ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ, АСТРОНОМИЯ ИНСТИТУТИ, ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.27.06.2017.FM/T.33.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ

ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ

АШУРОВ ЖАСУР ДЖЎРАЕВИЧ

$TlInSe_2$ МОНОКРИСТАЛЛАРИНИНГ ВА УЛАР АСОСИДАГИ ҚАТТИҚ ЭРИТМАЛАРНИНГ ТЕНЗОРЕЗИСТИВ ХУСУСИЯТЛАРИ

01.04.07 – конденсирланган ҳолат физикаси

ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD) ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ

Тошкент – 2019

УДК 621.315.592:535.215.5:53.082.7

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

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

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

Ашуров Жасур Джўраевич
$TlInSe_2$ монокристалларининг ва улар асосидаги қаттиқ эритмаларнинг тензорезистив хусусиятлари …..... 3

Ашуров Жасур Джураевич
Тензорезистивные свойства монокристаллов $TlInSe_2$ и твердых растворов на его основе ……..... 23

Ashurov Jasur Djuraevich
Tensoresistive properties of $TlInSe_2$ single crystals and solid solutions based on it. ……..... 43

Эълон қилинган ишлар рўйхати
Список опубликованных работ
List of published works…….. 51

ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ, АСТРОНОМИЯ ИНСТИТУТИ, ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.27.06.2017.FM/T.33.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ

ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ

АШУРОВ ЖАСУР ДЖЎРАЕВИЧ

$TlInSe_2$ МОНОКРИСТАЛЛАРИНИНГ ВА УЛАР АСОСИДАГИ ҚАТТИҚ ЭРИТМАЛАРНИНГ ТЕНЗОРЕЗИСТИВ ХУСУСИЯТЛАРИ

01.04.07 – конденсирланган ҳолат физикаси

ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD) ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ

Тошкент – 2019

Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2018.2.PhD/FM248 рақами билан рўйхатга олинган.

Диссертацияси 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 порталида (www.ziyonet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбари:	**Нуритдинов Иззатилло** физика-математика фанлари доктори, профессор
Расмий оппонентлар:	**Хидиров Ирсали** физика-математика фанлари доктори, профессор
	Турсунов Икромжон Гуламжонович физика-математика фанлари доктори
Етакчи ташкилот:	**Андижон давлат университети**

Диссертация ҳимояси Ядро физикаси институти, Астрономия институти, Ўзбекистон Миллий университети ҳузуридаги DSc.27.06.2017.FM/T.33.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2019 йил _____ соат _____ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100174, Тошкент шаҳри, Улуғбек қўрғони, Ядро физикаси институти. 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 (_____ рақами билан рўйхатга олинган). (Манзил: 100214, Тошкент шаҳри, Улуғбек қўрғони, ЯФИ. Тел. (+99871) 289-31-19).

Диссертация автореферати 2019 йил « » _____ куни тарқатилди.
(2019 йил “____”_____даги ____ рақамли реестр баённомаси)

М. Ю. Ташметов
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш раиси ф.-м.ф.д., профессор

Э.М. Турсунов
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш илмий котиби ф.-м.ф.д., катта илмий ходим

С.Н. Нуритдинов
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш ҳузуридаги илмий семинар раиси ўринбосари ф.-м.ф.д., профессор

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Бугунги кунда дунё миқёсида тадқиқотчи ва амалиётчилар томонидан турли яримўтказгич ўзгартиргичларни, жумладан тензоўзгартиргичларни ўрганишга катта эътибор қаратилмоқда. Бунинг сабаби уларнинг юқори сезгирлиги ва ўлчамларининг кичиклигидир. Бироқ замонавий фан ва техниканинг талаблари тобора ўсиб бормоқда, бу эса ўз навбатида ушбу эҳтиёжларни қаноатлантирувчи турли хил хусусиятларга эга материалларни талаб қилади. Бундан келиб чиққан ҳолда мавжуд яримўтказгич материалларнинг хусусиятларини яхшилаш билан бир қаторда янги яримўтказгич материалларни излаб топиш ва уларнинг хусусиятларини тадқиқ қилиш замонавий конденсирланган ҳолат физикасининг муҳим вазифаларидан бири бўлиб, кўплаб турли хилдаги янги яримўтказгич материалларни, жумладан уч ва ундан ортиқ компонентли мураккаб бирикмалар ва уларнинг қаттиқ эритмаларининг яратилишига олиб келади.

Жаҳонда янги кўпкомпонентли яримўтказгич бирикмаларнинг таркиби, структураси ва хусусиятларининг ўзаро алоқадорлигини ўрганиш яримўтказгичларга оид фундаментал илмий тасаввурларнинг чуқурлашишига олиб келиши билан бир қаторда, янги амалий истиқболларнинг очилишига ҳам сабаб бўлади: янги бирикмалар аксар холларда ўзига хос янги хусусиятларни намоён қилади ва бу билан вужудга келаётган турли муҳим техник муаммоларнинг ҳал қилинишига ёрдам беради. Таркиб, структура ва хусусиятларининг ўзаро алоқадорлиги қонуниятларини ўрганиш олдиндан белгиланган хусусиятларга эга бўлган энг самарали янги яримўтказгич материалларни излаш ва яратишнинг илмий асосларини ишлаб чиқиш хамда шу орқали ўсиб бораётган замонавий оптик, яримўтказгич ва квант микроэлектроникаси талабларини қондириш имкониятини беради. Мукаммал йирик, нуқсонсиз кристаллар тарзида олинган янги яримўтказгич материллар эса алоҳида аҳамиятга эга бўлади. $A^{III}B^{III}C_2^{VI}$ типидаги кўпкомпонентли яримўтказгич бирикмалар орасида, кўпгина физикавий ҳодисаларининг конуниятлари ҳали тўлиқ ўрганилмаган $TlInSe_2$ яримўтказгич бирикмалари алоҳида қизиқиш уйғотади. Дунёнинг турли илмий марказлари олимлари томонидан легирланмаган $TlInSe_2$ кристалларининг электрик, термоэлектрик, иссиқлик ва фотоэлектрик хусусиятларини ўрганиш бўйича олиб борилган тадқиқотлар натижалари ушбу кристалларнинг янги истиқболли яримўтказгич, шу жумладан тензометрик материал эканлигидан далолат бермоқда. Бироқ, киритилган турли хил киришмаларнинг ушбу материалларда кечадиган электрофизикавий ва фотоэлектрик жараёнларга, айниқса улар асосидаги қаттиқ эритмаларнинг хусусиятларига таъсирини ўрганишга оид тадқиқотлар сони камлигича қолмоқда.

Ўзбекистонда рақобатбардош янги юқори технологик ускуналарда қўллаш мумкин бўлган тензоўзгартиргичлар, детектор ва датчиклар ишлаб чиқариш мақсадида турли янги яримўтказгич материалларни излаб топиш, улар бўйича дунё даражасига мос келувчи фундаментал тадқиқотларни олиб

бориш масалаларига катта эътибор қаратилмоқда. Мамлакатимиз илм-фанининг ривожланиши ва унинг амалиётга кенг тадбиқ этилиши учун катта аҳамият касб этувчи бундай фундаментал тадқиқотларнинг муҳим йўналишлари Ўзбекистонни янада ривожлантириш бўйича 2017-2021 йиллардаги Ҳаракатлар стратегиясида[1] ўз аксини топган.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПҚ-4947-сон "Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида"ги, 2017 йил 17 февралдаги ПҚ-2789-сон "Фанлар академияси фаолиятини янада такомиллаштириш, илмий ишларни ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштириш бўйича чора тадбирлар тўғрисида" ги Қарорларида, 2017 йил 16 февралдаги ПФ-4958-сон "Олий ўқув юртидан кейинги таълим тизимини янада такомиллаштириш тўғрисида"ги Фармонида ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертацияда олиб борилган тадқиқотлар муайян даражада мос келади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги. Диссертация тадқиқоти Ўзбекистон Республикаси фан ва технологиялари ривожланишининг II. «Энергетика, энергия ва ресурс тежамкорлиги» устувор йўналиши доирасида бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Ҳозирги вақтда легирланмаган ва турли киришмалар билан легирланган йирик, нуқсонсиз $TlInSe_2$ монокристалларини ўстиришнинг самарали технологияси яратилган ҳамда жаҳоннинг йирик илмий-текшириш марказларининг етакчи олимлари, жумладан: японялик (Shinya Hosokawa, Kenji Kamimura, Hiroyuki Ikemoto, Kojiro Mimura, Kazuki Wakita), германиялик (Mooser E., Meitner H.), россиялик (Алексеев И.В., Карпович И.А., Червова А.А.), озарбайжонлик (Гусейнов Г.Д., Абдуллаев Г.Б., Мустафаева С.Н., Исмайлов М.З., Рустамов В.Д., Керимова Э.М., Годжаев Э.М.), украиналик (Данильчук С.П., Мирончук Г.Л., Мозолюк М.Ю., Божко В.В.), литвалик (Grigas J., Lazauskas V., Nelkinas V.), польшалик (Talik E., Adamiec M.), туркиялик (Salehli F., Yildirim T., Gasanly N.M.), ўзбекистонлик (Умаров С.Х., Нуритдинов И.) ва бошқа олимлар томонидан ушбу кристалларда электрофизик ва фотоэлектрик жараёнларининг кечиш қонуниятлари комплекс равишда ўрганилган.

Тадқиқотларнинг натижалари ушбу бирикмалар кўринадиган, яқин инфрақизил ҳамда рентген спектри соҳасидаги нурланишни қабул қилиш детекторларини ишлаб чиқаришда истиқболли материаллар эканлигидан далолат беради. Ушбу бирикмаларнинг кристаллари яримўтказгичли тензометрия соҳасида ҳам истиқболли эканлигини кўрсатди. Киришмалар билан легирланган кристалларнинг электрофизикавий ва фотоэлектрик хусусиятлари бўйича тадқикотлар айрим киришмалар билан легирланганда намуналарнинг сезгирлиги кескин яхшиланганини кўрсатди. Агарда

[1] 2017 йил 07 февральдаги ПФ-4947-сонли "Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича ҳаракатлар стратегияси тўғрисида" Ўзбекистон Республикаси Президентининг Фармони.

материалларнинг тензорезистив хоссалари уларнинг электрофизикавий хусусиятлари билан боғлиқ эканлигини ва бу хусусиятлар киришмаларга ўта сезгир эканлиги эътиборга олинса, яримўтказгич материалларнинг тензометрик хусусиятларини ҳам киришмалар киритиш орқали бошқариш мумкин эканлигини кутиш мумкин. Шунинг учун ҳам легирланган $TlInSe_2$ кристаллар ҳамда улар асосидаги қаттиқ эритмаларнинг тензометрик хусусиятларини ўрганиш илмий ва амалий жихатдан муҳимдир. Аммо бу йўналишда тадқиқотлар мавжуд эмас. Шунингдек $TlInSe_2$ монокристалларинг тензометрик хусусиятларига ҳарорат, оптикавий нурланиш ва даврий жадвалнинг I ва IV гуруҳ элементлари киришмаларининг таъсири етарли даражада ўрганилмаган ҳамда бу йўналишда тадқиқотлар олиб бориш ушбу синфга мансуб кристалларнинг зоналаридаги экстремумлари жойлашуви ва сатҳлар тузилиши тафсилотлари хақида бевосита маълумот берган бўлар эди.

Булардан келиб чиққан ҳолда кейинги вазифамиз ушбу кристалларнинг тензорезистив хусусиятларини турли хил киришмаларнинг (донорлик ёки акцепторлик табиатига кўра) киритилишига, ҳароратга, оптикавий нурлар таъсирига, маълум кристаллографик йўналишга боғлиқ ҳолда тизимли равишда ўрганишдан иборат.

Диссертация мавзусининг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот муассасаси илмий-тадқиқот ишлари билан боғлиқлиги. Диссертация иши Ядро физикаси институти илмий-тадқиқот ишлари режасининг ФА-Ф2-Ф065-Ф071 «Ўринбосар ва киритма қаттиқ эритмаларда термо ва радиация билан стимуллашган ҳодисалар» (2007-2011); ОТ-Ф2-23 «Кенг зонали оксид ва фторид қаттиқ жисм материалларда генерациявий ва рекомбинациявий жараёнларнинг ўзига хос хусусиятлари» (2017-2020) лойиҳалари доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади $TlInSe_2$ монокристаллари ва улар асосидаги қаттиқ эритмаларининг тензорезистив хусусиятларига турли киришмаларнинг таъсир этиш қонуниятлари ва механизмларини аниқлашдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

p-$TlInSe_2$ кристалларида фототок ва фотостимулланган тензосезгирликнинг спектрал тақсимотини тадқиқ қилиш;

$TlInSe_2$ монокристалларининг тензорезистив хусусиятларига Ag, Cu, Si, Ge, Sn ва Co киришмаларининг таъсирини тадқиқ қилиш ва ушбу таъсирлар механизмини аниқлаш;

легирланган $TlInSe_2$ кристалларининг тензорезистив хусусиятларига температуранинг таъсирини аниқлаш;

$TlInSe_2$ кристаллари асосидаги қаттиқ эритмаларда компонентлар нисбатининг тензорезистив хусусиятларига таъсирини ўрганиш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида легирланмаган ҳамда даврий жадвалнинг биринчи (Cu, Ag) ва тўртинчи (Si, Ge, Sn) гурухи элементлари киришмалари билан легирланган $TlInSe_2$ монокристаллари ҳамда $TlInSe_2$

кристаллари асосидаги мураккаб $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ ($0 \le x \le 0,5$) ва $Tl_{1-x}Cu_xInSe_2$ ($0 \le x \le 0,1$) бирикмалар олинган.

Тадқиқотнинг предмети бўлиб легирланмаган ва турли киришмалар билан легирланган $TlInSe_2$ кристаллари ва унинг асосидаги $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ ($0 \le x \le 0,5$) ва $Tl_{1-x}Cu_xInSe_2$ ($0 \le x \le 0,1$) мураккаб бирикмаларнинг тензорезистив хусусиятлари ҳисобланади.

Тадқиқотнинг усуллари. Тажрибаларнинг қуйидаги стандарт услублари қўлланилди: солиштирма электр қаршилигини зондли ва контактсиз ўлчаш усуллари, заряд ташувчиларнинг концентрацияси ва ҳаракатчанлигини ўлчаш, яримўтказгичларда донор ва акцепторлар концентрациясини алоҳида-алоҳида ўлчаш услублари, заряд ташувчиларнинг яшаш даврини ўлчаш услублари, оптикавий тадқиқот услублари.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

$TlInSe_2$ кристалларида зоналараро билвосита электрон ўтишлар бевосита электрон ўтишларга нисбатан нафақат кичик энергиялар соҳасида, балки спектрнинг юқори энергиялар соҳада ҳам мавжуд эканлиги кўрсатилган;

мусбат ва манфий деформацияланганда $TlInSe_2$ кристалларининг турли воҳаларидаги электрон ўтишлар билан боғлиқ фотостимулланган тензосезгирлик коэффициентининг спектрал тақсимоти максимумлари қайта тақсимланиши сабабли кристаллардаги тензорезистивлик кўп воҳали механизм билан боғлиқ эканлиги кўрсатилган (деформация жараёнида воҳалар энергетик ҳолатларининг ўзгариши туфайли зарядлар бир воҳадан бошқасига оқиб ўтиши аниқланган);

даврий системанинг I ва IV гуруҳ элементлари киришмалари киритилишида киришма сатҳларнинг пайдо бўлиши, шунингдек $300 \le T \le 410K$ ораликдаги ҳарорат таъсирида термоионизацияси ҳисобига заряд ташувчилар концентрациясининг ортиши туфайли $TlInSe_2$ кристалларида [001] йўналишда тензосезгирлик коэффициенти кўплаб марта (1,1 дан ~24 мартагача) ортиши аниқланган;

илк марта кобальтнинг $0 \le x \le 0,5$ концентрацияси оралиғида $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ системаси бирикмаларининг, шунингдек миснинг $0 \le x \le 0,1$ концентрацияси оралиғида $Tl_{1-x}Cu_xInSe_2$ системаси бирикмаларининг тензорезистивлик хусусиятлари ҳамда тензосезгирликнинг температурага боғлиқлиги қаттиқ эритмаларнинг концентрацион мавжудлик соҳасида чизиқли концентрациявий боғланишга эгалиги ва қаттиқ эритмалар мавжудлик соҳаси чегарасидан ўтиши билан кескин ўзгариши аниқланган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

$TlInSe_2$ монокристалларининг тензорезистивлик хусусиятларига ҳароратнинг ва даврий система I ва IV гуруҳ элементлари киришмаларининг таъсир этиш қонуниятлари аниқланган, бу эса кристалларнинг тензометрик хусусиятларини мақсадли бошқариш имкониятини берган;

легирланган $TlInSe_2$ кристалларининг сезгир тензорезистив яримўтказгич материал сифатида истиқболли эканлиги аниқланган, уларнинг тензорезистив хусусиятлари кўп минг марталаб деформацион ($\varepsilon = 0,57 \cdot 10^{-3}$

нисбий деформацияда) ва термик ($300 \leq T \leq 410K$ ҳарорат оралиғида) таъсирлар натижасида ҳам стабил кўрсатгичларга эга бўлиб қолиши туфайли улар асосида турли мақсадларда қўлланиладиган юқори сезгирликдаги тензодатчикларни ишлаб чиқариш мумкин бўлади.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги бир-бирини тўлдирувчи физикавий тажриба методларининг қўлланганлиги, натижаларнинг назарий таҳлил этилиши, олинган натижаларнинг бир-бирига, адабиётларда келтирилган маълумотларга ва умумфизикавий қарашларга мос келиши билан асосланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.

Натижаларнинг илмий аҳамияти $TlInSe_2$ яримўтказгич ҳамда у асосида олинган қаттиқ эритмалар ҳақидаги фундаментал илмий тасаввурларнинг кенгайтиришида ҳамда [001] йўналишида бир ўқ бўйлаб сиқиш ва чўзиш жараёнида $TlInSe_2$ монокристалларининг тензорезестив хусусиятларига ҳарорат ва легирловчи киришмалар сифатида киритиладиган даврий системанинг I ва IV гуруҳ элементлари концентрациялари таъсир этиш қонуниятларининг аниқланишидадир.

Натижаларнинг амалий аҳамияти $TlInSe_2$ кристалларини даврий системанинг I ва IV гуруҳ элементлари билан легирлаш орқали олинадиган, турли мақсадларда қўлланилиши мумкин бўлган, тензосезгирлиги мавжудларидан юқори бўлган тензодатчиклар яратиш имкониятини берувчи яримўтказгич бирикмалар синфининг аниқланишидан иборат.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. $TlInSe_2$ монокристаллари ва улар асосидаги қаттиқ эритмаларнинг тензорезистивлик хусусиятларига турли киришмаларнинг таъсир этиш қонуниятлари ва механизмларини аниқлаш асосида:

мусбат ва манфий деформацияланган $TlInSe_2$ кристаллардаги тензорезистивлик кўп воҳали механизм билан боғлиқлиги ЁФ-2-13 рақамли “Кремнийли структураларни электрофизик хусусиятларига титан кичик гуруҳи кириндиларининг таъсиридаги эффектлар” (2016-2017) фундаментал лойиҳада кремнийли яримўтказгич структураларда нуқсонлар ҳосил бўлиши механизмларини аниқлашдада фойдаланилган (Олий ва ўрта махсус таълим вазирлигининг 2019 йил 11 апрелдаги 89-03-1378-сон маълумотномаси). Илмий натижаларининг қўлланилиши титан кичик гуруҳидаги киришмалар билан легирланган кремнийли структураларда тензорезистив ҳодисаларни ўрганиш ва тензосезгирлик коэффициентини аниқлаш даражасини оширишга имкон берган.

$TlInSe_2$ кристалларида ва унинг асосидаги $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ ($0 \leq x \leq 0,5$) ва $Tl_{1-x}Cu_xInSe_2$ ($0 \leq x \leq 0,1$) қаттиқ эритмаларда киришмалар концентрацияси ва ҳароратнинг ошиши, шунингдек, фотосезгирлик соҳасида ёритилиш туфайли термик ва фотоионизация натижасида заряд ташувчилар концентрациясининг ортиши ҳисобига тензосезгирлик коэффициентининг кўп марта ошиши, шунингдек тензорезистив эффектнинг кўпвоҳали механизми ФА-А3-002 рақамли «Оғирликни ўлчовчи қурилмалар учун яримўтказгичли тензодатчик

ишлаб чиқиш» лойиҳасида ярим ўтказгичли тензометриянинг ҳозирги замон ҳолати ва ривожланиш тенденцияларини баён этишда ва тадқиқот вазифаларини шакллантиришда фойдаланилган (Ўзбекистон Республикаси Фанлар академиясининг 2019 йил 26 мартдаги 2/1255-918-сон маълумотномаси). Илмий натижаларининг қўлланилиши яримўтказгич қўшимчали плёнкали тензодатчикларга чизиқли узатиш характеристикасини беришни асослаш имкониятини яратган;

I ва IV гуруҳ элементлари киришмалари билан легирланган $TlInSe_2$ монокристалларида хусусий ютилиш соҳасида ёритиш ва $300 \leq T \leq 410K$ оралиқда ҳароратнинг таъсирида легирлаш туфайли киришма сатҳларнинг пайдо бўлиши ҳамда уларнинг термик ва фотоионизациялануви натижасида заряд ташувчилар концентрациясининг ортиши ҳисобига [001] йўналишда тензосезгирлик коэффициентининг кўп марта ошиши етакчи хорижий илмий журналларда (Journal of Materials Science: Materials in Electronics Volume 24 Number 9, pp. 3555-3563, 2013; Scientific Bulletin of Volyn National University, Vol. 1, Series: Solid state physics, 16, pp.19-24, 2012; Physical Chemistry Chemical Physics, 15, pp.6965, 2013) қалайнинг x=0÷0,25 концентрациясида $Tl_{1-x}In_{1-x}Sn_xSe_2$ қаттиқ эритмаларнинг фотоэлектрик хусусиятларини ва электрон структурасини аниқлаш мақсадида фойдаланилган. Илмий натижаларининг қўлланилиши ўрганилган намуналарда концентрациянинг ортиши ва температуранинг кўтарилиши билан фотоўтказувчанликнинг ошишини тушунтирувчи фотоактив марказлар қайта зарядланиш моделини ишлаб чиқиш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Тадқиқот натижалари 4 та халқаро ва 7 та республика илмий-амалий анжуманларида муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мавзуси доирасида жами 18 та илмий иш нашр қилинган, жумладан 6 та мақола Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда, 4 та мақола хорижий журналларда нашр этилган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация таркиби кириш, беш боб, хулоса ва фойдаланилган адабиётлар рўйхатидан иборат. Диссертациянинг умумий ҳажми 111 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати асосланган, бу йўналишдаги тадқиқотларнинг ҳозирги ахволи баён этилган, муаммонинг ўрганилганлик даражаси аниқланган, тадқиқотнинг Республикадаги фан ва технологиялар ривожланишининг асосий устивор йўналишларига боғлиқлиги кўрсатилган, тадқиқотнинг мақсад ва вазифалари шакллантирилган, олинган натижаларнинг илмий янгилиги ва амалий аҳамияти аниқланган, уларнинг ишочлилиги ва назарий ҳамда амалий

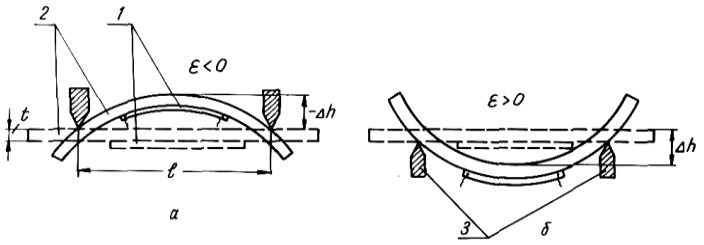
моҳияти асослаб берилган, тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши, апробацияси, нашр этилгани хақида ва диссертациянинг тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг **“$TlInSe_2$ кристаллари ва улар асосидаги қаттиқ эритмаларнинг физик-кимиёвий хусусиятлари”** деб номланган биринчи бобида $TlInSe_2$ бирикмасининг кристалл ва электрон структураси ҳамда ушбу бирикмалардаги кимёвий боғланиш хусусиятлари хақидаги маълумотлар келтирилган. $TlInSe_2$ бирикмасининг физикавий хусусиятлари хақида адабиётлардаги маълумотлар берилган: тадқиқ қилинаётган мураккаб яримўтказгич системаларининг ўзига хос хусусиятлари муҳокама қилинган, легирланмаган ва турли киришмалар билан легирланган $TlInSe_2$ кристаллари ва унинг асосидаги қаттиқ эритмаларнинг электрофизикавий ва тензорезистив хусусиятларини тадқиқ қилиш натижари баён қилинган. Боб якунида эса адабиётларда эълон қилинган ишлар таҳлили асосида тадқиқотнинг мақсад ва вазифалари аниқланган.

Диссертациянинг **“Тадқиқот объектлари ва ўтказилган тажрибалар методикаси”** деб номланган иккинчи боби тадқиқот объектларини олиш технологиясига, шунингдек электрофизикавий, фотоэлектрик ва тензорезистив характеристикаларни ўлчаш услуби баёнига бағишланган.

Тадқиқотлар ўтказиш учун керак бўлган йирик бир жинсли легирланмаган ва легирланган $TlInSe_2$ монокристаллари ва унинг асосидаги қаттиқ эритмалар ф-м.ф.д. С.Х. Умаров томонидан Озарбайжон миллий ФА Физика институтида Бриджмен-Стокбаргер услубида ўстирилган.

Намуналарнинг тажрибавий характеристикалари ҳароратнинг 250-573К оралиғида ўлчанган. Тензосезгирлик статик режимда ўлчанган. Кўрсатгичлари ўлчанаётган кристаллга доимий деформация ушбу мақсад учун махсус лойиҳалаштирилган қурилма ёрдамида амалга оширилган бўлиб, унинг схематик куринишида (1-расмга қаранг) келтирилган.



1 – кристалл, 2 – пўлат балка, 3 – ёнланма тиркама

1-расм. Статик режимда намунани сиқилиши (*а*) ва чўзилиши (*б*) жараёнларида нисбий деформацияни ўлчаш курилмасининг схематик кўриниши

Тензосезгирлик коэффициенти K_ε қуйидаги формула билан ҳисобланади:

$$K_\varepsilon = \frac{\Delta R_{\varepsilon,0}}{R_0 \cdot \varepsilon} \qquad (1)$$

бунда R_0 – деформацияланмаган (ε=0) намунанинг қаршилиги; R_ε – маълум даражада деформацияланган (ε≠0) намунанинг қаршилиги, $\Delta R_{\varepsilon,0}=R_\varepsilon-R_0$ қаршиликнинг абсолют ўзгариши.

Тензосезгирлик коэффициентини аниқлашда керак бўладиган нисбий деформация қиймати ε қуйидаги формула билан аниқланади:

$$\varepsilon = \frac{4t}{\ell^2} \cdot \Delta h \qquad (2)$$

бунда t – пўлат балканинг қалинлиги;

ℓ - ёнланма таянч тиркамалар орасидаги масофа;

Δh - намуна ўрта қисмининг эгилиш жараёнидаги силжиш масофаси.

Эритмадаги ўрин олувчи киришмалар концентрацияси $Tl_{1-x}A_xInSe_2$ ва $TlIn_{1-x}B_xSe_2$ формулалар бўйича ҳисоблаш асосида киритилган, бунда A=Ag, Cu; B= Si, Ge, Sn, Co.

Ўрганилган намуналарнинг биз томонимиздан аниқланган айрим электрофизикавий хусусиятлари 1-жадвалда келтирилган.

1-жадвал

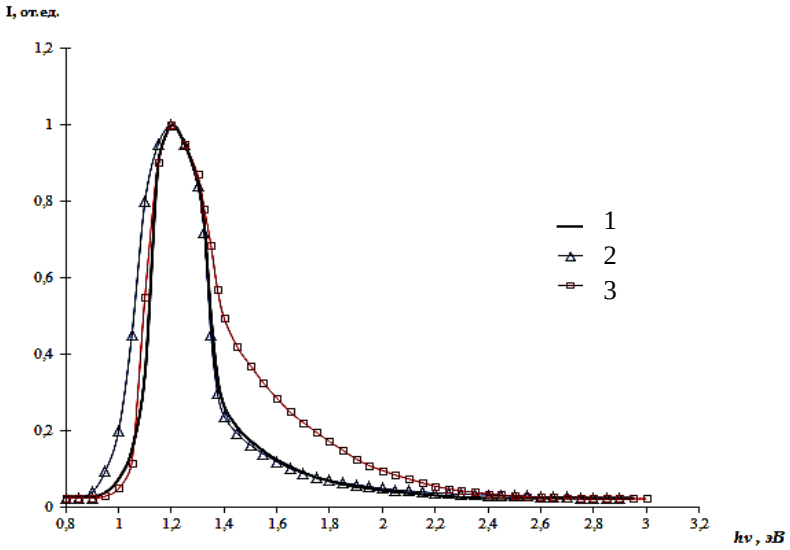
Ўрганилган $Tl_{1-x}A_xInSe_2$ ва $Tl_{1-x}B_xInSe_2$ намуналарининг электрофизикавий параметрлари (A=Ag, Cu; B= Si, Ge, Sn, Co)

Тензодатчик кристалли таркиби	Намуна ўлчови, мм^3	Номинал қаршилик, Ом	Солиштирма қаршилик, Ом·см
p-$TlInSe_2$	0.13×0.25×10.5	6×10^{10}	$2{,}13\times10^{7}$
p-$Tl_{0,99}Ag_{0,01}InSe_2$	0.12×0.18×9	$5{,}2\times10^{8}$	$1{,}4\times10^{5}$
$Tl_{0,99}Cu_{0,01}InSe_2$	0,13×0,23×9,8	$4{,}49\times10^{10}$	$1{,}37\times10^{7}$
$Tl_{0,98}Cu_{0,02}InSe_2$	0,16×0,24×7,9	$1{,}32\times10^{10}$	$6{,}4\times10^{6}$
$Tl_{0,97}Cu_{0,03}InSe_2$	0,19×0,26×8,5	$4{,}3\times10^{9}$	$2{,}5\times10^{6}$
$Tl_{0,95}Cu_{0,05}InSe_2$	0,14×0,24×6	$2{,}86\times10^{9}$	$1{,}6\times10^{6}$
$Tl_{0,90}Cu_{0,1}InSe_2$	0,14×0,23×6,5	$2{,}64\times10^{9}$	$1{,}31\times10^{6}$
p-$TlIn_{0,99}Si_{0,01}Se_2$	0.10×0.18×7	$2{,}2\times10^{7}$	$0{,}4\times10^{4}$
p-$TlIn_{0,99}Ge_{0,01}Se_2$	0.12×0.22×10.5	$1{,}4\times10^{9}$	$5{,}0\times10^{5}$
n-$TlIn_{0,99}Sn_{0,01}Se_2$	0.13×0.20×10.5	$1{,}2\times10^{9}$	$4{,}8\times10^{5}$
$TlIn_{0,99}Co_{0,01}Se_2$	0,8×1,5×6	$1{,}65\cdot10^{8}$	$3{,}3\cdot10^{6}$
$TlIn_{0,98}Co_{0,02}Se_2$	0,6×1,5×6	$3{,}4\cdot10^{7}$	$5{,}1\cdot10^{5}$
$TlIn_{0,97}Co_{0,03}Se_2$	0,8×1,2×6	$3{,}0\cdot10^{7}$	$4{,}8\cdot10^{5}$
$TlIn_{0,95}Co_{0,05}Se_2$	0,6×1,5×6	$3{,}1\cdot10^{7}$	$4{,}6\cdot10^{5}$
$TlIn_{0,9}Co_{0,1}Se_2$	0,8×1,5×6	$2{,}0\cdot10^{7}$	$4{,}0\cdot10^{5}$
$TlIn_{0,7}Co_{0,3}Se_2$	0,6×1,5×6	$1{,}2\cdot10^{7}$	$1{,}94\cdot10^{5}$
$TlIn_{0,5}Co_{0,5}Se_2$	0,8×1,2×6	$1{,}75\cdot10^{5}$	$0{,}28\cdot10^{4}$

Диссертациянинг “**Легирланмаган $TlInSe_2$ кристалларида деформациянинг фототок спектри тақсимотига, люкс – ампер хусусиятларига ва фотостимулланган тензоэффектларга таъсири**” деб номланган учинчи бобида деформациянинг легирланмаган $TlInSe_2$

кристаллардаги фототокнинг спектри тақсимотига, кристалларнинг люкс – ампер хусусиятларига ва фотостимулланган тензоэффектларига таъсирини тадқиқ этиш натижалари келтирилган.

Илгари Гусейнов ва ҳаммуаллифлари[2] томонидан дефомацияланган p-$TlInSe_2$ кристалларида солиштирма электр қаршилиги ва фотоўтказувчанликнинг спектрал тақсимоти ўрганилиб, унда ушбу кристалнинг электрон структураси кўпвоҳали эканлиги ҳақидаги тахмин олға сурилган эди. Биз ушбу кристаллар учун тензорезистив ҳодисанинг кўпвоҳали механизми ўринли эканлигини текшириш учун деформацияланмаган, [001] кристаллографик йўналишда мусбат ва манфий деформацияланган ҳолдаги кристалларда 0,8÷3,2 эВ спектрал соҳада I_c фототокнинг ва K_ε тензосезгирлик коэффициентининг спектрал тақсимотларини тадқиқ қилдик. Бу тадқиқот натижалари фототокнинг абсолют қиймати мусбат деформацияланган намуналарда деформацияланмаган намуналарга нисбатан ортиши, манфий деформацияланган намуналарга нисбатан эса камайишини кўрсатди. Айни пайтда фототокнинг максимуми ўзгармасдан 1,20 эВ қийматда қолади, бу эса турли хил деформацияланган $TlInSe_2$ кристалларида бевосита (тўғридан-тўғри) оптик ўтишлар энергияси ўзгармай қолишидан далолат беради (2 - расмга қаранг).



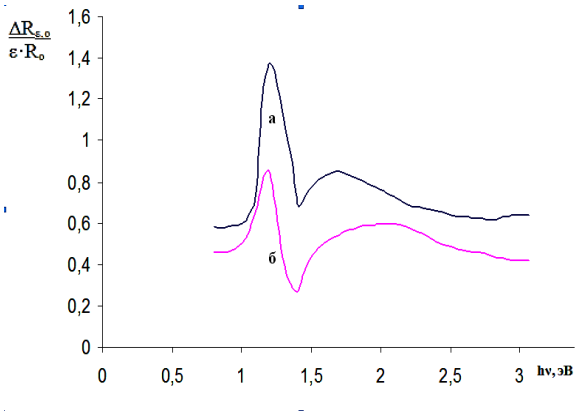
2-расм. Деформацияланмаган (1), мусбат деформацияланган (2) ва манфий деформацияланган (3) p-$TlInSe_2$ кристалларидаги фототок спектрлари тақсимоти

2-расмдан, олдинги муаллифлар олган натижаларидан фарқли равишда, деформация жараёнида фототок спектрал тақсимотининг ўзгаришлари нафақат фототок максимумига нисбатан узун тўлқинлир соҳасида, балки қисқа тўлқинлар соҳасида ҳам содир бўлиши кўриниб турибди. Бу натижа $TlInSe_2$ кристалларида билвосита (тўғридан-тўри бўлмаган) ўтишлар фототок

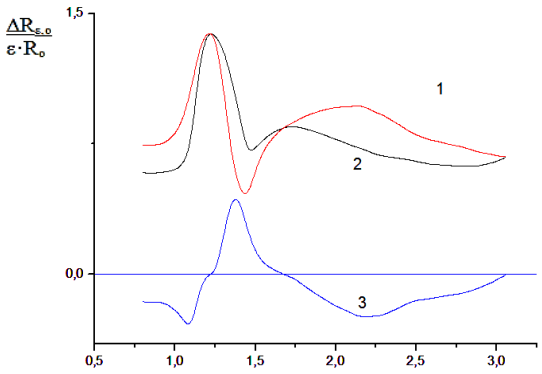
[2] *Guseinov G.D., Abdullayev A.G., Ismailov M.Z., Rustamov V.D.* The piesoresistive effect in the p-$TlInSe_2$ single crystals // Materials Research Bulletin. – Elsevier, 1977. – Vol.12, No1. –P.115-118.

максимумига нисбатан спектрнинг нафақат паст энергиялар соҳасида, балки юқори энергиялар сохасида ҳам мавжуд эканлигидан далолат беради.

3-расмда турлича деформацияланган кристалларда 0,8÷3,2 эВ спектрал соҳадаги ёруғлик нури таъсирида фотостимуллаштирилган тензосезгирлик коэффициентининг спектрал тақсимотлари келтирилган бўлиб, унда [001] йўналиш бўйича мусбат деформацияланган кристаллдаги тақсимотида 1,20 эВ да энг интенсив чўққи ва 1,6-1,70 эВ соҳада нисбатан камроқ интенсивликдаги чўққи кузатилади. Тақсимот спектридаги интенсив чўққининг максимуми кристаллдаги фототокнинг максимумига мос келади. (3,а-расмга қаранг). Кристалл манфий деформацияланганда фотостимуллаштирилган тензосезгирлик коэффициентининг 1,20 эВ даги интенсив чўққиси максимумининг энергетик қиймати ўзгармай қолади, аммо унинг интенсивлиги бир оз камаяди ҳамда максимуми 2,10 эВ да бўлган янги чўққи пайдо бўлади (3, б - расмга қаранг).



3-расм. Мусбат (а) ва манфий (б) деформацияланган p-$TlInSe_2$ кристалларидаги фотостимуллаштирилган тензосезгирликнинг спектрал тақсимотлари



4-расм. Мусбат (1) ва манфий (2) деформацияланган p-$TlInSe_2$ кристалларидаги нормаллаштирилган фотостимуллаштирилган тензосезгирлигининг спектрал тақсимотлари ҳамда 1 ва 2 спектрлар айирмаси (3)

Биз томонимиздан деформацияланган $TlInSe_2$ намуналарни турли тўлқин узунликларига эга бўлган ёруғлик нурлари билан ёритиш орқали аниқланган фотостимуллаштирилган тензосезгирликнинг спектрал тақсимотларидаги энергетик максимум ва минимумлар Григас ва ҳаммуаллифлари[3] томонидан $TlInSe_2$ кристалларидаги рентген фотоэлектронларининг спектрларини ўрганиш орқали тажрибаларда аниқланган ҳамда Хартри-Фокнинг чекланмаган методидан фойдаланган ҳолда назарий ҳисоблаб чиқилган зоналараро ўтишларнинг энергетик қийматларига мос келади (2-жадвалга қаранг).

[3] *Grigas J., Talik E., Adamiec M., Lazauskas V., Nelkinas V.* XPS and electronic structure of $TlInSe_2$ crystals // Lithuanian Journal of Physics. – Riga, 2007. – Vol. 47, No 1. –P. 87-95.

2-жадвал

$TlIn_4Se_{16}$ кластерида назарий ҳисобланган ва $TlInSe_2$ кристалларида тажрибаларда аниқланган сатҳдан сатҳга электрон ўтишлар

$TlIn_4Se_{16}$ кластерида назарий ҳисобланган, эВ	-	1,2	1,4	1,8	2,1	2,3	2,5	2,9
$TlInSe_2$ кристаллида тажрибада аниқланган, эВ	1,08	1,2	1,43	1,7	2,13	2,3	2,5	2,8

Агар фотостимуллаштирилган тензосезгирликнинг 1,20 эВ даги максимуми бевосита ўтишлар билан боғлиқ эканлиги инобатга олинса, $TlInSe_2$ кристалларида тажрибаларда кузатилган қолган барча фотостимуллаштирилган тензосезгирлик максимумлари Бриллюэн зонасининг турли нуқталаридан билвосита электрон ўтишлар билан боғлиқ, деган хулосага келиш мумкин.

Айтиб ўтилган ўзгаришлар мусбат ва манфий деформацияланган кристаллардаги фотостимуллаштирилган тензосезгирлик коэффициентлари таксимотларининг нормаллаштирилгандан кейинги айирмасида янада яққол намоён бўлади (4-расмга қаранг). Расмдан кўринадики, кристаллар манфий деформацияланганда (сиқилиш деформациясида) фотостимуллаштирилган тензосезгирлик коэффициенти тақсимотида 1,4 эВ энергиядаги электрон ўтишларнинг ҳиссаси устунлик қилади, бироқ бошқа барча ўтишлар соҳаларида тензосезгирлик коэффициентиниг улуши анчагина камаяди. Бундан фарқли равишда, кристалл мусбат деформацияланганда (чўзилиш деформациясида) 1,4 эВ энергиядаги ўтишларнинг улуши энг кам бўлиб, барча бошқа ўтишларда тензосезгирлик ҳиссаси сезиларли ортади. Бундан келиб чиқиб $TlInSe_2$ кристалларининг тензосезгирлик механизми ҳақиқатдан ҳам деформация таъсирида воҳаларнинг энергетик ҳолатлари ўзгариши натижасида зарядларнинг бир воҳадан бошқасига оқиб ўтиши билан боғлиқ деган деб хулоса қилдик.

Диссертациянинг **“$TlInSe_2$ кристалларининг фотоэлектрик ва тензорезистивлик хусусиятларига I ҳамда IV гуруҳ киришмаларининг таъсири”** деб номланган тўртинчи бобида $TlInSe_2$ монокристалларининг тензорезистивлик хусусиятларига даврий системанинг I ва IV гуруҳи элементларининг таъсири ўрганилган.

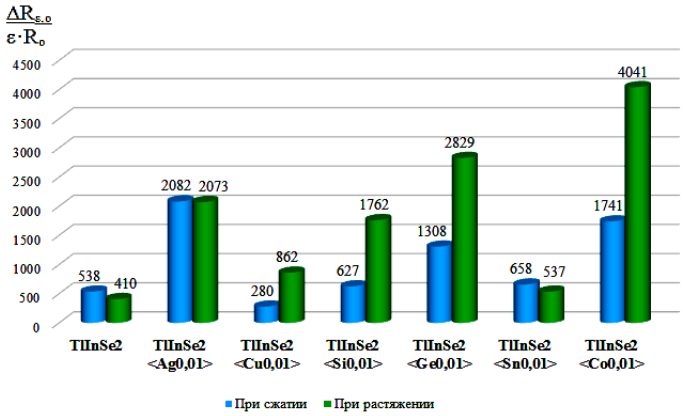
$TlInSe_2$ монокристалларига I ва IV гурух элементлари киришмаларининг киртилиши [001] кристаллографик ўқи бўйлаб хона хароратида сиқилиш деформациясида ҳам, чўзилиш деформациясида ҳам легирланмаган намуналарга нисбатан тензосезгирлик коэффициентининг ортишига олиб келади (3-жадвалга ва 5-расмга қаранг). I гурух элементлари киришмалари билан легирланган намуналарда энг кучли ўзгариш Ag киришмаси билан легирланган кристалларда аниқланди: сиқилиш деформациясида

тензосезгирлик коэффициенти деярли 4 марта, чўзилиш деформациясида эса қарийб 5 марта ортади. Тахминимизча, бу ҳолат легирлаш туфайли киришма сатҳлари пайдо бўлиши, кристалл ҳосил қилувчи ва ўринбосар киришма элементлари атомлари ўлчамларининг фарқи ҳамда уларнинг электроманфийлиги билан боғлиқдир. Масалан, $TlInSe_2$ кристалларини кумуш ёки мис киришмалари билан легирлаганда кристалл панжарада ушбу элементлар атомлари бир валентли таллий атомлари ўрнини эгаллайди. Полинг шкаласи бўйича таллий атомининг электроманфийлиги 1,45 га, кумуш ва мис атомлари электроманфийликлари мос равишда 0,58 ва 0,69 га тенг. Электроманфийлик қийматининг камайиши туфайли атомларнинг қўшни атомлар электронларини тортиб олиш қобилияти камаяди ва бу бир хил температурада легирланган намуналарда легирланмаган намуналарга нисбатан ток ташувчилар ионлашиш энергиясининг камайишига ҳамда зоналарда улар миқдорининг ортишига олиб келади.

3-жадвал

300К ҳароратда [001] ўқи бўйлаб $\varepsilon=0.57\times10^{-3}$ нисбий деформацияланган $Tl_{1-x}A_xInSe_2$ ва $Tl_{1-x}B_xInSe_2$ (A=Ag, Cu; B= Si, Ge, Sn, Co) кристалларининг тензосезгирлик коэффициентлари *K*

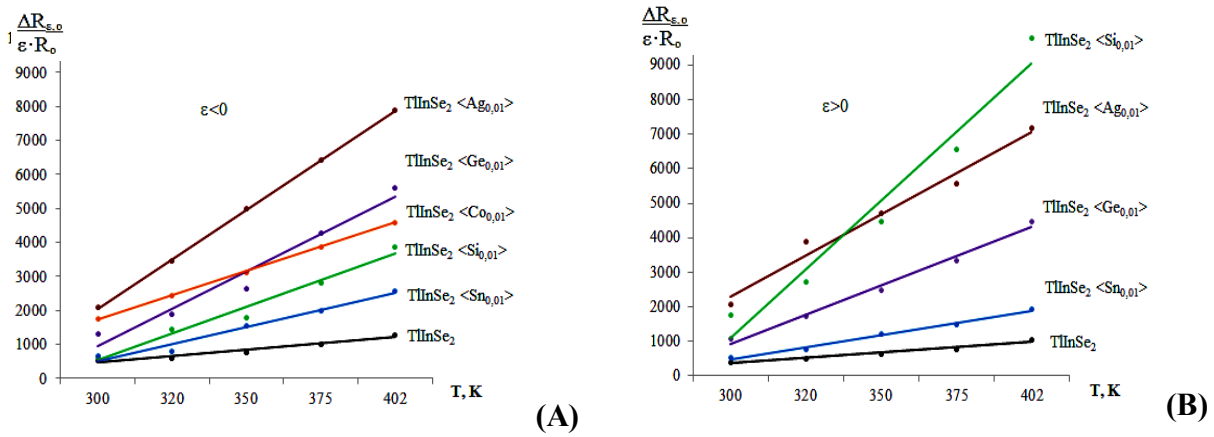
Тензодатчик кристалли таркиби	K_ε, сиқилиш деформациясида	K_ε, чўзилиш деформациясида
$TlInSe_2$	538	410
$Tl_{0,99}Ag_{0,01}InSe_2$	2082	2073
$Tl_{0,99}Cu_{0,01}InSe_2$	280	862
$TlIn_{0,99}Si_{0,01}Se_2$	627	1762
$TlIn_{0,99}Ge_{0,01}Se_2$	1308	2829
$TlIn_{0,99}Sn_{0,01}Se_2$	658	537
$TlIn_{0,99}Co_{0,01}Se_2$	1741	4041



5-расм. $Tl_{1-x}A_xInSe_2$ ва $Tl_{1-x}B_xInSe_2$ кристалларининг [001] ўқи бўйлаб $\varepsilon=0.57\times10^{-3}$ нисбий деформацияда ва T = 300К температурада тензосезгирлик коэффициенти K_ε

Легирланмаган $TlInSe_2$ кристалларида температура ортиши билан тензосезгирлик коэффициенти чизиқли ўсади. Легирланган кристалларда ҳарорат ортиши билан тензосезгирлик коэффициенти янада кучлироқ ортади (6-расмга қаранг), бу эса термодатчиклар сезгирлигини кучайтириш

имкониятини беради. Масалан, чўзилиш деформациясида кремний киришмалари билан легирланган намуналарда ушбу кўрсатгичнинг қиймати 410К ҳароратда легирланмаган намунанинг хона ҳароратидаги қийматига нисбатан деярли 24 марта, сиқилиш деформациясида эса кумуш киришмалари билан легирланган намуналарда 14 марта ортиши кузатилди.



6-расм. Легирланмаган ва легирланган $TlInSe_2$ кристалларининг сиқиш (А) ва чўзиш деформацияларида (В) тензосезгирлик коэффициентининг температурага боғлиқлиги

Тензосезгирликнинг ҳароратга боғлиқ равишда ўзгариши тензосезгирликнинг температуравий коэффициенти G_T билан тавсифланади ва у қуйидаги формула бўйича:

$$G_T = \frac{\Delta K \ / K_0}{\Delta T} \cdot 100\% \qquad (3)$$

ўртача ҳарорат эса қуйидаги формула орқали ҳисобланди:

$$T_{ўр} = 300 + \frac{1}{2}\Delta T \qquad (4)$$

бунда ΔK — ҳарорат ΔT га ўзгаргандаги тензосезгирлик коэффициентининг ўзгариши, K_0 — 300К даги бошланғич тензосезгирлик коэффициенти.

Легирланмаган $TlInSe_2$ кристалларида тензосезгирликнинг температуравий коэффициенти G_T=0,13÷0,15 %/градус атрофида ўзгаради, легирланган кристалларда эса у киришма турига боғлиқ ҳолда намунадан намунага анчагина ўзгаради ва ўлчанаётган температура интервалига сезиларли даражада боғлиқ (4-жадвалга қаранг).

Кумуш киришмалари билан легирланган кристалларда G_T нинг ўзгариши сиқиш деформациясидагига нисбатан камроқ содир бўлади, бу эса термодатчиклардан термостатик шароитда фойдаланганда юқори аниқликка эришишни таъминлайди.

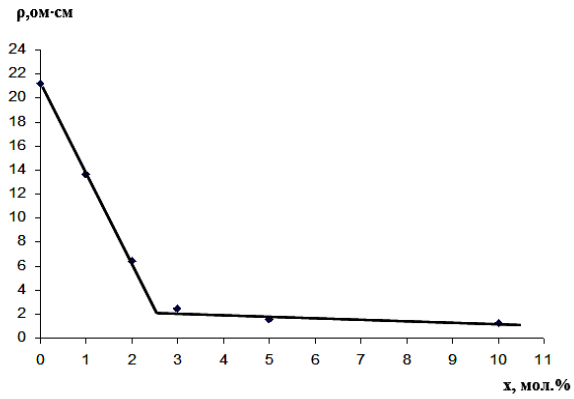
4-жадвал

Легирланмаган ва киришмалар билан легирланган $TlInSe_2$ кристалларининг 300 дан 410К гача температура интервалида ва ε = 0,57·10^{-3} нисбий деформациядаги тензосезгирликнинг температуравий коэффициенти

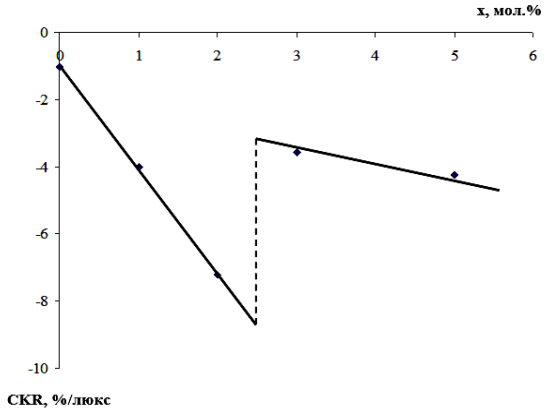
$T_{ўр}$, К	Тензосезгирликнинг температуравий коэффициенти, G_T (%/град.)				
	Таркиб				
	p-$TlInSe_2$	$TlInSe_2$<$Si_{0,01}$>	$TlInSe_2$<$Ge_{0,01}$>	$TlInSe_2$<$Ag_{0,01}$>	n-$TlInSe_2$<$Sn_{0,01}$>
Сиқиш деформациясида (ε<0)					
312,5	0,513	3,323	1,743	2,672	0,875
325,0	0,847	3,681	2,040	2,781	2,732
337,5	1,137	4,646	3,037	2,785	2,672
351,0	1,376	5,047	3,211	2,730	2,849
Чўзиш деформациясида (ε>0)					
312,5	0,995	2,184	2,445	3,521	1,646
325,0	1,151	3,092	2,610	2,560	2,484
337,5	1,216	3,621	2,834	2,237	2,403
351,0	1,518	4,459	3,116	2,421	2,563

Диссертациянинг **“$TlInSe_2$ асосидаги қаттиқ эритмаларнинг тензорезистив хусусиятлари”** деб номланган бешинчи бобида киришмалар концентрациясининг электрофизикавий ва тензорезистивлик хусусиятларига таъсирини $Tl_{1-x}A_xInSe_2$ кристалл системасида мис киришмаси мисолида концентрациянинг x=0÷0,1 оралиғида ҳамда $TlIn_{1-x}B_xSe_2$ кристаллар системасида кобальт киришмаси мисолида концентрациянинг x=0÷0,5 оралиғида ўрганиш натижалари келтирилган.

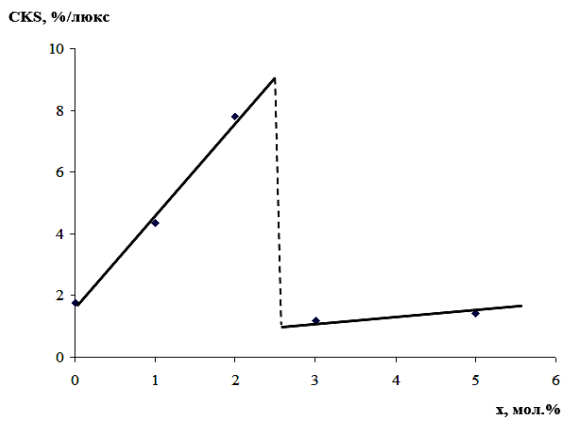
7-расмдан кўринадики, $Tl_{1-x}Cu_xInSe_2$ кристаллар системасининг ρ солиштирма қаршилиги мис концентрацияси x нинг x=0÷0,025 ва x=0,025÷0,1 оралиқларида чизиқли камайиб боради ва бу тўғри чизиқлар миснинг x=0,025 концентрациясида ўзига хос синиш ҳосил қилади. Миснинг айнан шу x=0,025 концентрациясида ёруғлик қаршилиги ва ёруғлик сезгирлиги коэффициентларида ҳам сакраш кузатилади (8 ва 9-расмларга қаранг). Сиқилиш ва чўзилиш деформацияларида тензосезгирлик коэффициенти K нинг концентрацияга боғлиқлиги графикларида ҳам синиш ёки сакраш айнан миснинг x= 0,025 концентрациясида кузатилди (10-расмга қаранг).



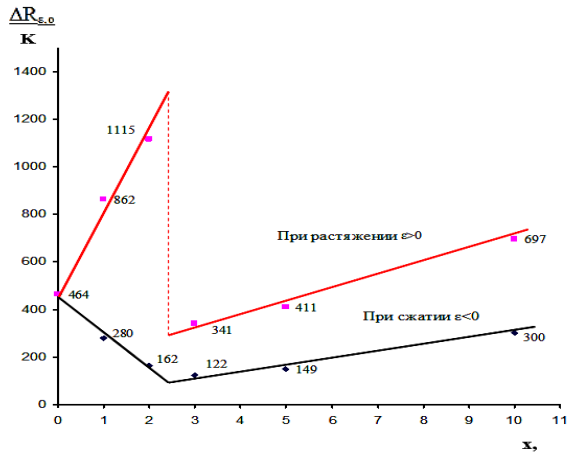
7-расм. $Tl_{1-x}Cu_xInSe_2$ қотишмалари солиштирма қаршилиги ρ нинг Cu концентрациясига боғлиқлиги



8-расм. $Tl_{1-x}Cu_xInSe_2$ кристаллари ёруғлик қаршилиги коэффициентининг Cu концентрациясига боғлиқлиги



9-расм. $Tl_{1-x}Cu_xInSe_2$ кристаллари ёруғлик сезгирлиги коэффициентининг Cu концентрациясига боғлиқлиги



10-расм. $Tl_{1-x}Cu_xInSe_2$ қотишмалари [001] ўқи йўналишидаги тензосезгирлик коэффициентининг Cu концентрациясига боғлиқлиги

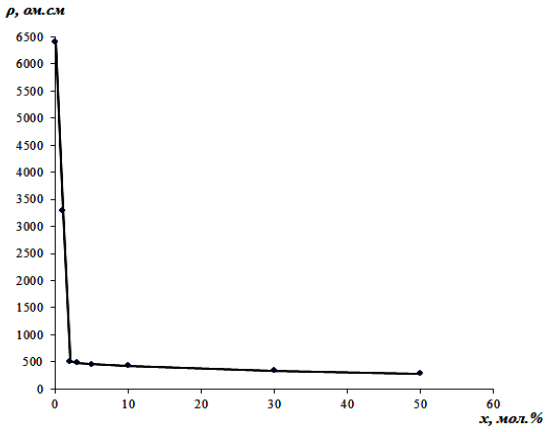
Юқорида келтирилган натижаларнинг барчаси шуни кўрсатадики, қаттиқ эритмалар мавжудлиги соҳасида $Tl_{1-x}Cu_xInSe_2$ системасининг кўпгина хусусиятлари, жумладан номинал ва солиштирма қаршилик, ёруғлик каршилиги коэффициенти, ёруғликка сезгирлик коэффициенти ва тензосезгирлик коэффициентлари ўзгармас температураларда чизиқли концентрацион боғлиқликка эга бўлиб, қаттиқ эритмалар мавжудлиги чегарасидан ўтганда эса кескин ўзгаришлар рўй беради. Бу натижалар $TlInSe_2$-$CuInSe_2$ системаси физикавий хусусиятлари механизми қаттиқ эритмаларнинг мавжудлик соҳаси ва икки фазали соҳа чегарасида тубдан фарқланишини кўрсатади. Бунинг сабаби, қаттиқ эритма соҳасида киришманинг киритилиши кристалл структураси параметрининг локал ўзгаришига олиб келади ва бу қаттиқ эритма электрофизикавий хусусиятларининг кескин ўзгаришига сабаб бўлади, икки фазали соҳада эса икки мустақил фазаларнинг ўз структураларини сақлаган ҳолда турли нисбатларда аралашуви содир бўлади ва шунинг учун қотишмаларнинг турли хусусиятларида кичик концентрацион ўзгаришлар рўй беради.

Таъкидлаш керакки, биз тажрибаларда аниқлаган натижалар илгари[4] $TlInSe_2$-$CuInSe_2$ системаларини ўрганишда олинган натижаларига мос келади. Бу тадқиқотларда дифференциал-термик ва рентгенфазавий таҳлил асосида ушбу системаларда хона хароратида $TlInSe_2$ томонидан 2,5 мол.% концентрация оралиғида ва $CuInSe_2$ томонидан 1,5 мол.% концентрация оралиғида чекланган қаттиқ эритмалар ҳосил бўлиши, ҳамда x =0,025÷0,985 интервалда эса қотишма икки фазали, яъни $TlInSe_2$ ва $CuInSe_2$ кристаллари қотишмасидан иборат бўлиши аниқланган.

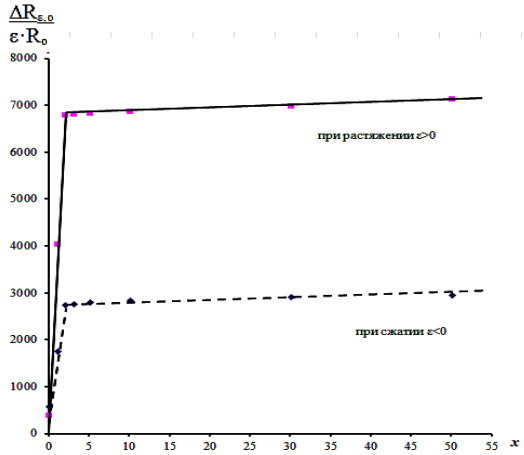
11-расмда келтирилган кобальт концентрациясининг x=0÷0,5 оралиқда $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ системасининг электрофизикавий хусусиятларини ўлчаш

[4] *Георгобеани А.Н., Матиев А.Х., Хамхоев Б.М., Евлоев А.М.* Фазовые равновесия в системах $TlInSe_2$-$CuInSe_2$ и $TlInSe_2$-$AgInSe_2$. // Известия РАН, Неорганические материалы. – Москва, 2005– Т.41, №5 – С.281-285.

натижалари кўрсатилган бўлиб, ундан кўринадики, солиштирма қаршилик ρ x=0÷0,02 ва 0,02÷0,5 оралиқларида кобальтнинг x=0,02 концентрациясида ўзига хос синиш ҳосил қилган ҳолда чизиқли камаяди. Тензосезгирлик коэффициенти K_ε нинг концентрациядан боғлиқлигида ҳам сиқилиш ва чўзилиш деформацияларида кобальтнинг x=0,02 концентрациясида синиш ҳосил қилган ҳолда чизиқли ўсиш кузатилди (12-расмга қаранг).



11-расм. $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ қотишмалари солиштирма қаршилиги ρ нинг Co концентрациясига боғлиқлиги

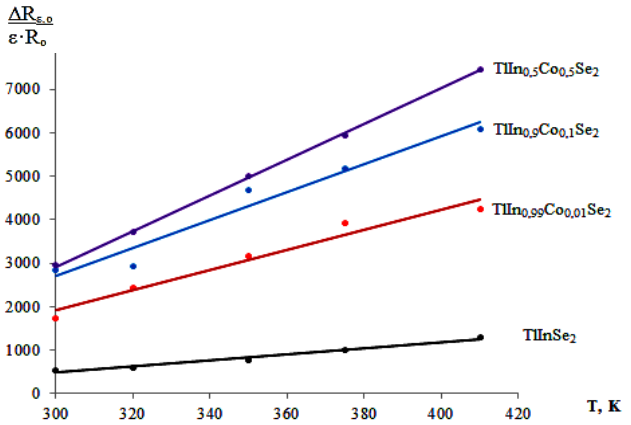


12-расм. $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ қотишмаларининг [001] ўқи йўналишидаги тензосезгирлик коэффициентининг Co концентрациясига боғлиқлиги

Тахминимизча, $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ системасида ҳам, худди $Tl_{1-x}Cu_xInSe_2$ системасидаги каби, x=0÷0,02 концентрацион интервалда чекланган қаттиқ эритмалар ҳосил бўлади, x=0,02÷0,5 интервалда эса қотишма икки фазали бўлади. Қаттиқ эритма мавжудлик чегарасидан икки фазалик чегарасига ўтишда қотишмаларнинг физикавий хусусиятлари кескин ва синиш хосил қилган ҳолда ўзгаради, бу эса юқорида санаб ўтилган жараёнларнинг механизмлари ушбу соҳада бутунлай фарқланишидан далолат беради ҳамда уларни аниқлаш махсус қўшимча тадқиқотларни талаб қилишини кўрсатади.

Шуни ҳам таъкидлаш керакки, барча $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ қаттиқ эритмаларнинг ўрганилган намуналарда Co концентрациясининг ортиши билан тензосезгирлик коэффициенти [001] йўналишда сиқилиш ва чўзилиш деформацияларида ҳам ортиб борди.

Қаттиқ эритмалар температурасининг тензосезгирлик коэффициентига таъсирини 300K≤T≤410K температура оралиғида ўрганиш натижалари шуни кўрсатдики, $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ қаттиқ эритмалари намуналарининг биз томонимиздан ўрганилган барча таркибларида температуранинг кўтарилиши билан уларнинг деформацияга сезгирлиги сезиларли ортди (13-расм ва 5-жадвалга қаранг). Бу эса $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ асосидаги тензорезисторлардан термостатик шароитларида фойдаланиш юқори даражадаги аниқликка эришиш имкониятини беришини кўрсатади.



13-расм. Сиқилиш деформациясида $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ кристаллари тензосезгирлик коэффициентининг таркиб ва температурага боғлиқлиги

5-жадвал

Сиқилиш деформациясида $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ кристалларидаги тензосезгирлиги температуравий коэффициентининг таркибга боғлиқлиги

№	$T_{ўр}$, К	$TlInSe_2$	$TlIn_{0,99}Co_{0,01}Se_2$	$TlIn_{0,9}Co_{0,1}Se_2$	$TlIn_{0,5}Co_{0,5}Se_2$
1.	310	0,078	2,01	1,43	0,86
2.	325	0,052	1,64	1,41	1,39
3.	337,5	0,034	1,67	1,10	1,34
4.	355	0,052	1,31	1,04	1,39

Шундай қилиб, кобальт концентрациясининг $0 \le x \le 0,5$ оралиғида $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ системасининг тензорезистив хусусиятларини ўрганиш, ҳамда $300 \le T \le 410$К температура оралиғида тензосезгирликниг температуравий боғлиқлигини ўрганиш натижалари уларнинг яримўтказгич тензометрияда фойдаланиш учун эффектив материал сифатида истиқболли эканлигини намоён қилди.

ХУЛОСА

“$TlInSe_2$ монокристалларининг ва улар асосидаги қаттиқ эритмаларнинг тензорезистив хусусиятлари” мавзусидаги фалсафа доктори (PhD) диссертация ишининг натижаларидан келиб чиққан ҳолда қуйидаги хулосалар тақдим этилади:

1. $TlInSe_2$ кристалларини [001] йўналишида бир ўқ бўйича сиқилиш деформациясида кристалларнинг таъқиқланган зонаси кенглиги ошади, чўзилиш деформациясида эса – камаяди. Бунда фототокнинг абсолют қиймати чўзилиш деформацияларида ортади, сиқилиш деформацияларида эса - камаяди. Фототок спектрал тақсимотининг ўзгариши фототок максимумига нисбатан спектрнинг нафақат ўзун тўлқинлар соҳасида, балки қисқа тўлқинлар соҳасида ҳам ўзгариши кузатилади, бу эса $TlInSe_2$ кристалларида зоналараро билвосита ўтишлар бевосита ўтишларга нисбатан

нафақат кичик энергиялар соҳасида, балки спектрнинг юқори энергиялар соҳада ҳам мавжуд эканлигидан далолат беради.

2. p-$TlInSe_2$ кристалларидаги тензорезистив ҳодисанинг механизми кристалл электрон зоналарининг кўпвоҳали характерга боғлиқ бўлиб, деформация таъсирида воҳаларнинг ҳолатлари ўзгариши оқибатида зарядларнинг бир воҳадан бошқасига оқиб ўтиши туфайли содир бўлади.

3. $TlInSe_2$ монокристалларига I ва IV гуруҳ киришмаларининг киритилиши [001] кристаллографик ўқи бўйлаб тензосезгирлик коэффициентининг сезиларли ортишига олиб келади.

4. Температуранинг ошиши билан легирланмаган кристалларнинг деформацияга сезгирлиги ортади ва бунда тензосезгирлик коэффициенти чизиқли ўсади.

5. I ва IV гуруҳ киришмалари билан легирланган $TlInSe_2$ кристалларида температура ошиши билан тензосезгирлик коэффициенти сезиларли даражада ортиши аниқланди, бу эса ҳароратни кўтариш орқали тензодатчиклар сезгирлигини ошириш имконини беради.

6. $Tl_{1-x}Cu_xInSe_2$ системасида кристалларнинг солиштирма қаршилиги ва тензосезгирлик коэффициентлари қаттиқ эритмалар ҳосил бўлиш соҳасида (концентрацияларнинг x=0÷0,025 оралиғида) концентрация билан чизиқли боғланишга эга бўлиб, бу чегарадан ўтиши билан кристалларнинг ушбу хусусиятлари концентрацияга боғлиқлигининг характери тубдан ўзгаради.

7. Кобальт концентрацияларининг x=0÷0,5 оралиғида $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ системасида бирикмалар ташкил этувчи компонентлари нисбати ўзгаришининг солиштирма қаршилик ва тензосезгирлик коэффициентига таъсирини ўрганиш орқали, ушбу хоссалар x=0÷0,02 оралиқда концентрация билан чизиқли боғланишга эга эканлиги, 0,02÷0,5 оралиқда эса уларнинг кескин ўзгариши аниқланди.

8. $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ системаси кристалларида кобальт концентрацияларнинг $0 \leq x \leq 0,5$ оралиғида тензорезистив хусусиятларини, шунингдек ҳароратнинг $300 \leq T \leq 410$K оралиғида термосезгирликнинг температурадан боғлиқлигини ўрганиш натижалари бу кристалларнинг яримўтказгич тензометрияси учун истиқболли материаллар эканлигини кўрсатди.

НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.27.06.2017.FM/T.33.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ИНСТИТУТЕ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ, АСТРОНОМИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ, НАЦИОНАЛЬНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ УЗБЕКИСТАНА

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

АШУРОВ ЖАСУР ДЖУРАЕВИЧ

ТЕНЗОРЕЗИСТИВНЫЕ СВОЙСТВА МОНОКРИСТАЛЛОВ $TlInSe_2$ И ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ НА ЕГО ОСНОВЕ

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD) ПО ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИМ НАУКАМ

Ташкент – 2019

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за номером B2018.2.PhD/FM248.

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 «Ziyonet» (www.ziyonet.uz).

Научный руководитель:	**Нуритдинов Иззатилло** доктор физико-математических наук, профессор
Официальные оппоненты:	**Хидиров Ирсали** доктор физико-математических наук, профессор
	Турсунов Икромжон Гуламжонович доктор физико-математических наук
Ведущая организация:	**Андижанский государственный университет**

Защита диссертации состоится «____» _____ 2019 года в ____ часов на заседании Научного совета DSc.27.06.2017.FM/T.33.01 при Институте ядерной физики, Астрономическом институте, Национальном университете Узбекистана (Адрес: 100174, г. Ташкент, пос. Улугбек, ИЯФ. Тел.: (+99871) 289-31-41; факс: (+99871)289-36-65; e-mail: info@inp.uz).

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

Автореферат диссертации разослан «____» _____ 2019 г.
(протокол рассылки № _____ от _____ 2019 г.).

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

Э.М. Турсунов
ученый секретарь научного совета по присуждению
ученых степеней, д.ф.-м.н.
старший научный сотрудник

С.Н. Нуритдинов
заместитель председателя 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 исследователи и практики уделяют большое внимание изучению различных полупроводниковых преобразователей, в том числе тензопреобразователей, основным преимуществом которых является высокая чувствительность и малогабаритность. Однако требования современной науки и техники неуклонно растут, что обусловливает поиск материалов, обладающих разнообразными свойствами, соответствующими этим требованиям. Следовательно, в настоящее время наряду с усовершенствованием свойств имеющихся материалов поиск новых полупроводниковых материалов, в том числе тройных и более сложных соединений и их твердых растворов, и исследование их разнообразных характеристик являются одними из важнейших задач современной физики конденсированного состояния.

Изучение взаимосвязей состава, структуры и свойств новых многокомпонентных полупроводниковых соединений, помимо углубления фундаментальных научных представлений о полупроводниках, открывает и новые практические перспективы: в большинстве случаев новые соединения проявляют особые качества и тем самым способствуют разрешению возникающих важных технических задач. Познание закономерностей взаимозависимостей свойств, состава и структуры предоставляет возможность разрабатывать научные основы поиска и создания новых, наиболее эффективных полупроводниковых материалов с предопределенными свойствами и позволяет удовлетворять нарастающие требования современной оптической, полупроводниковой и квантовой микроэлектроники. Особую ценность представляет создание новых полупроводниковых материалов, если удается получить их в виде совершенных крупных монокристаллов. Среди многокомпонентных полупроводниковых соединений типа $A^{III}B^{III}C_2^{VI}$ особый интерес представляют полупроводниковые соединения $TlInSe_2$, закономерности многих физических явлений в которых не получили достаточного освещения в специальной литературе. Проведенные учеными различных научных центров мира исследования электрических, термоэлектрических, тепловых и фотоэлектрических свойств нелегированных кристаллов $TlInSe_2$ свидетельствуют об их перспективности как нового эффективного полупроводникового, в том числе тензометрического материала. Однако исследования по изучению влияния различных примесей на электрофизические и фотоэлектрические процессы в данном материале, особенно исследования о свойствах твердых растворов на его основе, малочисленны.

В Узбекистане уделяется огромное внимание поиску различных новых полупроводниковых материалов для изготовления различных тензопреобразователей, детекторов и датчиков и проведению на их основе фундаментальных исследований, соответствующих мировому уровню, с

целью их применения в конкурентоспособном новейшем высокотехнологичном оборудовании. Направления этих фундаментальных исследований, имеющих большое значение для развития науки нашей страны и её широкого практического применения, отражены в Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017–2021 гг.[1]

Исследования, проведенные в данной диссертационной работе, в определенной мере соответствуют задачам, обозначенным в Указах Президента Республики Узбекистан № УП-4947 от 7 февраля 2017 года «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017–2021 гг.», № УП-4958 от 16 февраля 2017 года «О дальнейшем совершенствовании системы послевузовского образования», в Постановлении Президента Республики Узбекистан № ПП-2789 от 17 февраля 2017 года «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности», 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 Узбекистан II. «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение».

Степень изученности проблемы. На сегодняшний день разработана эффективная технология выращивания крупных, совершенных, чистых и легированных различными примесями монокристаллов $TlInSe_2$ и комплексно исследованы закономерности протекания электрофизических и фотоэлектрических процессов в этих кристаллах ведущими учеными научно-исследовательских центров мира, в том числе японскими (Shinya Hosokawa, Kenji Kamimura, Hiroyuki Ikemoto, Kojiro Mimura, Kazuki Wakita), немецкими (E. Mooser, H. Meitner), российскими (Георгобиани А.Н., Матиев А.Х., Алексеев И.В., Карпович И.А., Чернова А.А.), азербайджанскими (Гусейнов Г.Д., Абдуллаев Г.Б., Мустафаева С.Н., Исмайлов М.З., Рустамов В.Д., Керимова Э.М., Годжаев Э.М.), украинскими (Данильчук С.П., Мирончук Г.Л., Мозолюк М.Ю., Божко В.В.), литовскими (Grigas J., Lazauskas V., Nelkinas V.), польскими (Talik E., Adamiec M.), турецкими (Salehli F., Yildirim T., Gasanly N.M.), узбекскими (Умаров С.Х., Нуритдинов И.) и другими.

В результате этих исследований показано, что эти соединения являются перспективными материалами для разработки на их основе приемников излучения для видимого, ближнего ИК-, а также рентгеновского диапазона спектра. Кристаллы данного соединения открывают перспективное поле деятельности также в области полупроводниковой тензометрии. Исследования электрофизических и фотоэлектрических характеристик легированных примесями кристаллов показали, что их чувствительность

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

резко улучшается при введении некоторых примесей. Если учесть, что тензорезистивные свойства материалов непосредственно связаны с электрофизическими свойствами и они очень чувствительны к наличию примесей, можно ожидать, что с введением примесей можно управлять и тензометрическими характеристиками полупроводниковых материалов. Поэтому научный и практический интерес представляет изучение тензометрических свойств легированных кристаллов $TlInSe_2$, а также твердых растворов на основе $TlInSe_2$. Однако исследования в этом направлении отсутствуют.

Также не в достаточной степени изучено влияние температуры, оптической подсветки и примесей элементов I и IV групп периодической системы на тензорезистивные свойства монокристаллов $TlInSe_2$. Исследования в этом направлении могли бы дать прямую информацию о расположении экстремумов и деталей зонного строения кристаллов этого класса, а также расширить область их применения. Исходя из этого, дальнейшая наша задача заключалась в проведении систематических исследований тензорезистивных особенностей данных кристаллов в зависимости от вводимых примесей различного рода (с донорной и акцепторной природой), температуры, оптической подсветки, степени деформации в соответствующих кристаллографических направлениях и т.д.

Связь темы диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнялась в рамках научно-исследовательских проектов Института ядерной физики АН РУз по темам: ФА-Ф2-Ф065-Ф071 «Термо- и радиационно-стимулированные явления в твердых растворах замещения и внедрения» (2007–2011); ОТ-Ф2-23 «Особенности генерационных и рекомбинационных процессов в широкозонных оксидных и фторидных твердотельных материалах» (2017–2020).

Целью исследования является установление закономерностей и механизмов влияния различных примесей на тензорезистивные характеристики монокристаллов $TlInSe_2$, а также в твердых растворах на его основе.

Задачи исследования:

исследовать спектральные распределения фототока и фотостимулированной тензочувствительности в кристаллах p-$TlInSe_2$;

исследовать влияние примесей Ag, Cu, Si, Ge, Sn и Co на тензорезистивные свойства монокристаллов $TlInSe_2$ и установить механизмы этих влияний;

определить влияние температуры на тензорезистивные свойства в легированных кристаллах $TlInSe_2$;

изучить влияние соотношения компонент на электрофизические и тензорезистивные характеристики твердых растворов на основе кристаллов $TlInSe_2$.

Объектами исследования являются нелегированные и легированные примесями из элементов первой (Cu, Ag) и четвертой (Si, Ge, Sn) групп периодической системы монокристаллы $TlInSe_2$, а также сложные соединения $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ ($0 \le x \le 0,5$) и $Tl_{1-x}Cu_xInSe_2$ ($0 \le x \le 0,1$) на основе кристаллов $TlInSe_2$.

Предметом исследования являются тензорезистивные характеристики монокристаллов $TlInSe_2$ и сложные соединения $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ ($0 \le x \le 0,5$) и $Tl_{1-x}Cu_xInSe_2$ ($0 \le x \le 0,1$) на их основе.

Методы исследования. Использовались стандартные экспериментальные методы исследования: зондовые и бесконтактные методы измерения удельной электрической проводимости, измерение концентрации и подвижности носителей заряда, методы раздельного определения концентрации доноров и акцепторов в полупроводниках, методы измерения времени жизни носителей заряда, оптические методы исследования.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

показано наличие непрямых зонных электронных переходов в кристаллах $TlInSe_2$ не только в низкоэнергетической по сравнению с прямым зонным переходом, но и в высокоэнергетической области спектра;

экспериментально установлено, что при положительных и отрицательных деформациях максимумы спектрального распределения коэффициента фотостимулированной тензочувствительности кристаллов $TlInSe_2$, обусловленные электронными переходами из различных долин, перераспределяются, что указывает на многодолинность механизма тензорезистивного явления (при деформации заряды перетекают из одной долины в другую из-за изменения энергетических положений долин);

выявлено многократное (от 1,1 до ~24 раз) увеличение коэффициента тензочувствительности монокристаллов $TlInSe_2$ в направлении [001] в результате образования примесных уровней при введении примесей элементов I и IV групп периодической системы, а также увеличение концентрации носителей в результате термоионизации носителей под влиянием температуры в интервале $300 \le T \le 410K$;

впервые определено, что в области существования твердых растворов соединений системы $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ в интервале концентрации кобальта ($0 \le x \le 0,5$) и соединений $Tl_{1-x}Cu_xInSe_2$ в интервале концентраций меди ($0 \le x \le 0,1$) тензорезистивные характеристики, а также температурные зависимости тензочувствительности имеют линейные концентрационные зависимости, которые резко изменяются при переходе границы области существования твердых растворов.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

определены закономерности влияния температуры и легирующих примесей I и IV групп периодической системы на тензорезистивные свойства монокристаллов $TlInSe_2$, которые позволяют целенаправленно управлять тензометрическими характеристиками кристаллов;

выявлена перспективность применения легированных кристаллов $TlInSe_2$ в качестве чувствительного тензорезистивного полупроводникового

материала, показана стабильность их тензорезистивных характеристик при циклическом деформационном (при относительной деформации $\varepsilon=0{,}57\cdot10^{-3}$) и тысячекратном термическом воздействии (в интервале $300\leq T\leq410K$), что способствует разработке на их основе высокочувствительных тензодатчиков различного назначения.

Достоверность полученных результатов обосновывается применением комплекса дополняющих друг друга методов физического эксперимента, проведением теоретического анализа, хорошей воспроизводимостью результатов, а также согласованностью полученных данных с существующими литературными данными и общефизическими представлениями.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов заключается в углублении фундаментальных научных представлений о полупроводниках $TlInSe_2$ и твердых растворах на его основе, в установлении закономерностей влияния температуры и концентрации легирующих примесей элементов I и IV групп периодической системы на тензорезистивные свойства монокристаллов $TlInSe_2$ при одноосном сжатии и растяжении вдоль направления [001].

Практическое значение результатов заключается в выявлении класса полупроводниковых соединений, получаемых путем легирования кристаллов $TlInSe_2$ примесями элементов I и IV групп периодической системы, которые могут найти применение в различных целях и позволяют разработать усовершенствованные тензодатчики, имеющие более высокий коэффициент тензочувствительности по сравнению с существующими.

Внедрение результатов исследования. На основе полученных результатов по исследованию тензорезистивных свойств монокристаллов $TlInSe_2$ и твердых растворов на его основе:

установление многодолинного механизма тензорезистивности в положительно и отрицательно деформированных кристаллах $TlInSe_2$, было использовано в рамках фундаментального проекта ЁФ-2-13 «Влияние примесей подгруппы титана на электрофизические свойства кремниевых структур» (2016–2017) (Справка Министерства высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан № 89-03-1378 от 11 апреля 2019 г.). Многодолинный механизм тензорезистивного явления в данном проекте был использован при изучении тензорезистивного явления в легированных примесями титановой подгруппе кремниевых структур, что позволило повысить степень точности определения коэффициента тензочувствительности;

явление многократного усиления коэффициента тензочувствительности с повышением концентрации примеси и температуры, а также при подсветке в области фоточувствительности в кристаллах $TlInSe_2$ и в твердых растворах на его основе $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ ($0\leq x\leq0{,}5$) и $Tl_{1-x}Cu_xInSe_2$ ($0\leq x\leq0{,}1$), обусловленное значительным увеличением концентрации носителей в результате термо- и фотоионизации, а также предложенный многодолинный механизм

тензорезистивного эффекта использованы при описании современного состояния и тенденций развития полупроводниковой тензометрии и для формулировки постановки задачи исследования в рамках научного проекта ФА-А3-002 «Разработка полупроводникового тензодатчика для весоизмерительных устройств» (2017–2018) (Справка о внедрении Академии наук Республики Узбекистан № 2/1255-918 от 26 марта 2019 года). Использование этих результатов позволило обосновать возможность придания плёночным тензодатчикам с полупроводниковыми добавками линейную передаточную характеристику;

выявленное многократное увеличение коэффициента тензочувствительности монокристаллов $TlInSe_2$ вдоль направлении [001] при легировании примесями из элементов I и IV групп периодической системы с подсветкой в области собственного поглощения и при температуре в интервале ($300 \leq T \leq 410K$), обусловленное значительным увеличением концентрации носителей в результате появляющихся примесных уровней при легировании, а также фото- и термоионизации носителей было использовано зарубежными учеными в ходе исследований фотоэлектрических свойств и электронной структуры твердых растворов $Tl_{1-x}In_{1-x}Sn_xSe_2$ при концентрациях олова $x=0 \div 0,25$ (Journal of Materials Science: Materials in Electronics Volume 24 Number 9, pp. 3555-3563, 2013; Scientific Bulletin of Volyn National University, Vol. 1, Series: Solid state physics, 16, pp.19-24, 2012; Physical Chemistry Chemical Physics, 15, pp.6965, 2013). Применение этих результатов позволило разработать модель перезарядки фотоактивных центров для объяснения увеличения фотопроводимости с увеличением концентрации и при повышении температуры в исследованных образцах.

Апробация результатов исследования. Результаты исследования докладывались и обсуждались на 4 международных и 7 республиканских научно-практических конференциях.

Публикация результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 18 научных работ, 6 научных статей в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, из них 4 статьи в зарубежных научных журналах.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы. Объем диссертации составляет 111 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, изложено современное состояние исследований в этом направлении, определена степень изученности проблемы, показана связь исследований с основными приоритетными направлениями развития науки и технологий в республике, сформулированы цели и задачи исследования,

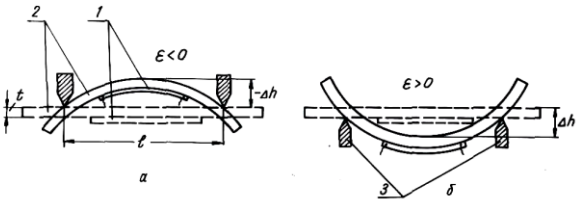
изложены научная новизна и практические результаты исследования, обоснована достоверность полученных результатов и раскрыта их теоретическая и практическая значимость, приведены сведения о внедрениях, апробации, опубликованности полученных результатов исследования, а также о структуре диссертации.

В первой главе диссертации **«Физико-химические свойства кристаллов $TlInSe_2$ и твердых растворов на его основе»** приводятся сведения о кристаллической и зонной структуре и характере химической связи кристаллов $TlInSe_2$. Излагается литературный материал о физических свойствах соединений $TlInSe_2$: обсуждаются особенности исследуемых сложных полупроводниковых систем, описываются результаты исследований электрофизических и тензорезистивных свойств нелегированных и легированных различными примесями кристаллов $TlInSe_2$ и твердых растворов на его основе. В конце главы на основе анализа литературных данных определены цель и задачи исследования.

Вторая глава диссертации **«Объекты исследования и методика проведенных экспериментов»** посвящена технологии получения объектов исследования, а также методике измерения электрофизических, фотоэлектрических характеристик и тензорезистивных свойств исследуемых материалов.

Необходимые для исследования крупные однородные нелегированные и легированные монокристаллы $TlInSe_2$, а также твердые растворы на их основе были выращены д.ф-м.н. С.Х. Умаровым в Институте физики НАН Азербайджана усовершенствованным методом Бриджмена–Стокбаргера.

Экспериментальные характеристики образцов измерялись в температурном интервале 250–573 К. Тензочувствительность измерялась в статическом режиме. Постоянная деформация передавалась измеряемому кристаллу при помощи сконструированного для этой цели специального устройства, схематический вид которого приводится ниже (смотрите Рисунок 1).



1 – кристалл, 2 – стальная балка, 3 – боковые опоры.

Рис. 1. Схематический вид устройства для измерения относительной деформации образца в статическом режиме при сжатии (*а*) и растяжении (*б*)

Коэффициент тензочувствительности K_ε вычислялся по формуле:

$$K_\varepsilon = \frac{\Delta R_{\varepsilon,0}}{R_0 \cdot \varepsilon} \qquad (1)$$

где R_0 – сопротивление недеформированного (ε=0) образца;
R_ε – сопротивление образца при заданной деформации ($\varepsilon \neq 0$);
$\Delta R_{\varepsilon,0}=R_\varepsilon-R_0$ абсолютное изменение сопротивления..

Значение относительной деформации ε, необходимое для вычисления коэффициента тензочувствительности K_ε, определялось по формуле:

$$\varepsilon = \frac{4t}{\ell^2} \cdot \Delta h \qquad (2)$$

где t – тольшина стальной балки;
ℓ - расстояние между боковыми опорами;
Δh - перемещение средней части образца при изгибе.

Примеси вводили в расплав из расчета концентрации замещающего элемента по формулам $Tl_{1-x}A_xInSe_2$ и $TlIn_{1-x}B_xSe_2$, где A=Ag, Cu; B= Si, Ge, Sn, Co.

Некоторые электрофизические характеристики исследованных образцов, определенные нами, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Электрофизические параметры исследованных образцов $Tl_{1-x}A_xInSe_2$ и $Tl_{1-x}B_xInSe_2$ (A=Ag, Cu; B= Si, Ge, Sn, Co)

Состав кристалла тензодатчика	Размер образцов, мм^3	Номинальное сопротивление, Ом	Удельное сопротивление, Ом·см
p-$TlInSe_2$	0.13×0.25×10.5	6×10^{10}	$2{,}13\times10^{7}$
p-$Tl_{0,99}Ag_{0,01}InSe_2$	0.12×0.18×9	$5{,}2\times10^{8}$	$1{,}4\times10^{5}$
$Tl_{0,99}Cu_{0,01}InSe_2$	0,13×0,23×9,8	$4{,}49\times10^{10}$	$1{,}37\times10^{7}$
$Tl_{0,98}Cu_{0,02}InSe_2$	0,16×0,24×7,9	$1{,}32\times10^{10}$	$6{,}4\times10^{6}$
$Tl_{0,97}Cu_{0,03}InSe_2$	0,19×0,26×8,5	$4{,}3\times10^{9}$	$2{,}5\times10^{6}$
$Tl_{0,95}Cu_{0,05}InSe_2$	0,14×0,24×6	$2{,}86\times10^{9}$	$1{,}6\times10^{6}$
$Tl_{0,90}Cu_{0,1}InSe_2$	0,14×0,23×6,5	$2{,}64\times10^{9}$	$1{,}31\times10^{6}$
p-$TlIn_{0,99}Si_{0,01}Se_2$	0.10×0.18×7	$2{,}2\times10^{7}$	$0{,}4\times10^{4}$
p-$TlIn_{0,99}Ge_{0,01}Se_2$	0.12×0.22×10.5	$1{,}4\times10^{9}$	$5{,}0\times10^{5}$
n-$TlIn_{0,99}Sn_{0,01}Se_2$	0.13×0.20×10.5	$1{,}2\times10^{9}$	$4{,}8\times10^{5}$
$TlIn_{0,99}Co_{0,01}Se_2$	0,8×1,5×6	$1{,}65\cdot10^{8}$	$3{,}3\cdot10^{6}$
$TlIn_{0,98}Co_{0,02}Se_2$	0,6×1,5×6	$3{,}4\cdot10^{7}$	$5{,}1\cdot10^{5}$
$TlIn_{0,97}Co_{0,03}Se_2$	0,8×1,2×6	$3{,}0\cdot10^{7}$	$4{,}8\cdot10^{5}$
$TlIn_{0,95}Co_{0,05}Se_2$	0,6×1,5×6	$3{,}1\cdot10^{7}$	$4{,}6\cdot10^{5}$
$TlIn_{0,9}Co_{0,1}Se_2$	0,8×1,5×6	$2{,}0\cdot10^{7}$	$4{,}0\cdot10^{5}$
$TlIn_{0,7}Co_{0,3}Se_2$	0,6×1,5×6	$1{,}2\cdot10^{7}$	$1{,}94\cdot10^{5}$
$TlIn_{0,5}Co_{0,5}Se_2$	0,8×1,2×6	$1{,}75\cdot10^{5}$	$0{,}28\cdot10^{4}$

В третьей главе «**Влияние деформации на спектральное распределение фототока, люкс-амперные характеристики и фотостимулированные тензоэффекты в нелегированных кристаллах $TlInSe_2$**» приведены результаты исследования влияния деформации на

спектральное распределение фототока, люкс-амперные характеристики и фотостимулированные тензоэффекты в нелегированных кристаллах $TlInSe_2$.

В проведённых ранее Гусейновым и сотрудниками[2] исследованиях удельной электропроводности и спектрального распределения фотопроводимости деформированных кристаллов p-$TlInSe_2$ было выдвинуто предположение о многодолинном характере электронной структуры этих кристаллов. Для проверки применимости многодолинного механизма тензорезистивного эффекта для этих кристаллов нами были исследованы спектральные распределения фототока I_c и коэффициента тензочувствительности K_ε вдоль направления [001] в спектральной области 0,8÷3,2 эВ при недеформированном, положительно и отрицательно деформированном состояниях. Результаты этих исследований показали, что абсолютное значение фототока в положительно деформированных образцах увеличивается, а в отрицательно деформированных – уменьшается по сравнению с недеформированным образцом. При этом максимум фототока не изменяется и находится при значении 1,20 эВ, что свидетельствует о неизменности энергии прямых оптических переходов кристаллов $TlInSe_2$ при различных видах деформации (смотрите Рисунок 2).

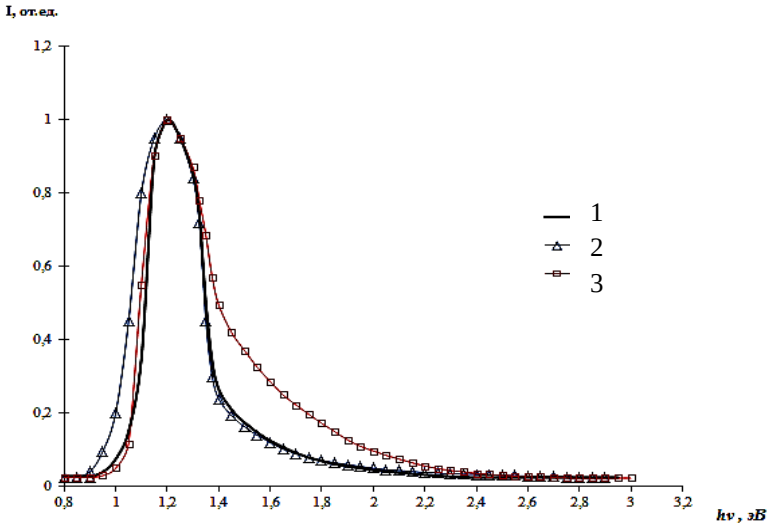


Рис.2. Спектральное распределение фототока недеформированного (1), положительно деформированного (2) и отрицательно деформированного (3) образца p-$TlInSe_2$

Из рисунка также видно, что, в отличие от результатов предыдущих авторов, при деформациях изменения спектрального распределения фототока наблюдаются не только в длинноволновой, но также и в коротковолновой по сравнению с максимумом фототока области спектра. Это свидетельствует о наличии непрямых зонных переходов в кристаллах $TlInSe_2$ не только в низкоэнергетической, но и в высокоэнергетической по сравнению с максимумом фототока области спектра.

---

[2] *Guseinov G. D., Abdullayev A.G., Ismailov M.Z., Rustamov V.D.* The Piesoresistive Effect in the p-$TlInSe_2$ SINGLE crystals // Materials Research Bulletin. – Elsevier, 1977. – Vol.12, No 1. – P. 115–118.

На рисунке 3 приведены спектральные распределения коэффициента фотостимулированной тензочувствительности деформированных различным путем кристаллов, под действием света в спектральной области 0,8÷3,2 эВ. В распределении положительно деформированного в направлении вдоль [001] кристалла наблюдается интенсивный пик с максимумом в 1,20 эВ, и сравнительно менее интенсивный пик с максимумом в областях 1,6-1,70 эВ. Максимум интенсивного пика в спектре распределения соответствует максимуму фототока кристалла (смотрите Рисунок 3, а). При отрицательной деформации кристалла значение максимума интенсивного пика фотостимулированной тензочувствительности в 1,20 эВ не изменяется, но его интенсивность несколько уменьшается и проявляется новый пик с максимумом в 2,10 эВ (смотрите Рисунок 3, б).

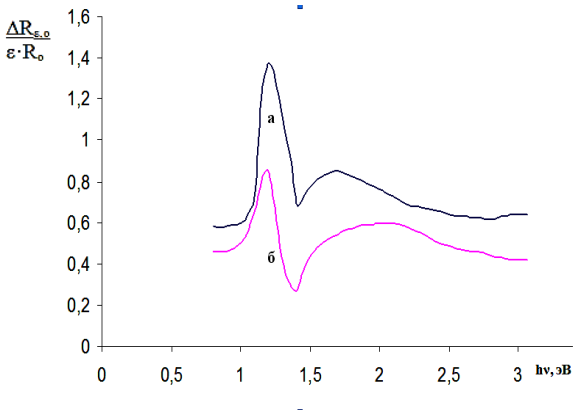


Рис 3. Спектральные распределения фотостимулированной тензочувствительности положительно (а) и отрицательно (б) деформированных кристаллов p-$TlInSe_2$

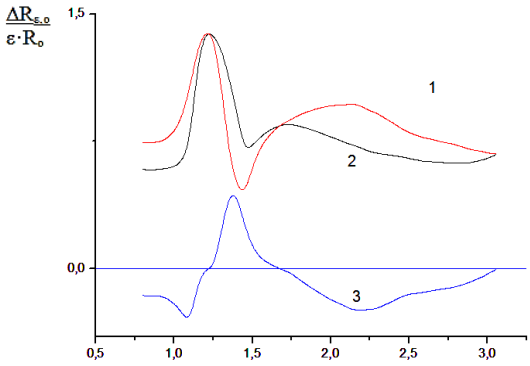


Рис.4. Нормированные спектральные распределения фотостимулированной тензочувствительности отрицательно деформированного (1), положительно деформированного (2) кристаллов $TlInSe_2$ и разность 1 и 2 (3)

Значения энергетических максимумов и минимумов спектрального распределения фотостимулированной тензочувствтельности деформированных образцов $TlInSe_2$, определенные нами посредством освещения светом различной длины волны, соответствуют значениям энергий межзонных переходов, приведенных в работе Григаса и соавторов[3], в которой экспериментально определены спектры рентгеновских фотоэлектронов и теоретически рассчитаны их энергетические уровни с использованием неограниченного метода Хартри-Фока (смотрите Таблицу 2).

[3] *Grigas J., Talik E., Adamiec M., Lazauskas V., Nelkinas V.* XPS and electronic structure of $TlInSe_2$ crystals // Lithuanian Journal of Physics. – Riga, 2007. – Vol. 47, No 1. – P. 87-95.

Таблица 2

Теоретически рассчитанные в кластере $TlIn_4Se_{16}$ и экспериментально определенные в кристаллах $TlInSe_2$ зона-зонные электронные переходы

Теоретически рассчитанные в кластере $TlIn_4Se_{16}$, эВ	-	1,2	1,4	1,8	2,1	2,3	2,5	2,9
Экспериментально определенны в кристалле $TlInSe_2$, эВ	1,08	1,2	1,43	1,7	2,13	2,3	2,5	2,8

Если учесть, что максимум фотостимулированной тензочувствительности при 1,20 эВ обусловлен прямыми межзонными переходами, то можно утверждать, что все остальные, наблюдаемые в экспериментах, максимумы фотостимулированной тензочувствителности кристаллов $TlInSe_2$ связаны непрямыми межзонными электронными переходами, обусловленными из разных точек зоны Бриллюэна.

Указанные изменения более отчетливо проявляются в разности нормированных спектральных распределений коэффициентов фотостимулированной тензочувствительности положительно и отрицательно деформированных кристаллов (смотрите Рисунок 4). Из рисунка видно, что при отрицательной деформации кристаллов (деформация сжатия) доля электронных переходов с энергией 1,4 эВ является доминирующей, однако доля тензочувствительности в области всех остальных переходов существенно снижается. В отличие от этого при положительной деформации кристаллов (деформация растяжения) доля переходов с энергией 1,4 эВ является наименьшей, а доля тензочувствительности при всех остальных переходах заметно увеличивается. Исходя из этого, нами было сделано заключение о том, что механизм тензочувствительности кристаллов $TlInSe_2$ действительно обусловлен механизмом перетекания зарядов из одной долины в другую, из-за изменения энергетических положений долин при деформации.

В четвёртой главе «**Влияние примесей I и IV групп на фотоэлектрические и тензорезистивные характеристики кристаллов $TlInSe_2$**» приводятся результаты исследования влияния примесей элементов I и IV группы периодической системы на тензорезистивные свойства монокристаллов $TlInSe_2$.

Введение примесей из элементов I и IV группы в монокристаллы $TlInSe_2$ приводит к увеличению коэффициента тензочувствительности вдоль кристаллографической оси [001] как при деформации сжатия, так и при деформации растяжения (смотрите Таблицу 3 и Рисунок 5) по сравнению с нелегированными образцами при комнатной температуре. В образцах легированных примесями из элементов I группы наиболее сильные изменения обнаружено в кристаллах, легированных примесью Ag: при

деформации сжатия коэффициент тензочувствительности увеличивается почти в 4 раза, а при деформации растяжения – более 5 раз. Предполагаем, что это связано с примесными уровнями, появляющимися при легировании, с разностью размеров атомов кристаллообразующих и замещающих элементов, а также электроотрицательностью этих атомов. Например, в кристаллической решетке кристаллов $TlInSe_2$ при легировании примесями серебра или меди, атомы этих элементов замещают одновалентный таллий в октаэдрической подрешетке. По шкале Полинга электроотрицательность атомов таллия равняется 1,45, а электроотрицательность атомов серебра и меди - 0,58 и 0,69 соответственно. В связи с уменьшением значения электроотрицательности примесных атомов их способность притягивать электроны соседних атомов уменьшается, что приводит к уменьшению при одинаковых температурах энергии ионизации и увеличению количества носителей в зонах в легированных образцах по сравнению с нелегированными.

Таблица 3

Коэффициенты тензочувствительности K_ε кристаллов $Tl_{1-x}A_xInSe_2$ и $Tl_{1-x}B_xInSe_2$ (A=Ag, Cu; B= Si, Ge, Sn, Co) при температуре 300К и относительной деформации $\varepsilon=0.57\times10^{-3}$

Состав кристалла тензодатчика	K_ε, при сжатии	K_ε, при растяжении
$TlInSe_2$	538	410
$Tl_{0,99}Ag_{0,01}InSe_2$	2082	2073
$Tl_{0,99}Cu_{0,01}InSe_2$	280	862
$TlIn_{0,99}Si_{0,01}Se_2$	627	1762
$TlIn_{0,99}Ge_{0,01}Se_2$	1308	2829
$TlIn_{0,99}Sn_{0,01}Se_2$	658	537
$TlIn_{0,99}Co_{0,01}Se_2$	1741	4041

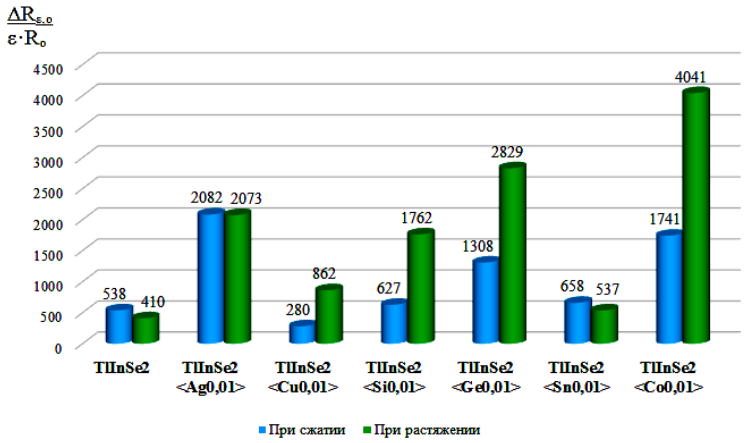


Рис. 5. Коэффициенты тензочувствительности K_ε кристаллов $Tl_{1-x}A_xInSe_2$ и $TlIn_{1-x}B_xSe_2$ (x=0.01) вдоль оси [001] при температуре T=300К

При использовании полупроводниковых тензодатчиков в условиях с переменной температуры возникает необходимость учитывать температурные зависимости сопротивления и изменения коэффициента тензочувствительности в зависимости от температуры.

В нелегированных кристаллах $TlInSe_2$ с повышением температуры коэффициент тензочувствительности растет линейно. В легированных кристаллах коэффициент тензочувствительности намного сильнее увеличивается с повышением температуры (смотрите Рисунок 6), что позволяет увеличить чувствительность термодатчиков. Например, значение этого показателя при деформациях растяжения при температуре 410К в легированных кремнием образцах относительно значению в нелегированных кристаллах при комнатной температуре увеличивается в ~24 раза, а при деформациях сжатия в легированных серебром кристаллах - в14 раз.

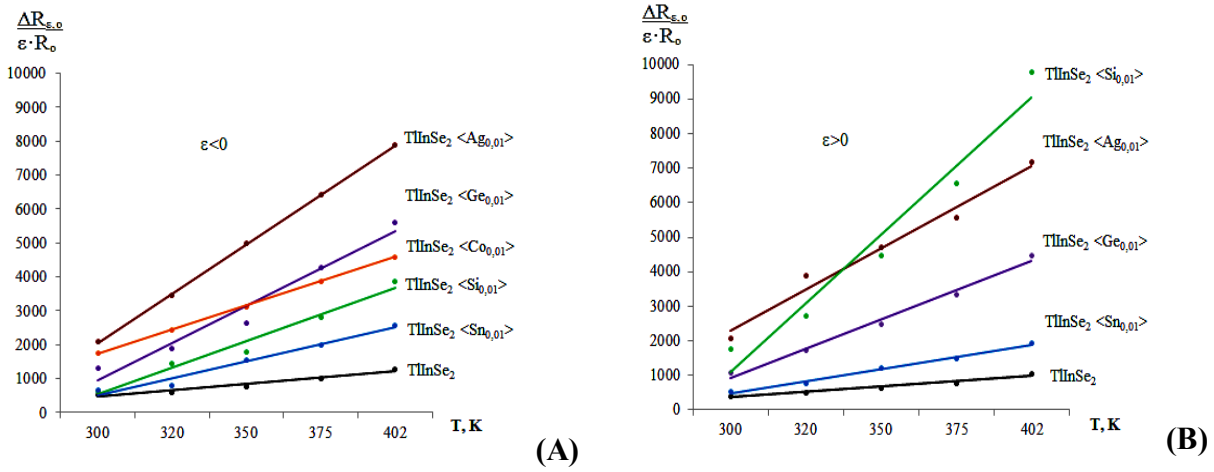


Рис. 6. Зависимость коэффициента тензочувствительности от температуры нелегированных и легированных кристаллов $TlInSe_2$ при деформациях сжатия (А) и растяжения (В)

Изменение тензочувствительности в зависимости от температуры характеризуется температурным коэффициентом тензочувствительности G_T, который определяется по формуле:

$$G_T = \frac{\Delta K / K_0}{\Delta T} \cdot 100\% \qquad (3)$$

где ΔK - изменение коэффициента тензочувствительности при изменении температуры на ΔT;
K_0 - начальный коэффициент тензочувствительности при 300К. Средняя температура вычислялась по формуле:

$$T_{cp} = 300 + \frac{1}{2}\Delta T. \qquad (4)$$

В нелегированных кристаллах $TlInSe_2$ температурный коэффициент тензочувствительности изменяется в пределах G_T=0,13÷0,15%/град, а в легированных кристаллах G_T заметно меняется от образца к образцу в зависимости от вида примесей и существенно зависит от измеряемого температурного интервала (смотрите Таблицу 4).

Таблица 4

Температурные коэффициенты тензочувствительности нелегированных и легированных примесями кристаллов $TlInSe_2$ при относительной деформации $\varepsilon = 0{,}57 \cdot 10^{-3}$ и в интервале температур от 300 до 410К

$T_{ср}$, К	Температурный коэффициент тензочувствительности, G_T (%/град.)				
	Состав				
	p-$TlInSe_2$	$TlInSe_2$<$Si_{0,01}$>	$TlInSe_2$<$Ge_{0,01}$>	$TlInSe_2$<$Ag_{0,01}$>	n-$TlInSe_2$<$Sn_{0,01}$>
При сжатии (ε<0)					
312,5	0,513	3,323	1,743	2,672	0,875
325,0	0,847	3,681	2,040	2,781	2,732
337,5	1,137	4,646	3,037	2,785	2,672
351,0	1,376	5,047	3,211	2,730	2,849
При растяжении (ε>0)					
312,5	0,995	2,184	2,445	3,521	1,646
325,0	1,151	3,092	2,610	2,560	2,484
337,5	1,216	3,621	2,834	2,237	2,403
351,0	1,518	4,459	3,116	2,421	2,563

Для кристаллов легированных примесью серебра G_T изменяется незначительно при деформациях сжатия, что позволяет обеспечить высокую точность регистрации при эксплуатации термодатчиков в термостатированных условиях.

В пятой главе **«Тензорезистивные свойства твердых растворов на основе $TlInSe_2$»** изучено влияние концентрации примесей на электрофизические и тензорезистивные характеристики для кристаллов системы $Tl_{1-x}A_xInSe_2$ на примере меди при значениях концентрации x=0÷0,1, а также для кристаллов системы $TlIn_{1-x}B_xSe_2$ – на примере примеси кобальта при значениях концентрации x=0÷0,5.

Из рис.7 видно, что удельные сопротивления ρ кристаллов системы $Tl_{1-x}Cu_xInSe_2$ в зависимости от концентрации меди x в интервалах x=0÷0,025 и 0,025÷0,1 линейно уменьшаются, образуя характерный излом при концентрации x=0,025. Именно при этой концентрации меди x=0,025 наблюдается скачок коэффициентов светового сопротивления и световой чувствительности легированных образцов (смотрите Рисунки 8 и 9). При деформациях сжатия и растяжения в концентрационных зависимостях коэффициента тензочувствительности K_ε происходит излом или скачок также именно при концентрации меди x= 0,025 (смотрите Рисунок 10).

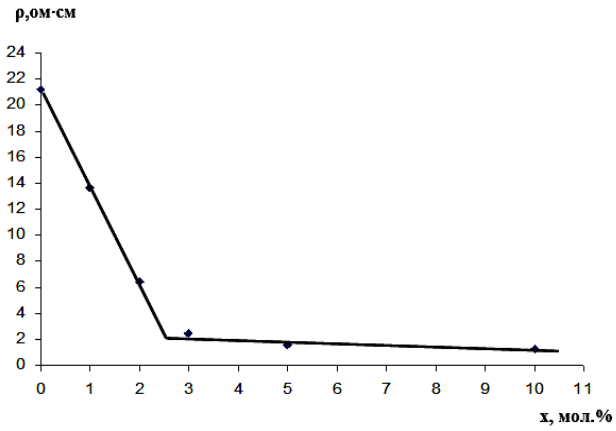


Рис.7. Зависимость удельного сопротивления *ρ* сплавов$Tl_{1-x}Cu_xInSe_2$ от концентрации Cu

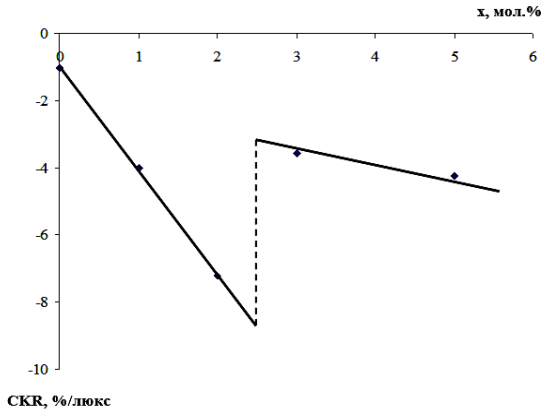


Рис.8. Зависимость коэффициента светового сопротивления кристаллов $Tl_{1-x}Cu_xInSe_2$ от концентрации Cu

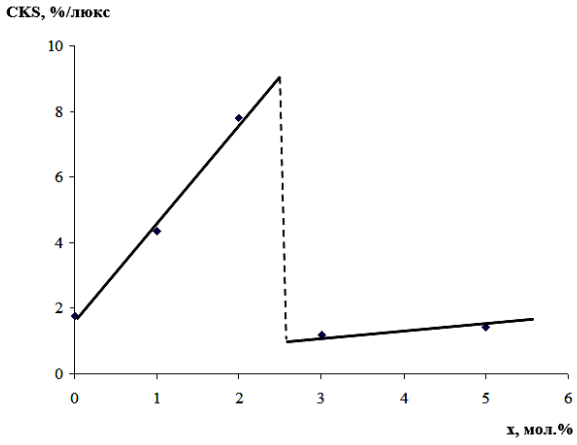


Рис.9. Зависимость коэффициента световой чувствительности кристаллов $Tl_{1-x}Cu_xInSe_2$ от концентрации Cu

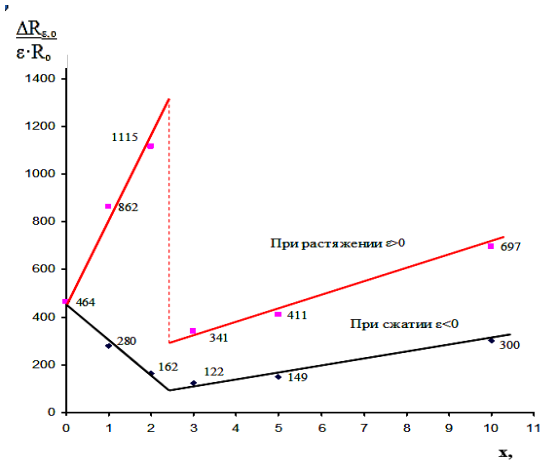


Рис.10. Зависимости коэффициента тензочувствительности сплавов $Tl_{1-x}Cu_xInSe_2$ вдоль оси [001] от концентрации Cu

Все эти вышеприведенные результаты показывают, что в области существования твердых растворов многие свойства системы $Tl_{1-x}Cu_xInSe_2$, в том числе удельное сопротивление, коэффициенты светового сопротивления, световой чувствительности и тензочувствительности при фиксированных температурах имеют линейные концентрационные зависимости, которые претерпевают резкое изменение при переходе границы существования твердых растворов. Эти результаты показывают, что механизмы, ответственные за изменения физических свойства системы $TlInSe_2$-$CuInSe_2$, в области существования твердых растворов и в области двухфазности резко отличаются. Это связано с тем, что в области твердого раствора вхождение примеси приводит к локальному искажению структуры кристалла в примесной области, что обуславливает резкое изменение электрофизических характеристик твердых растворов, а в области двухфазности – две

самостоятельные фазы смещаются в различных соотношениях, сохраняя свои структуры, и поэтому происходят малые концентрационные изменения различных характеристик сплавов.

Следует, отметить, что полученные в ходе наших исследований результаты хорошо согласуются с результатами ранее проведённых исследований систем $TlInSe_2$-$CuInSe_2$, в которых на основе дифференциально-термических и рентгенофазовых анализов[4] было установлено, что в этих системах образуются ограниченные твердые растворы, составляющие при комнатной температуре до концентрации 2,5 мол.% со стороны $TlInSe_2$ и 1,5 мол. % со стороны $CuInSe_2$. В интервале x =0,025÷0,985 сплавы являются двухфазными – они являются сплавами кристаллов $TlInSe_2$ и $CuInSe_2$.

Результаты измерений электрофизических свойств сплавов системы $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ в интервале концентрации кобальта x=0÷0,5 приведены на Рисунке 11, откуда видно, что удельное сопротивление ρ в зависимости от концентрации x кобальта в интервалах x=0÷0,02 и 0,02÷0,5 линейно уменьшается, образуя характерный излом при концентрации x=0,02. В концентрационных зависимостях коэффициента тензочувствительности K_ε также происходит излом именно при концентрации кобальта x=0,02 (смотрите Рисунок 12).

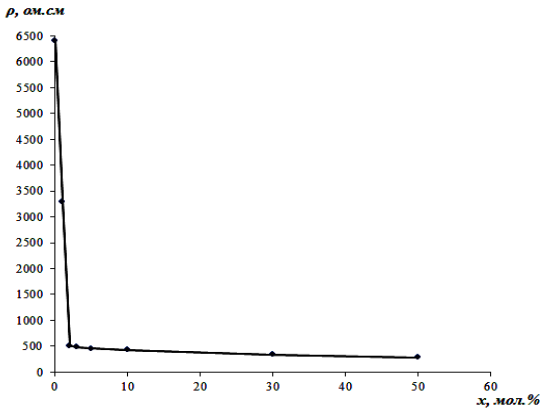


Рис.11. Зависимость удельного сопротивления ρ сплавов $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ от концентрации Co

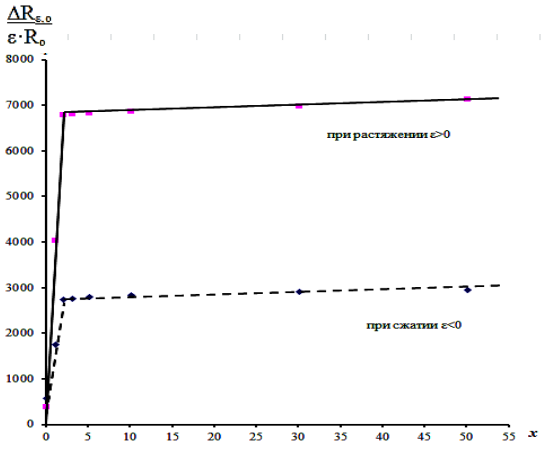


Рис.12. Зависимости коэффициента тензочувствительности сплавов $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ вдоль оси [001] от концентрации Co

Предполагаем, что в системе $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ при концентрационном интервале x=0÷0,02 так же образуются ограниченные твердые растворы, а в интервале x=0,02÷0,5 сплавы являются двухфазными. При переходе этой границы физические свойства сплавов изменяются резко и скачкообразно, что свидетельствует о резком отличии механизмов вышеуказанных явлений, установление которых требует специального исследования.

---

[4] *Георгобеани А.Н., Матиев А.Х., Хамхоев Б.М., Евлоев А.М.* Фазовые равновесия в системах $TlInSe_2$-$CuInSe_2$ и $TlInSe_2$-$AgInSe_2$. // Известия РАН, Неорганические материалы. – Москва, 2005– Т.41, №5 – С.281-285.

Также стоит подчеркнуть, что во всех исследованных образцах коэффициент тензочувствительности увеличивается с увеличением концентрации Co в твердых растворах $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ и при сжатии, и при растяжении кристаллов в направлении [001].

Результаты исследований влияния температуры твердых растворов на коэффициент тензочувствительности в температурном интервале 300К≤Т≤410К показывают, что с повышением температуры образцов их чувствительность к деформации в значительной мере увеличивается во всех исследованных нами составах твердого раствора $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ (смотрите Рисунок 13 и таблицу 5). Это показывает, что в термостатированных условиях эксплуатации тензорезисторы на основе $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ позволяют обеспечить высокую точность регистрации.

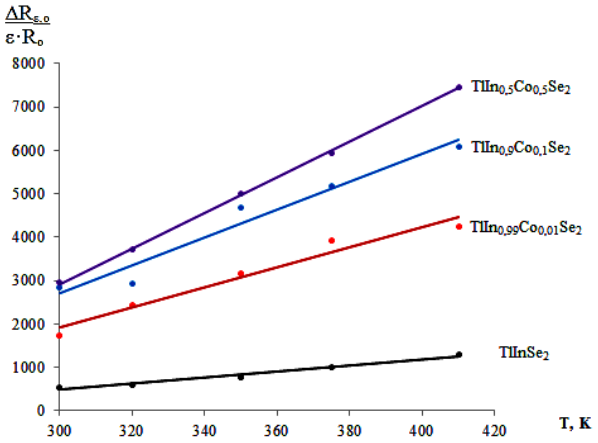


Рис.13. Зависимость коэффициентов тензочувствительности при сжатии кристаллов $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ от состава и температуры

Таблица 5

Зависимость температурных коэффициентов тензочувствительности (G_T) при деформации сжатия кристаллов $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ от состава

№	$T_{ср}$, К	$TlInSe_2$	$TlIn_{0,99}Co_{0,01}Se_2$	$TlIn_{0,9}Co_{0,1}Se_2$	$TlIn_{0,5}Co_{0,5}Se_2$
1.	310	0,078	2,01	1,43	0,86
2.	325	0,052	1,64	1,41	1,39
3.	337,5	0,034	1,67	1,10	1,34
4.	355	0,052	1,31	1,04	1,39

Таким образом, результаты проведённых исследований тензорезистивных характеристик кристаллов твердых растворов $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ в интервале концентрации кобальта $0 \le x \le 0,5$, а также исследования температурной зависимости тензочувствительности данных кристаллов в интервале 300≤Т≤410К, показали перспективность их применения как эффективных материалов для полупроводниковой тензометрии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследования, проведенного по теме диссертации доктора философии (PhD) «Тензорезистивные свойства монокристаллов $TlInSe_2$ и твердых растворов на его основе», сделаны следующие выводы:

1. Установлено, что при деформации одноосного сжатия кристаллов $TlInSe_2$ в направлении [001] ширина запрещенной зоны кристаллов увеличивается, а при растяжении – уменьшается. При этом абсолютное значение фототока в деформациях растяжения увеличивается, а в деформациях сжатия – уменьшается. Изменение спектрального распределения фототока наблюдается не только в длинноволновой, но и в коротковолновой по сравнению с максимумом фототока области спектра, что свидетельствует о наличии в кристаллах $TlInSe_2$ непрямых зонных переходов не только в низкоэнергетической, но и в высокоэнергетической области спектра по сравнению с прямым зонным переходом.

2. Показано, что механизм тензорезистивного эффекта в кристаллах p-$TlInSe_2$ связан с многодолинным характером электронных зон, обусловленным перетеканием зарядов из одной долины в другую, из-за изменения энергетических положений долин при деформации.

3. Установлено, что введение примесей элементов I и IV групп в монокристаллы $TlInSe_2$ приводит к существенному повышению коэффициента тензочувствительности вдоль кристаллографической оси [001].

4. Показано, что с повышением температуры тензочувствительность нелегированных кристаллов к деформации значительно увеличивается и коэффициент тензочувствительности растет линейно.

5. Установлено, что в легированных элементами I и IV групп кристаллах $TlInSe_2$ с повышением температуры существенно увеличивается коэффициент тензочувствительности, что позволяет увеличить чувствительность термодатчиков на основе тензорезисторов.

6. Установлено, что в области существования твердых растворов (в концентрационном интервале x=0÷0,025) сплавов $Tl_{1-x}Cu_xInSe_2$ системы $TlInSe_2$-$CuInSe_2$ удельные сопротивления и коэффициенты тензочувствительности имеют линейные концентрационные зависимости, которые резко изменяются при переходе границы области существования твердых растворов.

7. Исследованиями влияния изменения соотношения компонент сплавов $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ в концентрационном интервале кобальта x=0÷0,5 на электрофизические и тензорезистивные характеристики установлено, что в интервале x=0÷0,02 эти свойства имеют линейные концентрационные зависимости, которые претерпевают резкие изменения в интервале 0,02÷0,5.

8. Результаты проведённых исследований тензорезистивных характеристик кристаллов твердых растворов $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ в интервале концентрации кобальта $0 \leq x \leq 0,5$, а также исследования температурной зависимости тензочувствительности данных кристаллов в интервале $300 \leq T \leq 410$K показали эффективность тензорезистивных материалов, которые открывают перспективное поле деятельности для дальнейших исследований в области полупроводниковой тензометрии.

SCIENTIFIC COUNCIL DSC.27.06.2017.FM/T.33.01 ON AWARD OF SCIENTIFIC DEGREES AT THE INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS, ASTRONOMICAL INSTITUTE, NATIONAL UNIVERSITY OF UZBEKISTAN

INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS

ASHUROV JASUR DJURAYEVICH

TENSORISTIVE PROPERTIES OF $TlInSe_2$ SINGLE CRYSTALS AND SOLID SOLUTIONS BASED ON IT

01.04.07 – condensed matter physics

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

Tashkent – 2019

The theme of the dissertation of the doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences was registered by the Supreme Attestation Commission of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under No.B2018.2.PhD/FM248.

The doctoral (PhD) dissertation was carried out at 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" informational and educational portal at www.ziyonet.uz.

Scientific supervisor:	**Nuritdinov Izzatillo** Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor
Official opponents:	**Khidirov Irsali** Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor
	Tursunov Ikromjon Gulamjonovich Doctor of Physical and Mathematical Sciences
Leading organization:	**Andijan State University**

The defense of the dissertation will be held on "___" _____ 2019, at ___ at the meeting of the Scientific Council No. DSc.27.06.2017.FM/T.33.01 at the Institute of Nuclear Physics, Astronomical Institute, National University of Uzbekistan (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 Centre of the 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 "_____"_____2019.
(Registry record No. ____ dated "___" _____ 2019.)

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

E.M. Tursunov
Scientific Secretary of the Scientific Council
on Award of Scientific Degrees,
D.Ph.-M.S., Senior Researcher

S.N. Nuritdinov
Vice-chairman of the Scientific Seminar of the Scientific
Council on Award of Scientific Degrees,
D.Ph.-M.S., Professor

INTRODUCTION (annotation of PhD dissertation)

Topicality and relevance of the theme of the dissertation. Currently, from the side of researchers and practitioners, much attention is paid to the study of various semiconductor converters, including tensometric transducers. The highlights of such transducers is their high sensitivity and small size. However, the requirements of modern science and technology are steadily growing, and this requires materials with various properties that meet these requirements. Consequently, along with improving the properties of existing ones, the search for new semiconductor materials including ternary and more complex compounds and their solid solutions and the study of their various characteristics is currently one of the most important tasks of modern solid state physics.

Studying the interrelationships of the composition, structure and properties of new multicomponent semiconductor compounds, in addition to deepening the fundamental scientific understanding of semiconductors, also opens up new practical perspectives: new compounds, in most cases, exhibit special qualities and, thus, contribute to solving the emerging important technical problems. Understanding the patterns of interdependencies of properties, composition and structure provides an opportunity to develop the scientific basis for searching and creating new, most efficient semiconductor materials with predetermined properties and, thus, allow to meet the growing requirements of modern optical, semiconductor and quantum microelectronics. Of particular value is the creation of new semiconductor materials, if you can get them in the form of perfect large single crystals. Among multicomponent semiconductor compounds of type $A^{III}B^{III}C_2^{VI}$, $TlInSe_2$ semiconductor compounds are of particular interest, the patterns of many physical phenomena in which have not been studied completely satisfactorily. The studies of the electrical, thermoelectric, thermal and photoelectric properties of undoped $TlInSe_2$ crystals carried out by scientists of various scientific centers of the world indicate their promise as a new efficient semiconductor, including tensometric material. However, studies devoted to studying the effect of various impurities on the electrophysical and photoelectric processes in this material, especially the properties of solid solutions based on it, remain small in number.

Currently, Uzbekistan is paying great attention to the search for various new semiconductor materials for the manufacture of various strain gauges, detectors and sensors to conduct basic research in them that corresponds to the world level, with the aim of using them in competitive new high-tech equipment. . The directions of these fundamental research, which are of great importance for the development of science in our country and its further practical application, are reflected in the Action Strategy[1] for the Further Development of the Republic of Uzbekistan for 2017-2021.

The research conducted in this dissertation work, to a certain extent,

[1] Decree of the President of the Republic of Uzbekistan "On the Strategy for the Further Development of the Republic of Uzbekistan" No. 4947 of 07 February 2017.

corresponds to the tasks outlined in the Decrees of the President of the Republic of Uzbekistan No.UP-4947 “On Strategy of Action for the Further Development of the Republic of Uzbekistan for 2017-2021” dated of February 7, 2017, No.UP-4958 “On further improvement of the system of postgraduate education” dated February 16, 2017, in Decree of the President of the Republic of Uzbekistan No. PP-2789 “On measures to further improve the activities of the Academy of Sciences, organization, management and financing of research activity "on February 17, 2017 as well as in other legal instruments adopted in this area.

Relevance of the research to the priority areas of science and technology development of the Republic of Uzbekistan. The dissertation research was conducted in accordance with the priority direction of development of science and technology in the Republic of Uzbekistan: II. "Energy, energy and resource efficiency."

Degree of study the problem. To date, an effective technology has been developed for growing large perfect pure and doped $TlInSe_2$ single crystals with various impurities. Comprehensive studies of the regularities of the electrical and photoelectric properties of crystals $TlInSe_2$ were made by leading scientists of the research centers of the world, including Japanese (Shinya Hosokawa, Kenji Kamimura, Hiroyuki Ikemoto, Kojiro Mimura, Kazuki Wakita), Germans (Mooser E., Meitner H.), Russians (Georgobiani A.N., Matiev A.Kh., Alekseev I.V., Karpovich I.A., Chervova A.A.); Azeri (Huseynov G.D., Abdullaev G. B., Mustafayeva S.N., Ismaylov M.Z., Rustamov V.D., Kerimov E.M., Godzhaev E.M.), Ukrainians (Danilchuk S.P., Mironchuk G.L., Mozolyuk M.Yu., Bozhko V.V.), Lithuanian (Grigas J., Lazauskas V., Nelkinas V.), Polish (Talik E., Adamiec M.), Turkish (Salehli F., Yildirim T., Gasanly N.M.), Uzbek (Umarov S.Kh. Nuritdinov I.) and other scientists. The results of the studies indicate that these compounds are promising materials for the development on their basis of radiation detectors for the visible, near-IR, and also X-ray spectral ranges. The crystals of this compound open a challenging area for the researches in the field of semiconductor tensometry.

Studies of the electrical and photoelectric characteristics of doped crystals have shown that their sensitivity improves dramatically with the introduction of certain impurities. If we take into account the fact that the tensoresistive properties of the materials are directly related to the electrophysical properties and they are very sensitive to the presence of impurities, it can be expected that the introduction of impurities can also control the tensometric characteristics of semiconductor materials. Therefore, studying the tensometric properties of doped $TlInSe_2$ crystals, as well as solid solutions based on $TlInSe_2$, is of scientific and practical interest. However, studies in this direction are absent.

The influence of temperature, optical illumination and impurities of elements I and IV of the periodic system on the tensoresistive properties of $TlInSe_2$ single crystals is also not sufficiently studied, and studies in this direction could provide direct information about the location of extreme and details of the band structure of crystals of this class as well as expand areas their application.

On this basis, our further task was to conduct systematic studies of the tenso-resistive features of these crystals depending on the impurities of various kinds introduced (with donor and acceptor nature), temperature, optical illumination, degree of deformation in the corresponding crystallographic directions, and so on. .

Connection of dissertational research with the plans of scientific research works of the scientific research institution, where the dissertation was conducted. The dissertation work was carried out within the framework of research projects at the Institute of Nuclear Physics of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan on the following topics: FA-F2-F065-F071 “Thermo and radiation-stimulated phenomena in solid solutions of substitution and introduction” (2007-2011); OT-F2-23 “Features of generation and recombination processes in wide-gap oxide and fluoride solid-state materials” (2017-2020).

The aim of the research is to establish the patterns and mechanisms responsible for the influence of various impurities on the tensoresistive characteristics of $TlInSe_2$ single crystals as well as in solid solutions based on $TlInSe_2$.

The tasks of the research:

to investigate the spectral distributions of the photocurrent and the photostimulated tensometric sensitivity in p-$TlInSe_2$ crystals;

to study the effects of Ag, Cu, Si, Ge, Sn and Co impurities on the tensoresistive properties of $TlInSe_2$ single crystals and establish the mechanisms of these influences;

to determine the effect of temperature on the tensoresistive properties in doped $TlInSe_2$ crystals;

to study the influence of the ratio of the components on the electrophysical and tensoresistive characteristics of solid solutions based on $TlInSe_2$ crystals.

The objects of the research were unalloyed and doped with impurities from the elements of the first (Cu, Ag) and fourth (Si, Ge, Sn) groups of the periodic system $TlInSe_2$ single crystals as well as the complex compounds $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ ($0\leq x\leq 0.5$) and $Tl_{1-x}Cu_xInSe_2$ ($0\leq x\leq 0.1$) based on $TlInSe_2$ crystals.

The subject of the research is the tensoresistive characteristics of $TlInSe_2$ single crystals and the complex compounds $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ and $Tl_{1-x}Cu_xInSe_2$ ($0\leq x\leq 0.1$) based on $TlInSe_2$ crystals.

The methods of research. Standard experimental research methods were used: probe and non-contact methods for measuring specific electrical conductivity, measuring the concentration and mobility of charge carriers, methods for separately determining the concentration of donors and acceptors in semiconductors, methods for measuring the lifetime of charge carriers, and optical methods.

The scientific novelty of the research is as follows:

The presence of indirect band electron transitions in $TlInSe_2$ crystals was shown not only in the low-energy transition compared to the direct-band transition, but also in the high-energy region of the spectrum.

It was established experimentally that with positive and negative deformations, the maxima of the spectral distribution of the photostimulated tensometric sensitivity coefficient of $TlInSe_2$ crystals due to electronic transitions from different valleys are redistributed, which is shown by the multi-valley mechanism of the tensoresistive phenomenon: when deformed the charges flow from one valley into another because of changes in the energy state of valleys.

It was found that the introduction of impurities of elements of groups I and IV of the periodic system and the effect of temperature in the range ($300 \leq T \leq 410K$) repeatedly increase (from 1,1 to ~24 times) the tensometric sensitivity coefficient of $TlInSe_2$ single crystals in the [001] direction. This fact is due to a significant increase in charge carrier concentration as a result of the formation of impurity levels and thermal ionization of carriers;

for the first time for compounds of the $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ system in the cobalt concentration range ($0 \leq x \leq 0,5$) and for $Tl_{1-x}Cu_xInSe_2$ compounds in the copper concentration range ($0 \leq x \leq 0,1$) the tensoresistive characteristics and temperature dependences of the sensitivity are investigated and concentration areas of existence of solid solutions for these systems are determined.

Practical results of the research consist of the following:

The regularities of the effect of temperature and doping impurities of groups I and IV of the periodic system on the tensoresistive properties of $TlInSe_2$ single crystals, which allow purposefully controlling the tensometric characteristics of crystals, are determined.

The prospect of using doped $TlInSe_2$ crystals as a sensitive tensoresistive semiconductor material has been identified, the stability of their tensoresistive characteristics with a thousand-fold deformation (with relative deformation $\varepsilon = 0.57 \cdot 10^{-3}$) and thermal effects is shown (in the temperature interval $300 \leq T \leq 410K$), which contributes to the development of highly sensitive strain gauges for various purposes.

The reliability of the results research obtained is justified by the use of a complex of complementary methods of physical experiment, theoretical analysis, good reproducibility of the results, as well as their consistency with existing literary data and general physical concepts.

Scientific and practical significance of the research results. The scientific significance of the results lies in deepening the fundamental scientific understanding of $TlInSe_2$ semiconductors and solid solutions based on TlInSe , establishing the laws of the effect of temperature and concentration of dopants of elements I and IV of the periodic system on the tensoresistive properties of $TlInSe_2$ single crystals under uniaxial compression and stretching along the [001] direction.

The practical significance of the results consists in determining the class of semiconductor compounds obtained by doping $TlInSe_2$ crystals with impurities of elements I and IV of the periodic system. Experimentally obtained tenso - and semiconductor materials can find wide applications for various purposes. The interest in such materials is due to possible application of them in designing of

strain gauges of advanced type that have a greater strain-sensitivity coefficient than the coefficient published in scientific literature.

Implementation of the research results. Based on the obtained results on the study of tensoresistive properties of $TlInSe_2$ single crystal and solid solutions based on it:

the establishment of a multi-valley tensoresistive mechanism in positively and negatively deformed $TlInSe_2$ crystals was used in the framework of the OT-F2-081 fundamental study. No. EF-2-13 «The effect of impurities of the titanium subgroup on the electro physical properties of silicon structures»" (2016-2017) when comparing the mechanisms of defect formation in silicon semiconductor structures (Letter of the Ministry of Higher and Secondary Specialized Education of the Republic of Uzbekistan No. 89-03-2223 of March 20, 2019). The multi-valley mechanism of the tensoresistive phenomenon in this project was used to study the tensoresistive phenomenon in silicon structures doped with impurities of a small titanium group. As a result an increase in the degree of accuracy in determining the tensometric sensitivity coefficient was obtained.

the phenomenon of multiple amplification of the tensometric sensitivity coefficient with increasing impurity concentration and temperature as well as during illumination in the photosensitivity region in $TlInSe_2$ crystal and in solid solutions $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ ($0 \le x \le 0,5$) and $Tl_{1-x}Cu_xInSe_2$ ($0 \le x \le 0,1$) (caused by a significant increase in carrier concentration as a result of thermo - and photoionization) as well as the proposed multi-valley mechanism of the tensor-resistive effect were used in carrying out the scientific grant No. FA-A3-002 "Development of a semiconductor strain gauge for weight measuring devices" (2017-2018) when describing the current state and development trends of semiconductor strain gauges and for formulating the statement of the research problem (Letter of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan No. 2/1255-918 of March 26, 2019). The use of these results made it possible to substantiate the possibility of imparting linear transfer characteristic to film strain gauges with semiconductor additives;

the revealed multiple increase in the strain-sensitivity coefficient of $TlInSe_2$ single crystals along the [001] direction with doping with impurities from elements I and IV of the periodic system, under illumination in the self-absorption region and temperature in the range ($300 \le T \le 410K$) (caused by a significant increase in carrier concentration as a result of the emerging impurity doping level as well as photo and thermal ionization of carriers) were used by foreign scientists in the course of studies of the photoelectric properties and electronic structure of $Tl_{1-x}In_{1-x}Sn_xSe_2$ solid solutions at tin concentrations $x = 0 \div 0.25$ (Journal of Materials Science: Volume 24 Number 9, pp. 3555–3563, 2013; Scientific Bulletin of Volyn University, Vol. 1, Series: Solid state physics, 16, pp.19-24, 2012; Physical Chemistry Chemical Physics, 15, pp.6965, 2013). The application of these results allowed us to develop a model of charge exchange of photoactive centers and to explain the increase in photoconductivity with increasing concentration and temperature increase in the studied samples.

Testing of the research results. The results of investigation were reported and discussed at 4 international and 7 republican scientific and practical conferences.

Publication of the research results. On the theme of the dissertation, 18 scientific works were published, including 6 scientific articles in journals recommended by the Supreme Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for publication of the main scientific results of doctoral dissertations, 4 of them in international scientific journals.

Structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, five chapters, conclusion and a bibliography. The volume of the dissertation is 111 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; part I)

1. Умаров С.Х., Нуритдинов И., Ашуров Ж.Д. Тензорезистивные свойства твёрдых растворов $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ // Перспективные материалы. – Москва, 2007. – №3. – С.24-26. (№1. Web of Science, IF=0.393)

2. Ашуров Ж.Д., Нуритдинов И., Умаров С.Х. Влияние примесей I и IV групп на тензорезистивные свойства монокристаллов $TlInSe_2$ // Узбекский физический журнал. – Ташкент, 2008. – Т.10, №2. – С.137-141. (01.00.00. №5)

3. Ашуров Ж.Д., Нуритдинов И., Умаров С.Х. Влияние температуры и примесей элементов I и IV групп на тензорезистивные свойства монокристаллов $TlInSe_2$ // Перспективные материалы. – Москва, 2011. – №1. – С.11-14. (№1. Web of Science, IF=0.393)

4. Umarov S. Kh., Nuritdinov I., Ashurov J. Dzh., Khallokov F. Kh. Single Crystals of $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ ($0\leq x\leq 0.5$) Solid Solutions as Effective Materials for Semiconductor Tensometry // Technical Physics Letters. – Springer, 2017. Vol.43, №8.–P.730-732; Умаров С.Х., Нуритдинов И., Ашуров Ж.Д., Халлоков Ф.К. Монокристаллы твердых растворов $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$ ($0\leq x\leq 0.5$) – эффективный материал для полупроводниковой тензометрии. // Письма в Журнал технической физики. – Санкт-Петербург, 2017. –№16(43). – С.3-8. (№11. Springer, IF= 0.808)

5. Умаров С.Х., Нуритдинов И., Ашуров Ж.Д., Халлоков Ф.К., Ходжаев У.О. Монокристаллы твердых растворов $TlIn_{1-x}$ Co_xSe_2 ($0\leq x\leq 0.5$) как перспективный материал для электронной техники. // Научный вестник Бухарского государственного университета. – Бухара, 2017. – №2. – С.21-24. (01.00.00. №3)

6. Умаров С.Х., Нуритдинов И., Ашуров Ж.Д., Халлоков Ф.К. Удельные сопротивления и тензорезистивные характеристики кристаллов твердых растворов системы $TlInSe_2$-$CuInSe_2$ // Журнал технической физики**.** – Санкт-Петербург, 2019. –№ 2(89). – С.214-217. (№11. Springer, IF= 0.707)

II бўлим (II часть; part II)

7. Умаров С.Х., Нуритдинов И., Ашуров Ж.Д., Халлоков Ф.К., Ходжаев У.О. Фото- и тензочувствительность кристаллов $TlInSe_2$.// Вестник “TINBO”. – Ташкент, 2014. – №2. – С.94-98.

8. Умаров С.Х., Назаров И.И., Шодиев С.Ф., Ходжаев У.О., Ашуров Ж.Д. $TlInS_{2x}Se_{2(1-x)}$ ($0\leq x\leq 0,3$) перспективный материал для полупроводниковой тензометрии // Физика ва тиббий биологик фанларнинг долзарб муаммолари. – Самарканд, 2005. – С.113-115.

9. Умаров С.Х., Назаров И. И., Ашуров Ж. Д., Хамроев Р. Р., Ходжаев У. Влияние одноосной упругой деформации на люксамперные характеристики

кристаллов p-$TlInSe_2$ // Физика тараққиётида нисбийлик назарияси. – Бухоро, 2005. – С.30-31.

10. Ашуров Ж.Д. Влияние примесей на тензорезистивные свойства монокристаллов $TlInSe_2$. // Сборник материалов научно-практической конференции молодых учёных. – Бухара, 2008. – С.72-74.

11. Ашуров Ж.Д. Пьезорезистивные свойства монокристаллов $TlInSe_2$ // Сборник материалов научно практической конференции молодых учёных. – Бухара, 2008. – С.74-76.

12. Умаров С.Х., Нуритдинов И., Ашуров Ж.Д., Ходжаев У.О., Хамроев Р.Р. Влияние примесей элементов I и IV групп на рентгенопроводимость и рентгенодозиметрические характеристики кристаллов - $TlInSe_2$. // Международная конференция «Фундаментальные и прикладные вопросы физики» Физико-технический институт НПО «Физика-Солнце» – Ташкент, 2010. – С.293-295.

13. Ашуров Ж.Д., Умаров С.Х., Нуритдинов И., Ибрагимов Ж.Д., Рахимов Э.Т. О спектральной зависимости фото - и тензочувствительности кристаллов $TlInSe_2$ // II Международная конференция по оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро- и наноструктурах. – Фергана, 2011. – С.30-33.

14. Нуритдинов И., Умаров С.Х., Ашуров Ж.Д., Рахимов Э.Т. Удельное сопротивление и тензорезистивные характеристики кристаллов твердых растворов системы $TlInSe_2$ – $CuInSe_2$. // Сборник трудов IV Международной конференции по оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро - и наноструктурах. – Фергана, 2014. – С.264-267

15. Ашуров Ж.Д., Нуритдинов И., Умаров С.Х., Халлоков Ф.К., Ходжаев У.О. Влияние одноосной упруой деформации на люксамперные характеристики кристаллов p-$TlInSe_2$. // «Физика фанининг ривожида истеъдодли ёшларнинг ўрни» конференция мақолалари тўплами. – Тошкент, 2015. – С.296-301.

16. Умаров С.Х., Ашуров Ж.Д., Халлоков Ф.К., Ходжаев У.О. Влияние донорных примесей на тензорезестивные свойства монокристаллов $TlInSe_2$. // Тезисы докладов Республиканской научной конференции «Современные проблемы физики конденсированного состояния». – Бухара, 2016. – Т.1. – С.131-132.

17. Nuritdinov I., Umarov S.Kh., Khallokov F. K., Ashurov J.Dj., Saidakhmedov K.Kh. Tensoresistive properties of $TlInSe_2$ momocrystals doped with elements of groups I and IV. // The International Symposium “New Tendencies of Developing Fundamental and Applied Physics: Problems, Achievements, and Prospects”. – Tashkent, 2016. – С.375-376.

18. Нуритдинов И., Ашуров Ж.Д., Умаров С.Х. Удельное сопротивление и тензорезистивные характеристики кристаллов твердых растворов $TlIn_{1-x}Co_xSe_2$. // Материалы научно-практической Республиканской конференции с международным участием «Актуальные проблемы преподавания Физики». – Наманган, 2018. – С.69-72.