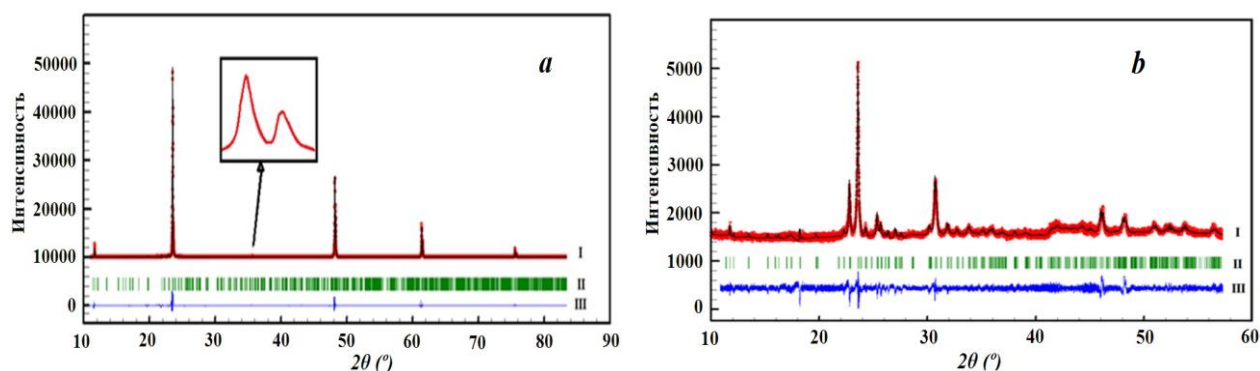


Рис.9. Рентгенограммы $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$), облученного электронами флюенсом $2 \cdot 10^{17}$ эл/см²: монокристалла (а) и порошкообразного образца (б), I – экспериментальные и расчетные данные; II – Брэгговские отражения; III – разностная кривая между экспериментальными и расчетными данными

Расчеты рентгенограмм монокристалла $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) после облучения флюенсом электронов $2 \cdot 10^{17}$ эл/см² показали, что параметры кристаллической решетки равны: $a = 3.852$ Å, $b = 3.852$ Å, $c = 14.911$ Å.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что объем элементарной ячейки монокристалла $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) после облучения электронами незначительно уменьшился, т.е. введение Cr в количестве 0.01 моль% слабо влияет на параметры кристаллической решетки матрицы TlInS_2 . Хотя исходная моноклинная кристаллическая структура сохранилась после облучения электронами, однако, координаты атомов и параметры элементарной ячейки по сравнению с исходной изменились (рис.9b).

Средний размер кристаллитов исходного порошкообразного образца $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) составляет $d=36.87$ нм, а после облучения ускоренными электронами увеличился до $d=41.76$ нм. В отличие от $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) при облучении электронами флюенсом $2 \cdot 10^{17}$ эл/см² кристаллов $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) рамановские спектры не претерпевают изменений.

Необходимо отметить, что экспериментальные данные о морфологии поверхности кристаллов $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) и $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) до и после облучения электронами в литературе отсутствуют.

TlInS_2 имеет различные структуры, структурные состояния, что, скорее всего, связано с особенностями синтеза, отжига и охлаждения образца. Замещение части атомов серы атомами селена, а также части атомов индия атомами хрома в TlInS_2 стимулирует образование однофазного состояния в монокристаллах $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) и $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$). Сходством TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) и $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) является то, что во всех трех случаях после облучения электронами ширина рефлексов уменьшается, что свидетельствует об увеличении размера кристаллитов.

Исходный монокристалл $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ имеет моноклинную структуру (пр.гр.C2/c) ($x=1$) с $a = 11.566$ Å, $b = 11.223$ Å, $c = 15.319$ Å и $\beta = 100.21^\circ$. Облучение монокристалла $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) электронами способствовало изменению параметров элементарной ячейки с $a = 10.96$ Å, $b = 11.06$ Å, $c = 15.32$ Å и $\beta=100.47^\circ$, а порошкообразный $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) состоял из моноклинной фазы (пр.гр.C2/c) с $a = 11.10$ Å, $b = 11.12$ Å, $c = 15.35$ Å и $\beta=100.69^\circ$ со средним размером кристаллитов 56.5 нм. После облучения электронами структурное состояние образца сохранилось, параметры элементарной ячейки претерпели небольшое изменение по оси a .

Кристаллы TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) и $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) имеют одинаковую общую химическую формулу $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{III}}\text{C}^{\text{VII}}$. Их рентгенограммы подобны, с той лишь разницей, что рефлексы в $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) и $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) смещены в область меньших или больших дифракционных углов по сравнению с рефлексами на рентгенограмме TlInS_2 . Причину этого легко понять, так как значение периодов решетки $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($a=11.109$ Å; $b=11.126$ Å; $c=15.350$ Å) больше из-за большего размера атомов селена (1.16 Å) по сравнению с атомами серы (1.04 Å), а значение периодов решетки $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($a=10.864$ Å; $b=10.948$ Å, $c=15.151$ Å) меньше периода решетки TlInS_2 ($a=10.926$ Å; $b=10.983$ Å, $c=15.208$ Å) из-за меньшего размера атомов хрома (1.27 Å) по сравнению с атомами индия (1.63 Å).

При введении в кристаллы примесей, многие физические характеристики, в том числе ширина запрещенной зоны кристалла, плотность дислокаций и микронапряжение могут изменяться. Для определения ширины запрещенной зоны исследовались спектры оптического поглощения нелегированных и легированных кристаллов TlInS_2 до и после облучения электронами энергией 2 МэВ в области фундаментального поглощения кристаллов. По методу пересечения продолжения прямолинейной части фундаментального поглощения с осью энергий излучения определялась ширина запрещенной зоны кристаллов TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) и $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) (рис.10).

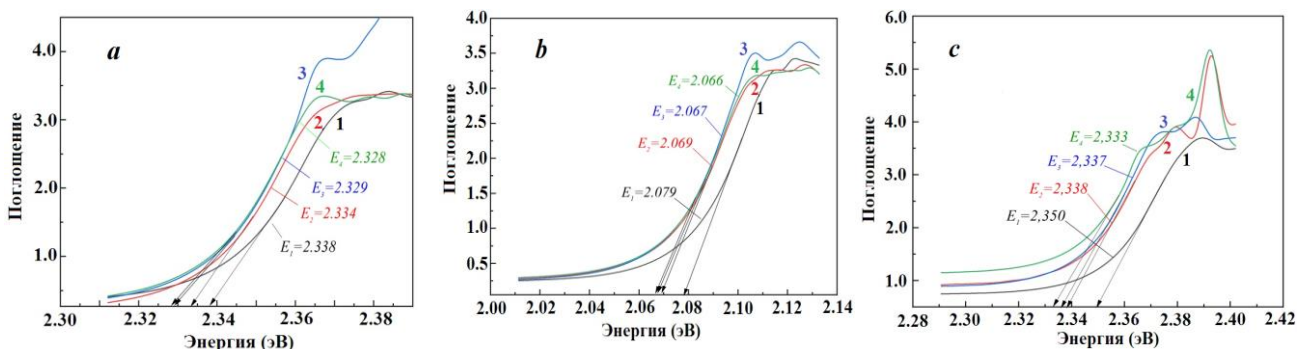


Рис.10. Спектры поглощения монокристаллов TlInS_2 (а), $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) (б), $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) (в), облученных при различных флюенсах электронов: 1-исходный; 2- $5.5 \cdot 10^{16}$ эл/см²; 3- $1.0 \cdot 10^{17}$ эл/см²; 4- $1.5 \cdot 10^{17}$ эл/см²

Видно, что при воздействии быстрых электронов ширина запрещенной зоны в кристалле TlInS_2 уменьшилась от $E_{g1} = 2.338$ эВ до $E_{g4} = 2.328$ эВ (рис.10а). Из-за увеличения параметров решетки кристалла TlInS_2 при частичном замещении атомов S на атомы Se, имеющих больше атомных размеров, ширина запрещенной зоны уменьшается от 2.338 эВ (в TlInS_2) до 2.079 эВ (в $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$). При облучении же монокристаллов $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) флюенсами электронов $5.5 \cdot 10^{16}$ эл/см² и $1.0 \cdot 10^{17}$ эл/см² ширина запрещенной зоны уменьшается от 2.079 эВ соответственно до 2.069 и 2.066 эВ (рис.10б). В образце $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$), где часть атомов In ($r_a=1.63$ Å) замещена атомами Cr ($r_a=1.27$ Å) параметр решетки уменьшается, что приводит к увеличению ширины запрещенной зоны от 2.338 эВ (в TlInS_2) до 2.35 эВ. Однако облучение быстрыми электронами вызывает уменьшение ширины запрещенной зоны от $E_{g1} = 2.35$ эВ до $E_{g4} = 2.333$ эВ (рис.10с).

Исследованиями установлено, что при воздействии быстрых электронов энергией 2 МэВ и флюенсом $3 \cdot 10^{17}$ эл/см² на порошкообразные образцы наблюдается рост размера кристаллитов от 54.7 до 119.3 нм в TlInS_2 , от 36.87 нм до 50.15 нм в $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) и от 56.5 нм до 72 нм в $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$), обусловленный уменьшением границ раздела за счет увеличения размера кристаллитов по нормальному механизму роста кристаллитов (таблица 1).

Во всех исследованных образцах установлено уменьшение плотности дислокаций и микронапряжения с увеличением флюенса электронов.

Таблица 1

**Характеристики TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) и $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$)
облученных ускоренными электронами**

Характеристики	TlInS ₂			TlInS _x Se _{2-x} (x=1)			TlIn _{1-x} Cr _x S ₂ (x=0.01)		
	флюенс, 10 ¹⁷ эл/см ²								
	0	2	3	0	2	3	0	2	3
D, нм	54.7	114.3 2	119. 3	56. 5	65	72	36.8 7	41.7 6	50.15
σ×10 ¹⁴ , м ⁻²	4	1	1	4	3	2	8	6	4
ε, ×10 ⁻³	11.4 3	6.55	3.48	4.2 5	3.3 6	2.6 4	6.2	5.13	3.85

(D - средний размер кристаллитов; σ - плотности дислокаций; ε - микронапряжения)

Для оценки микротвердости монокристаллов были проведены измерения микротвердости по Виккерсу до и после облучения образцов. Результаты измерения микротвердости H_μ монокристаллов TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) и $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ $x=0.01$ до и после облучения электронами приведены в таблице 2.

Таблица 2

**Микротвердость монокристаллов TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) и $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$
($x=0.01$) до и после облучения электронами**

Образец	Нагрузка, гр	Микротвердость по Виккерсу, HV			
		Исход- ный	Облученный		
			$5.5 \cdot 10^{16}$ эл/см ²	$1 \cdot 10^{17}$ эл/см ²	$1.5 \cdot 10^{17}$ эл/см ²
TlInS_2	50	14.6	19.0	20.1	21.4
$\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$)	50	16.8	18.5	19.1	21.6
$\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$)	50	17.9	18.2	21.5	22.9

После облучения H_μ растет при 50 г нагрузке за счет увеличения размера кристаллитов, что означает радиационно-индуцированное упрочнение приповерхностного слоя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований по диссертации на соискание ученой степени доктора философии (PhD) на тему: «Структура и свойства легированных и облученных электронами кристаллов TlInS_2 » сделаны следующие выводы:

1. Показано, что облучение TlInS_2 электронами энергией 2 МэВ и флюенсом $2 \cdot 10^{17}$ эл/см² приводит к увеличению на поверхности образца высоты бугорка и его ширины более чем в два раза.
2. Установлено, что монокристалл $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) имеет гексагональную (пр.гр. $R\bar{6}3/mmc$) структуру с параметрами $a=3.958 \text{ \AA}$, $b=3.958 \text{ \AA}$, $c=14.922 \text{ \AA}$ и $\alpha=90^\circ$, $\beta=90^\circ$, $\gamma=120^\circ$.
3. Установлено, что замещение части атомов серы в монокристалле TlInS_2 атомами селена стимулирует образование однофазного состояния с моноклинной структурой (пр.гр. $C2/c$) в $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$).
4. Впервые обнаружена радиационная стойкость моноклинной структуры (пр.гр. $C2/c$) в монокристаллическом и поликристаллическом $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) при облучении электронами энергией 2 МэВ до флюенса $2 \cdot 10^{17}$ эл/см².
5. Установлено, что после облучения монокристалла $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) электронами флюенсом $2 \cdot 10^{17}$ эл/см² сохраняется исходная гексагональная структура, максимальное значение среднего арифметического отклонения профиля увеличивается более чем в пять раз, а высота средней шероховатости увеличивается от $R_z=72.0 \text{ нм}$ до $R_z=152.9 \text{ нм}$.
6. Показано, что в порошкообразных образцах TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) и $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) присутствует моноклинная структура (пр.гр. $C2/c$) и при облучении электронами структуры сохраняются, однако средний размер кристаллитов увеличивается.
7. Впервые установлено, что после облучения монокристаллов TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ и $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ электронами энергией 2 МэВ и флюенсом $1.5 \cdot 10^{17}$ эл/см² увеличивается микротвердость и до флюенса $3 \cdot 10^{17}$ эл/см² уменьшаются микронапряжения кристаллов.
8. Рамановской спектроскопией установлено, что радиационная обработка электронами TlInS_2 индицирует появление новых пиков 204 см^{-1} , 224 см^{-1} и смещение некоторых пиков, обусловленных внутрислойной связью и межмолекулярным колебанием (281 см^{-1}).
9. Показано, что облучение электронами энергией 2 МэВ и флюенсом $3 \cdot 10^{17}$ эл/см² порошкообразного $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) способствует росту размера кристаллитов от 36.87 нм до 50.15 нм , что, скорее всего, связано с уменьшением границ раздела.
10. Впервые установлено, что замещение в монокристалле TlInS_2 части атомов серы атомами селена уменьшает, а части атомов индия атомами хрома увеличивает ширину запрещенной зоны.

11. Впервые установлено, что облучение электронами флюенсом $1.5 \cdot 10^{17}$ эл/см² монокристаллов TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ и $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ приводит к уменьшению ширины запрещенной зоны, связанному с увеличением размера кристаллитов и изменением межатомных расстояний.

**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

KHALLOKOV FARHOD KARIMOVICH

**STRUCTURE AND PROPERTIES OF DOPED AND ELECTRON-
IRRADIATED TiInS_2 CRYSTALS**

01.04.07 – Condensed matter physics

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

Tashkent – 2022

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 № B2019.2.PhD/FM364

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 and on the website of “Ziyonet” information and educational portal at www.ziyonet.uz.

Scientific supervisor: **Tashmetov Mannab Yusupovich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Official opponents: **Akhmedjanov Farhod Rashidovich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Docent
Mussaeva Malika Anvarovna
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher

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

The defense of the dissertation will be held on “____” _____ 2022 at _____ at the meeting of Scientific Council No. DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 at the Institute of Nuclear Physics (Address: INP, Ulugbek settlement, 100124 Tashkent city, tel. (+99871)289-31-41; fax: (+99871)289-36-65; e-mail: 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: INP, Ulugbek settlement, 100124 Tashkent city, tel. (+99871)289-31-19).

The abstract of dissertation was distributed on “____” _____ 2022
(Registry record No. ____ dated “____” _____ 2022)

I.I. Sadikov
Vice-Chair of the Scientific Council
on award of scientific degree
D.T.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 is to reveal the features of the structure and properties of TlInS_2 crystals doped and irradiated with electrons.

The tasks of the research:

study of the effect of electrons with an energy of 2 MeV and various fluences on the surface morphology of TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) and $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) single crystals;

determination of the structure of single crystals and polycrystals TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) and $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) by X-ray diffraction phase analysis;

study of the influence of electrons with an energy of 2 MeV and various fluences on crystal structures, structural parameters of TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) and $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) single crystals and polycrystals;

study of Raman scattering of light (Raman spectra) in TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) and $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) before and after exposure to 2 MeV electrons of various fluences;

determination of crystallite size and dislocation density before and after electron irradiation of various fluences TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) and $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$);

determination of the band gap and microhardness of single crystals TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) and $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) under the influence of electrons with an energy of 2 MeV and various fluences.

The object of research are structures and property of TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) and $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) crystals.

The subject of research is the crystal structure, morphology, properties, Raman spectra of TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) and $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) crystals depending on the electron fluence.

The scientific novelty of the research is as follows:

A phase transition from a two-phase state (hexagonal structure with space group $P6_3/mmc$ and a monoclinic structure with space group $C2/c$) to a single-phase state with a hexagonal structure (space group $P6_3/mmc$) was established in a TlInS_2 single crystal, induced by irradiation electrons with an energy of 2 MeV and a fluence of $2 \cdot 10^{17} \text{ e/cm}^2$ and caused by “radiation shaking”;

for the first time, the radiation resistance of a monoclinic structure (sp.gr. $C2/c$) in single-crystal and polycrystalline $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) was discovered upon irradiation with electrons up to a fluence of $2 \cdot 10^{17} \text{ e/cm}^2$;

it has been determined that partial ($x=0.01$) substitution of indium atoms by chromium atoms in TlInS_2 contributes to the formation in a single crystal of $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) of a single-phase state with a hexagonal structure (sp.gr. $P6_3/mmc$), which is stable up to the electron fluence $2 \cdot 10^{17} \text{ e/cm}^2$;

for the first time, an increase in the microhardness of TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) and $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) single crystals after electron irradiation with a fluence of $1.5 \cdot 10^{17} \text{ el/cm}^2$, due to an increase in the size of crystallites and a decrease in the dislocation density, was revealed;

it was found that the substitution of selenium for part of the sulfur atoms in a TlInS_2 single crystal decreases the band gap, and for some of the thallium atoms with indium increases the band gap, electron irradiation with a fluence of $1.5 \cdot 10^{17} \text{ e/cm}^2$ with an increase in the size of crystallites and a change in interatomic distances.

Implementation of the research results. Based on the results obtained for revealing the features of the structure and properties of TlInS_2 crystals doped and irradiated with electrons:

The established phase transition from a two-phase state to a single-phase state with a hexagonal structure (space group $P6_3/\text{mmc}$) in a TlInS_2 single crystal was used at the Institute of Physics of the Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan (letter of the Institute of Physics of the Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan No. 029-08/479 dated 09/06/2022). The use of scientific results made it possible to refine the parameters of the crystal lattice of single crystals prone to polymorphic transformations;

The discovered radiation resistance of the monoclinic structure in single-crystal and polycrystalline $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) under electron irradiation was used in the framework of research on the planned theme of the laboratory "Crystallophysics" of the Institute of Physics of the Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan (letter of the Institute of Physics of the Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan No. 029-08/479 of 09/06/2022). The use of scientific results made it possible to analyze the dependence of the physical properties of complex semiconductors on their composition;

The established formation in the single crystal $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) of a single-phase state with a stable hexagonal structure up to an electron fluence of $2 \times 10^{17} \text{ e/cm}^2$ (space group $P6_3/\text{mmc}$) was used in the framework of research on the planned topic of the laboratory "Crystallophysics" of the Institute physics of the Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan (letter of the Institute of Physics of the Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan No. 029-08/479 dated 06.09.2022). The use of scientific results made it possible to analyze the dependence of the properties of complex semiconductors on the content of impurities;

The established increase in the microhardness of TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) and $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) single crystals after irradiation with electrons with a fluence of $1.5 \cdot 10^{17} \text{ e/cm}^2$ was used at the Institute of Physics of the Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan (letter of the Institute of Physics of the Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan No. 029-08/479 dated 09/06/2022). The use of scientific results made it possible to analyze the dependence of the physical properties of complex semiconductors on their composition;

The established changes in the band gap in a TlInS_2 single crystal during doping and electron irradiation with a fluence of $1.5 \cdot 10^{17} \text{ e/cm}^2$ of TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) and $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) single crystals were used in the

framework of research on the planned topic “Crystal physics of $\text{TlGaS}(\text{Se})_2$ – $\text{Nd}_2\text{S}(\text{Se})_2$ systems, TlInS_2 - TlInSe_2 and the influence of rare earth elements on them” (letter of the Institute of Physics of the Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan No. 029-08/479 dated 06.09.2022). The use of scientific results made it possible to analyze the dependence of the physical properties of complex semiconductors on their composition and impurity content.

The structure and volume of the dissertation. The dissertation work consists of an introduction, four chapters, a conclusion and a list of used literature. The volume of the thesis is 121 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; part I)

1. Tashmetov M.Yu., Khallokov F.K., Ismatov N.B., Yuldashova I.I., Nuritdinov I., Umarov S.Kh. Study of the influence of electronic radiation on the surface, structure and Raman spectrum of a TlInS_2 single crystal // Physica B: Condensed Matter. – Elsevier (Netherlands), 2021. Vol. 613. ID. 412879. – P. 6 (№ 1. Web of Science, IF=2.988).

2. Tashmetov M.Yu., Khallokov F.K., Ismatov N.B., Yuldashova I.I., Umarov S.Kh. Electronic irradiation of $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$): Morphology, structure and raman scattering // International Journal of Modern Physics B. World Scientific. – Singapore, 2021. Vol. 35. No. 8. ID. 2150111. – P. 9 (№ 3. Scopus, IF=1.219).

3. Tashmetov M.Yu., Khallokov F.K., Ismatov N.B., Umarov S.Kh. Influence of accelerated electrons on the structure, crystallite size and surface of a $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ crystal with $x = 0.01$ // Uzbek Journal of Physics. – Tashkent: Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, 2021. Vol. 23. No. 4. – P. 51–56 (01.00.00. №5).

II бўлим (II часть; part II)

4. Ташметов М.Ю., Халлоков Ф.К., Исматов Н.Б., Юлдашова И.И., Нуритдинов И., Умаров С.Х. Исследование влияния электронного облучения на поверхность, структуру и рамановский спектр монокристалла TlInS_2 // Препринт ИЯФ АН РУз. – Ташкент: ИЯФ АН РУз, 2020. – № Р-9-720. – 20 с.

5. Ташметов М.Ю., Халлоков Ф.К., Исматов Н.Б., Умаров С.Х. Влияние легирования и облучения электронами на ширину запрещенной зоны и микротвердость монокристаллов TlInS_2 , $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x = 1$) и $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ ($x=0.01$) // Препринт ИЯФ АН РУз. – Ташкент: ИЯФ АН РУз, 2022. – № Р-9-724. – 20 с.

6. Ташметов М.Ю., Халлоков Ф.К., Исматов Н.Б., Атажанова Г.У. Структура монокристалла TlInS_2 / “Современные проблемы физики” материалы VII Международной конференции. – Душанбе: изд-во “Дониш”, 2020. 9-10 октября. – С. 123-126.

7. Ташметов М.Ю., Халлоков Ф.К., Исматов Н.Б. Влияние ускоренных электронов на структуру и поверхность кристалла $\text{TlIn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{S}_2$ с $x=0.01$ / I Международная конференция “Фундаментальные и прикладные проблемы физики полупроводников, микро- и наноэлектроники” сборник материалов научной конференции. – Ташкент: НИИ физики полупроводников и микроэлектроники, 2021. 28-29 октября. – С. 174-176.

8. Tashmetov M.Yu., Khallokov F.K., Umarov S.Kh., Khozhiev T.S. Influence of accelerated electrons on the raman spectrum of a $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x = 1$)

single crystal // Global Science and Innovations: Central Asia. – Nur-Sultan (Kazakhstan): Bobek, 2021. – № 1 (13). – P. 4-8.

9. Tashmetov M.Yu., Khallokov F.K. Influence of electronic radiation on the structure and surface of a $\text{TlInS}_x\text{Se}_{2-x}$ ($x=1$) single crystal / “Modern Problems of Nuclear Energetics and Nuclear Technologies” Book of Abstracts of International Conference. – Tashkent: Institute of Nuclear Physics, 2021. November 23-25. – P. 172-174.

Автореферат “ЎзМУ хабарлари” илмий журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилиб, ўзбек ва рус тилларидаги матнлар ўзаро мувофиқлаштирилди (09.11.2022 йил).

Босмахона лицензияси:



9338

Бичими: 84x60 $\frac{1}{16}$. «Times New Roman» гарнитураси.

Рақамли босма усулда босилди.

Шартли босма табоғи: 2,75. Адади 100 дона. Буюртма № 70/22.

Гувоҳнома № 851684.

«Tipograff» МЧЖ босмахонасида чоп этилган.

Босмахона манзили: 100011, Тошкент ш., Беруний кўчаси, 83-уй.