

**ФАРҒОНА ПОЛИТЕХНИКА ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ФИЗИКА-
МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАСИНИ БЕРУВЧИ PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 РАҚАМЛИ
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ФАРҒОНА ПОЛИТЕХНИКА ИНСТИТУТИ

СУЛАЙМОНОВ ҲУСАНБОЙ МАННОПОВИЧ

**ҚЎРҒОШИН ВА ВИСМУТ ХАЛЬКОГЕНИДЛАРИ
БИРИКМАЛАРИДАН ТАЙЁРЛАНГАН СТРУКТУРАЛАРДА
ПЬЕЗОҚАРШИЛИК ҲОДИСАЛАРИ**

01.04.07 – Конденсирланган ҳолат физикаси

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

Фарғона-2020

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

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

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

Сулаймонов Ҳусанбой Маннопович

Қўрғошин ва висмут халькогенидлари бирикмаларидан тайёрланган
структураларда пьезоқаршилиқ ҳодисалари 3

Сулаймонов Ҳусанбой Маннопович

Явления пьезосопротивления в структурах из халькогенидов свинца и
висмута 26

Sulaymonov Khusanboy Mannopovich

Piezo resistance phenomena in structures from lead and bismuth chalcogenides...48

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works..... 52

**ФАРҒОНА ПОЛИТЕХНИКА ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ФИЗИКА-
МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАСИНИ БЕРУВЧИ PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 РАҚАМЛИ
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ФАРҒОНА ПОЛИТЕХНИКА ИНСТИТУТИ

СУЛАЙМОНОВ ҲУСАНБОЙ МАННОПОВИЧ

**ҚЎРҒОШИН ВА ВИСМУТ ХАЛЬКОГЕНИДЛАРИ
БИРИКМАЛАРИДАН ТАЙЁРЛАНГАН СТРУКТУРАЛАРДА
ПЬЕЗОҚАРШИЛИК ҲОДИСАЛАРИ**

01.04.07 – Конденсирланган ҳолат физикаси

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

Фарғона-2020

Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (Doctor of Philosophy) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2020.2.PhD/FM39 рақам билан қайд этилган.

Диссертация Фарғона политехника институтида бажарилган.

Диссертация автореферати учта тилда (Ўзбек, рус, инглиз (резюме) Илмий кенгашнинг веб-саҳифасига (www.fergpi.uz) ва «ZiyoNet» ахборот-таълим порталига (www.ziyoule.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:

Юлдашев Носиржон Хайдарович
физика-математика фанлари доктори, профессор

Расмий оппонентлар:

Нуритдинов Иззатилло
физика-математика фанлари доктори, профессор

Расулов Рустам Явқачович
физика-математика фанлари доктори, профессор

Етакчи ташкилот:

Мухаммад ал-Хоразмий номидаги Тошкент ахборот технологиялари университети

Диссертациянинг ҳимояси Фарғона политехника институти ҳузуридаги фалсафа доктори илмий даражасини берувчи PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 рақамли илмий кенгашнинг 2020 йил "21" ноябрь соат "14:00" даги мажлисида бўлиб ўтади. Манзил: 150107, Фарғона ш. Фарғона к. 86 уй. Тел: (+99873) 241-12-06, факс (+99873) 241-12-06, e-mail: uzferfizika@mail.ru, кичик мажлислар зали.

Диссертация билан институтнинг ахборот-ресурс маркази илмий-услубий бўлимида танишиш мумкин. (№0002-Н рақами билан рўйхатга олинган). Манзил: 150107, Фарғона ш. Фарғона к. 86 уй. Тел: (+99873) 241-12-06.

Диссертация автореферати 2020 йил "4" ноябрь куни тарқатилди.

(2020 йил "7" ноябрь даги PHDFN-02 рақамли реестр баённомаси).



Н.А. Султанов
Фалсафа доктори илмий даражасини берувчи
Илмий Кенгаш раиси,
ф-м.ф.д., профессор.

Б.З. Полвонов
Фалсафа доктори илмий даражасини берувчи
Илмий Кенгаш илмий котиби, ф-м.ф PhD, доцент

Р.Я. Расулов
Фалсафа доктори илмий даражасини берувчи
Илмий Кенгаш қошидаги илмий семинар
раиси, ф-м.ф.д., профессор.

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертациясининг аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Ҳозирги кунда жаҳон масштабида монокристаллар ва поликристалл пленкаларда пьезоқаршилиқ эффекти чуқур, ҳар томонлама тадқиқ этилганлигига қарамай, ушбу материаллардаги тензорезистивлик ходисаларига қизиқиш сусаймаяпти. Айниқса, тензометрия усуллари ёрдамида турли қуйи ўлчамдаги кристалл тузилмаларнинг физик хусусиятларини комплекс ўрганиш ҳам илмий, ҳам амалий жиҳатдан истиқболли ва долзарб бўлиб қолмоқда. Шу муносабат билан монокристалл намуналар эластоқаршилигининг ҳароратга боғланишларини ва деформацияланган кристаллардаги чуқур сатҳли радиацион нуқсонларни тадқиқ қилиш, поликристалл пленкалардаги янги тензорезистив эффектларни ва сиртолди қатламларидаги деформацион ходисаларни, шунингдек, қаттиқ жисмли структураларнинг хоссаларини деформацион ва оптик усулларни биргаликда қўллаб ўрганиш алоҳида қизиқиш касб этмоқда.

Бугунги кунга келиб, микроэлектроника ва илмий асбобсозлик соҳаларида дунёнинг етакчи илмий-тадқиқот марказлари олимларининг асосий эътибори муҳим муаммога - моно- ва поликристалл яримўтказгич структуралар тензосезгирлигининг янги нозик механизмларини очиш ва улар асосида чизиқли деформацион характеристикаларга эга бўлган турли хил тензоэлектрик асбоблар яратишга қаратилган. Шунинг учун PbS туридаги тор зонали кристалларда эластоқаршилиқ доимийликларининг заряд ташувчилар концентрациясига боғланишини пьезоқаршилиқнинг "кичик эффектлари"ни инобатга олиб назарий ҳисоблаш усулини ишлаб чиқиш, поликристалл яримўтказгичларнинг умумий тензосезгирлигини бўйлама ва кўндаланг пьезоқаршилиқларни эътиборга олган ҳолда ҳисоблаш, бир томонлама статик деформациялашда ностехиометрик кўрғошин ва висмут халькогенидлари асосидаги поликристалл пленкаларнинг ўзгармас токдаги деформацион характеристикалари, кучли легирланган PbTe, PbSe, Bi₂Te₃ пленкали намуналар оптик ва тензометрик хоссаларининг корреляцияси ҳамда улардаги деформацион эффектларни ўзгарувчан токда тадқиқ қилиш бўйича фундаментал тадқиқотлар олиб бориш қаттиқ жисмлар тензометриясининг долзарб вазифаларидан ҳисобланади.

Сўнгги йилларда Ўзбекистон Республикаси ҳукумати фундаментал ва амалий тадқиқотларнинг долзарб устувор илмий йўналишларига сезиларли эътибор қаратмоқда. Таъкидлаш лозимки, мамлакатимизда қуёш панелларини ишлаб чиқариш учун моно - ва поликристалл яримўтказгичлар олиш технологияси бўйича муайян натижаларга эришилди. Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида илмий-инновацион ишланмаларни амалда қўллашнинг самарали механизмларини яратиш вазифаларига алоҳида эътибор қаратилган. Бу жиҳатдан фотоника ва микроэлектроника соҳасида кристалл структураларнинг электрофизик параметрларини чуқур назарий тадқиқ қилишнинг янги усулларини ривожлантириш жуда муҳимдир. Ушбу

диссертация иши *PbS* туридаги ҳажмий кристалл ва юпқа пардали поликристалл структуралардаги пьезоқаршилик ҳодисасининг янги механизмларини назарий ва экспериментал ўрганишга бағишланган бўлиб, унинг натижалари қаттиқ жисмли тензодатчиклар, оптик-механик сенсорлар ва бошқа шу каби микроэлектрон асбобларнинг технологиясини такомиллаштиришга олиб келади.

Ушбу диссертация тадқиқотлари маълум даражада Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги 4947–ПФ сонли "Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида"ги Фармони ва 2017 йил 13 февралдаги 2772-ПҚ сонли "2017-2021 йилларда электротехника саноатини бошқаришни янада такомиллаштириш, уни жадал ривожлантириш ва диверсификациялаш чора-тадбирлари тўғрисида"ги, 2017 йил 17 февралдаги 2789-ПҚ сонли "Фанлар академияси фаолияти, илмий-тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида"ги, 2018 йил 20 июлдаги ПҚ-3876" Фан ва олий таълим соҳаси ходимларининг меҳнат ҳақи миқдорини янада ошириш, илмий ва илмий-техник фаолият натижалари жорий этилишини давлат томонидан қўллаб-қувватлаш чора-тадбирлари тўғрисида"ги Қарорларида ва бошқа шунга ўхшаш бу соҳада қабул қилинган ва тегишли қонунчилик ҳужжатларида баён қилинган меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга хизмат қилади.

Тадқиқотларнинг Ўзбекистон Республикаси фан ва технологияларини ривожлантиришнинг устувор йўналишларига мослиги. Диссертациянинг вазифалари Ўзбекистон Республикасида фан ва технологияларни ривожлантиришнинг "Энергетика, энергия ва ресурсларни тежаш, транспорт, машинасозлик ва асбобсозлик, замонавий электроника, микроэлектроника, фотоника, электрон асбобсозликни ривожлантириш" каби устувор йўналишлари доирасида бажарилди.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Яримўтказгич кристаллардаги пьезорезистивлик ҳодисаси биринчи марта К.С.Смит томонидан кашф этилган бўлиб, у Ge ва Si кристалларидаги пьезоқаршиликнинг баъзи бир умумий қонуниятларини экспериментал тарзда ўрнатган. Бу қонуниятларни фақат кристаллар энергетик зоналарининг "кўп воҳали" модели ва К.Херринг томонидан ривожлантирилган заряд ташувчиларнинг "оқиб ўтиш эффекти" асосида тушунтириш мумкин бўлди. Кейинчалик пьезоқаршилик эффекти хорижий олимлар, жумладан, Г.Е.Пикус, Г.Л.Бир, Ф.Ж.Морин, С.Раба, Б.Я.Мойжес, Й.В.Илисаковскийлар томонидан назарий жиҳатдан кўриб чиқилган.

Ўзбек физиклари Э.А.Абдуллаев ва Н.Х.Юлдашев, К. М.Дошчанов ва С.Х.Шамирзаев, Ш.Б.Атакулов ва Г.Гулямов ишларида бўйлама электр ўтказувчанликнинг бир ўлчовли потенциал тўсиқ механизмига асосланган поликристалл пленкалардаги тензорезистив эффектнинг феноменологик назарияси маълум даражада ишлаб чиқилган. Бироқ кўрғошин ва висмут халькогенид пленкалар юқори тензосезгирлигининг асосий хусусиятларини

тензорезистивлик ҳодисасининг мавжуд механизмлари доирасида охиригача тушунтириш мумкин эмас.

Юпқа пленкали кристалл структураларнинг умумий электрофизик, оптик ва тензометрик хоссаларини мақсадли комплекс ўрганиш бўйича ишларнинг йўқлиги, шунингдек уларнинг эгри чизикли деформацион характеристикалари пленкали тенздатчикларнинг кенг амалий қўлланилишига тўсқинлик қилмоқда.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация иши Фарғона политехника институтида, фундаментал илмий лойиҳалар, хусусан, Ўзбекистон Фанлар Академияси тадқиқотларни қўллаб-қувватлаш жамғармасининг 80-06 сонли гранти, 2012-2013 йиллар учун "Квант алоқа каналларини ташкил етишнинг поляритон тамойили" ККРНТ 28-сонли шартномаси бўйича грант ва институтнинг 2015-2020 йилларга мўлжалланган "Қўрғошин ва висмут халькогенидларининг яримўтказгич пленкали структураларида деформацион ҳодисалар" мавзуси бўйича истикболли илмий режаси доирасида бажарилган.

Тадқиқот мақсади PbS туридаги кристалллар, поликристалллар, поликристалл пленкалар пьезоқаршилигининг янги механизмларини аниқлаш ва улар асосида барқарор, чизикли деформацион характеристикаларга эга бўлган пленкали тенздатчиклар яратишдан иборат.

Қўйилган мақсадга мувофиқ қуйидаги асосий **вазифалар**ни ҳал қилиш зарур эди:

- PbS турдаги яримўтказгич монокристалллар пьезоқаршилигида "кичик эффектлар"нинг роли ва поликристалллар тензосегирлигининг янги механизмларини тадқиқ қилиш;

- стехиометрияси бузилган қўрғошин халькогенидлари асосидаги поликристалл пленкаларнинг ўзгармас токда бир томонлама статик деформацияланишдаги тензорезистив хоссаларини ўрганиш;

- кучли легирланган $PbTe$, $PbSe$ ва $(Bi_{0.7}Sb_{0.3})_2Te_3$ поликристалл пленкаларни баъзи бир оптик ва тензометрик хоссаларининг корреляцияси ва уларда ўзгарувчан токдаги деформацион ҳодисаларни тадқиқ қилиш.

Тадқиқот объекти рух алдамаси симметрияли PbS , $PbTe$, $PbSe$ соф, легирланган яримўтказгич кристалллар, поликристалллар ҳамда улар ва $(Bi_{0.7}Sb_{0.3})_2Te_3$ асосидаги тензосезгир поликристалл пленкалардан иборат.

Тадқиқот предмети бўлиб PbS туридаги кристалларда пьезорезистив эффектлар ва тензосезгирлиги юқори ($K \approx 10^3$) бўлган поликристалл PbS , $PbTe$, $PbSe$, $(Bi_{0.7}Sb_{0.3})_2Te_3$ пленкалардаги деформацион ва оптик ҳодисалар хизмат қилади.

Тадқиқот усули. Қўйилган масалаларни ечиш учун қаттиқ жисмлар физикаси ва математик физиканинг назарий усуллари, хусусан, кристалллар зоналар назарияси, тензорлар ҳисоби ва гуруҳлар назарияси, хусусий ҳосилали дифференциал тенгламалар ва интеграл ҳисоб, ўзгармас ва ўзгарувчан токда деформацияланган намуналар ВАХни экспериментал

ўлчаш ва Холл ўлчов усуллари, шунингдек, яримўтказгич материалларни тадқиқ қилишнинг оптик-спектроскопик усуллари жалб қилинган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагича:

PbS турдаги монокристалл яримўтказгичлар силжиш m_{44} ва хажмий $(m_{11}+2m_{12}/3)$ эластоқаршилик коэффициентларини заряд ташувчилар эффектив массаси ва тақиқланган зона кенлиги билан боғлиқ "кичик эффектлар"ни инобатга олган ҳолда назарий ҳисоблаш усули ишлаб чиқилди;

илк марта поликристалл яримўтказгичларнинг тензосезгирлигини деформация ва ток йўналишига параллел ҳамда перпендикуляр потенциал тўсиқлар ва сирт ҳолатларга боғлиқ ҳолда назарий ҳисоблаш усули ишлаб чиқилди;

поликристалл пленкалар ВАХи донлараро ринтерфейс орқали ток ўтишининг туннель ва Шоттки механизмлари асосида назарий ҳисобланди ва PbS, PbSe пленкалар ВАХ ларига яхши мос келиши кўрсатилди;

PbTe:Pb поликристалл пленкалар қалинлиги, легирлаш даражаси ва сиқилиш деформацияси ортиши билан донлараро потенциал тўсиқлар пасайиши туфайли Холл ҳаракатчанлиги, заряд ташувчилар концентрацияси ортиши натижасида тензорезистор ВАХининг чизиқлашуви кўрсатилди;

илк марта ностехиометрик кўрғошин ёки теллур билан кучли легрланган PbTe пленкаларнинг ютилиш спектрлари ва деформацион характеристикаларининг узвий корреляцияси ўрнатилди;

$(\text{Bi}_{0.7}\text{Sb}_{0.3})_2\text{Te}_3$ пленкалар қаршилиги ва тензосезгирлигининг циклик деформациялар сони, ўзгарувчан ток такрорлиги ҳамда ҳароратга боғлиқлиги донлараро интерфейс параметрларининг ўзгариши ва янги микроёрилишлар пайдо бўлиши билан изоҳланиши кўрсатилди.

Тадқиқотнинг амалий натижалари: PbS дан ясалган пленкали тензорезисторлар тензосезгирлик коэффициенти хона ҳароратида ва кичик сиқилиш деформацияларда ($\epsilon \approx 0,2 \cdot 10^{-5}$ нисбий бирлик) аномал юқори ($K \approx 4 \cdot 10^3$) қийматларга эришади;

моно- ва поликристалл (прессланган) тензорезисторлардан фарқли ўлароқ, PbS пленкали тензорезисторларидан нисбий деформациянинг кенг қийматлар ($(0,25-50) \cdot 10^{-5}$ нисбий бирлик) интервалида фойдаланса бўлади;

PbS пленкаларининг ўтказувчанлик турини бирламчи шихта таркибини алмаштирмасдан таглик ҳароратини ўзгартириш орқали бошқарса бўлади. Оптимал технологик шароитларда ($T_n \approx 100$ °C ва $d \approx 20$ мкм), пленканинг электр ўтказувчанлиги максимал қийматга эришади ($\sigma \approx 1,5$ (Ом·см)⁻¹), унинг ВАХ чизиқли бўлиб, фақат нисбатан юқори кучланганликлардагина ($E \geq 10$ В/см) ночизиқли ($j \sim E^n$, $n \approx 1,3$) кўринишга ўтади.

Re ϵ_∞ нинг λ^2 га экспериментал боғланиши қиздиришнинг маълум вақт оралиқлари учун инфрақизил спектрнинг узун тўлқинли соҳасида чизиқлидир. Бу чизиқларнинг ордината ўқиға экстраполяцияси пленкаларнинг юқори такрорликли диэлектрик сингдирувчанлиги ϵ_∞ қийматини топишга имкон беради, спектрни тўғри чизиқли қисмининг

қиялигидан эса солиштирма концентрация N/m^* ни аниқлаш мумкин.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги қаттиқ жисмлар физикасининг замонавий назарий ва экспериментал тадқиқ қилиш усулларидан фойдаланилиши, олинган янги натижалар бошқа муаллифларнинг маълум натижаларига мос келиши ва эластоқаршилиқ ҳамда тензосезгирлик коэффициентлари учун топилган аналитик формулалар PbS кристаллари ва $PbSe$ поликристалл пленкалари учун тегишли экспериментал натижаларни сифат жиҳатидан яхши акс эттириши билан асосланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.

Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти кўрғошин ва висмут халькогенидлари асосидаги кристаллар ва поликристалл пленкалар деформацион характеристикаларини ҳисоблаш ва таҳлил қилиш учун тақлиф этилган янги усуллар бошқа кристаллардаги пьезоқаршилиқ ва тензосезгирлик ҳодисалари механизмларини тўғри талқин қилишда, шунингдек ҳар хил қуйи ўлчамли яримўтказгич структураларнинг физик хоссаларини тензометрия усуллари ёрдамида ҳар томонлама ўрганишда фойдаланиш мумкинлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти шундаки, PbS туридаги кристалл ва поликристалл материаллардаги деформацион ва оптик ҳодисаларни таҳлил қилиш учун ишлаб чиқилган назарий ва экспериментал усуллар тензодатчиклар, оптик-механик сенсорлар ва қаттиқ жисмли микроэлектрониканинг бошқа шу каби асбобларини яратиш технологиясини такомиллаштиришга хизмат қилади.

Тадқиқот натижаларини жорий этилиши. PbS туридаги яримўтказгич поликристалл пленкаларининг тензосезгирлик механизмларини тадқиқ қилиш натижалари асосида:

кўрғошин халькогенидларининг моно- ва поликристаллари, поликристалл пленкаларидаги деформацион ҳодисаларни таҳлил қилиш учун ишлаб чиқилган ва яримўтказгич тензорезисторларнинг олиш технологиясини термовакуум буғлатиш усули билан такомиллаштиришга имкон берадиган назарий ва экспериментал усуллари "Ўзэлтехсаноат"нинг "ФОТОН" АЖ да апробациядан ўтказилди (19.06.2020 даги 04-1/1165-сонли маълумотнома). Олинган илмий натижалар Ўзэлтехсаноат муассасаларида қўлланилиши мумкин. Бу илмий янгиликни қўлланилиши сўзсиз яримўтказгич пленкали тензорезисторларни ишлаб чиқариш усулини замонавийлаштиришга олиб келиши аниқланди;

PbS туридаги кристалларнинг эластоқаршилиқ коэффициентларини ва $PbTe:Pb:Te$ поликристалл пленкаларнинг қайтариш ва ютилиш спектрлари ёрдамида электронларнинг кинетик параметрларини назарий ҳисоблаш натижаларидан Ф-2-21 "Яримўтказгич-диэлектрик чегарасидаги сирт ҳолатлар зичлигини аниқлашни математик моделлаштириш " (2012-2016 йй.) мавзусидаги фундаментал лойиҳани бажаришда фойдаланилди (03.06.2020 йилдаги Ўзбекистон Республикаси Олий ва ўрта махсус таълим вазирлигининг 89-03-1887-сонли маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш кучли легирланган яримўтказгичли структуралардаги электрон

кинетик ҳодисаларнинг физик механизмларини ёруғликнинг хусусий ва аралашмали ютилишида таҳлил қилиш имконини берди.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Диссертация ишининг натижалари 6 та халқаро ва 4 та республика илмий-амалий анжуманларда маъруза қилинган ва муҳокамадан ўтган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мавзуси бўйича жами 20 та илмий иш, шу жумладан 10 та мақола Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссияси томонидан диссертация ишларининг илмий натижаларини эълон қилиш учун тавсия этилган журналларда чоп этилган.

Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши. Диссертация кириш, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхатидан иборат. Диссертациянинг ҳажми 7 та жадвал ва 34 расмни ўз ичига олган 137 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Киришда диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурлиги қисқача асослаб берилган, унинг Ўзбекистон Республикасида фан ва технологиялар тараққиётининг асосий устувор йўналишлари билан боғланиши аниқланган, диссертация мавзуси бўйича мавжуд илмий ишлар қисқа таҳлил қилинган ва муаммонинг ўрганилганлик даражаси келтирилган, мақсад ва вазифалар шакллантирилган, тадқиқотнинг объектлари, предметлари ва усуллари ойдинлаштирилган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ёритилган, олинган натижаларнинг ишончлилиги асосланган, уларнинг назарий ва амалий аҳамиятлилиги очиб берилган, иш натижаларининг амалда қўлланилиши ва эълон қилиниши ҳақида маълумотлар келтирилган.

"PbS туридаги тор зонали яримўтказгичларда пьезоқаршилик ҳодисаларини ўрганишнинг ҳозирги ҳолати" номли биринчи бобда тензорезистив эффект ҳақида дастлабки асосий маълумотлар қисқача баён этилган. Кўпвоқали яримўтказгичлардаги пьезоқаршилик ҳодисасининг умумий масалалари, Херрингнинг оқиб ўтиш механизми ва "кичик эффектлар"нинг роли қараб чиқилган. Қаттиқ жисмли пленкалар тензометриясининг долзарб масалаларига оид адабиётларнинг таҳлили келтирилган. Мавжуд адабиётларнинг маълумотларини танқидий таҳлил қилиш асосида диссертация вазифаларининг умумий қўйилиши шакллантирилган.

"PbS туридаги яримўтказгич кристалларда пьезоқаршиликнинг "кичик эффектлари" ва поликристалларнинг тензосезгирлиги" номли иккинчи боб PbS туридаги кўпвоқали яримўтказгич кристаллар эластоқаршилик доимийликларини таъқиқланган зона кенглиги, заряд ташувчиларнинг эффектив массаси, ҳаракатчанлиги ва концентрациясининг механик деформацияга боғланишини ҳисобга олган ҳолда конкрет миқдорий ҳисоблашга бағишланган. PbS туридаги монокристаллар эластоқаршилигининг силжиш m_{44} ва ҳажмий $(m_{11}+2m_{12})/3$ коэффициентлари кучсиз эластик деформациялардаги "кичик эффектлар" ни инобатга олган ҳолда айнамаган

ва айниган ҳолатлар учун ҳисоблаб чиқилган. Хусусан, айниган квант ҳолатда $(m_{11}+2m_{12})/3$ ва $(m_{11}-m_{12})/2$ лар легирлашнинг ҳар қандай даражасида концентрация ва ҳароратга сезиларли боғланиш намоён қилмасдан, электрон ва коваклар ҳаракатчанлигининг анизотропиясига боғлиқ эмаслиги кўрсатилган. Катталиқ m_{44} эса, айнинаган квант ҳолатдаги каби, иккита қисмдан иборат ва фақат ҳароратга қараб кучли ўзгарадиган қисми концентрацияга боғлиқ бўлади.

Маълумки, PbS ва PbSe кристаллар учун пьезоқаршилик ҳодисасини ўрганишда олинган экспериментал натижаларни назарий жиҳатдан тушунтириш қийинчилик туғдиради ва баъзан улар бир-биридан катта фарк қилади. Чунончи, PbSe да эластоқаршиликнинг силжиш коэффициенти m_{44} унга ўхшаш $(m_{11}-m_{12})/2$ константадан сезиларли даражада катта, лекин $\langle 111 \rangle$ - моделига асосланган оқиб ўтиш назариясига зид равишда ҳароратга $\sim 1/T$ боғланишда эмас. Аксинча, PbS да m_{44} катталиқнинг қиймати ҳароратга тескари пропорционал ўзгаради, бироқ унинг қиймати оқиб ўтиш эффекти билан тушунтириш учун жуда кичик. Бундан ташқари, барча кўрғошин халькогенидларда эластоқаршиликнинг $(m_{11}+2m_{12})/3$ ҳажмий коэффициенти $\langle 111 \rangle$ - моделига кўра нолга тенг бўлиши керак бўлган ҳолда сезиларли катта мусбат қийматга эга.

Кўпгина муаллифлар таъкидлашганидек, пьезоқаршиликнинг бу хусусиятлари PbS ва PbSe да ҳаракатчанликнинг кучли анизотропияси йўқлиги ва "кичик эффектлар" билан, биринчи навбатда эффектив массанинг деформацияга қараб ўзгариши билан изоҳланади. Бироқ, ҳозиргача эластоқаршилик константаларининг таъқиқланган зона кенглиги, заряд ташувчилар эффектив массаси, ҳаракатчанлиги ва концентрациясининг механик деформацияга боғланишини эътиборга олиб, конкрет миқдорий ҳисоби ўтказилмаган.

Ўтказувчанлик ва валент зоналари оддий бўлган, уларнинг абсолют экстремумлари биринчи Бриллюэн зонасининг $\langle 111 \rangle$ кристаллографик ўқларининг L нуқталарида жойлашган PbS туридаги айнинаган яримўтказгични қараб чиқамиз. Пьезоқаршилик эффектига зоналарнинг параболик эмаслигидан ва заряд ташувчилар релаксация вақти ҳамда деформацион потенциалларнинг деформация туфайли ўзгаришидан қўшиладиган ҳиссаларни эътиборга олмасдан диссертацияда $m_{11} \equiv m_{11,11}$, $m_{12} \equiv m_{11,22}$ ва $m_{44} \equiv m_{12,12}$ эластоқаршилик константалари учун қуйидаги ифодалар келтириб чиқарилди:

$$\frac{m_{11} + 2m_{12}}{3} = -\frac{Q}{b\eta^0 + 1} E_{g1}, \quad (1)$$

$$\frac{m_{11} - m_{12}}{2} = 0, \quad (2)$$

$$m_{44} = -\frac{1}{3} \frac{1}{b\eta^0 + 1} \left[\frac{1}{kT} \left(b\eta^0 \frac{1 - K_e}{1 + 2K_e} \Xi_{um} - \frac{1 - K_h}{1 + 2K_h} \Xi_{up} \right) \right] + \frac{1}{2E_g} \left[b\eta^0 \left(\frac{1 - K_e}{1 + 2K_e} + \frac{1 - K_h}{1 + 2K_h} \right) (\Xi_{um} - \Xi_{up}) \right]. \quad (3)$$

Бу ерда $\eta^0 = n^0 / p^0$, $b = (\mu_{e,\parallel} + 2\mu_{e,\perp}) / (\mu_{h,\parallel} + 2\mu_{h,\perp})$, $K_e = \mu_{e,\perp} / \mu_{e,\parallel}$, $K_h = \mu_{h,\perp} / \mu_{h,\parallel}$,

$$Q = \frac{1}{kT} \frac{\eta^0}{\eta^0 + 1} (b+1) + \frac{1}{E_g} \left[1 - (b\eta^0 - 1) \frac{\eta^0 - 2}{\eta^0 + 1} \right], E_{g1} = \Xi_{g,d} + \frac{1}{3} \Xi_{g,u},$$

n^0 ва p^0 – деформацияланмаган яримўтказгичдаги электронлар ва коваклар концентрацияси, $\mu_{e,\parallel}$, $\mu_{e,\perp}$ и $\mu_{h,\parallel}$, $\mu_{h,\perp}$ – воҳалар эллипсоид ўқларига нисбатан ҳаракатчанликларининг компонентлари, E_g – таъқиқланган зонанинг кенглиги, $\Xi_{g,d}$, $\Xi_{g,u}$ – Херринг бўйича E_g учун деформация потенциаллари, $\Xi_{um} = D_{\parallel}^c - D_{\perp}^c$, $\Xi_{up} = D_{\parallel}^v - D_{\perp}^v$; D_{\parallel}^c , D_{\perp}^c , D_{\parallel}^v , D_{\perp}^v – эркин ва валент зоналар учун деформация потенциалларининг компонентлари.

Шуни таъкидлаш лозимки, биринчидан, кенг зонали яримўтказгичлар учун шартлар

$$1 \ll b\eta^0 \ll E_g / kT \quad (4)$$

бажарилганда (1) - (3) формулалар Г.Е. Пикус ва Г.Л. Бирнинг маълум формулаларига ўтади. Иккинчидан, константа $(m_{11} + 2m_{12})/3$ ток ташувчилар ҳаракатчанлигининг анизотропиясига боғлиқ эмас ва $\eta^0 \gg 1$, $\eta^0 \ll 1$ чегаравий ҳолатларда бир хил E_{g1}/E_g қийматга тенг, ишорасини ўзгартирмайди. Константа m_{44} электрон ва коваклар ҳаракатчанлигининг анизотроплигига боғлиқ, агар $K_e = K_h = 1$ бўлса, $m_{44} \equiv 0$ га тенг. Учинчидан, торзонали яримўтказгичлар учун Ферми айниш йўқлигида маълум тажрибаларга мос ҳолда, эластоқаршилиқнинг иккала константаси ҳам сезиларли даражада концентрацияга (η^0) ва T ҳароратга боғлиқ, ва умумий ҳолда уларни икки ҳаднинг йиғиндиси сифатида тасаввур қилиш мумкин, улардан бири ҳароратга кучсиз боғлиқ, бошқаси эса ҳароратга тескари пропорционал бўлади. Агар

$$b\eta^0 \gg \frac{E_g}{kT}, \quad (5)$$

шарт бажарилса, $\frac{m_{11} + 2m_{12}}{3}$ катталиқ ҳароратга деярли боғлиқ бўлмайди.

Бундай ҳолат $b\eta^0 \gg 1$, $|\Xi_{up} / \Xi_{um}| \gg 2E_g / kT$ (6)

шартларда константа m_{44} учун ҳам содир бўлади. Ушбу шартлардан биринчи ва иккинчисини амалда ҳар доим қаноатлантириш мумкин, учинчиси эса – анча қийин ва PbS яримўтказгич учун ҳар ҳолда бажарса бўлади.

Шунингдек, 2-бобда поликристалл яримўтказгичлар тензосезгирлик коэффициентининг кристалл донлар деформациясида ҳам бўйлама, ҳам кўндаланг потенциал тўсиқларнинг ток йўналишига кўндаланг сиртолди фазовий зарядлар соҳасининг модуляцияси билан боғлиқ ҳиссасини инобатга олувчи назарий ҳисоби бажарилган. Бунда кўндаланг потенциал тўсиқлар шаклланишида иштирок этадиган сирт ҳолатлар таъсирига кўпроқ эътибор қаратилган.

Соддалиқ учун куб шаклидаги кристалл донни олти ёқдан қамраб олган диэлектрик қатлам интерфейслар билан бирга қараб чиқамиз. PbS туридаги поликристалл уч OX , OY ва OZ фазовий йўналишда айнан бир хил пара-

метрли куб кристаллитларнинг даврий жойлашувидан ҳосил бўлган деб ҳисоблаймиз. У ҳолда поликристаллнинг тўла қаршилиги-импеданси

$$Z = r^0 \cdot Z_0, \quad (7)$$

формула билан аниқланади. Бу ерда $r^0 = Ld/ab$; L , a ва b - поликристалл намунанинг узунлиги, кенлиги ва баландлиги; $d = l_0 + d_0$, l_0 ва d_0 - кристаллитнинг чизиқли ўлчами ва диэлектрик қатлам кенлиги; Z_0 - битта кристаллит-ячейканинг импеданси. Поликристалл яримўтказгичнинг принципиал электр схемаси асосида Z_0 импеданс ҳисобланган

$$Z_0 = (2R_{D\parallel}^{-1} + Z_{kp}^{-1})^{-1} + Z_{D\perp}, \quad (8)$$

бу ерда $R_{D\parallel}$, $Z_{D\perp}$ - бўйлама ва кўндаланг диэлектрик қатламларнинг (КДҚ) қаршилиги ва импеданси, Z_{kp} - кристаллитнинг импеданси;

$$Z_{D\perp} = (R_{D\perp} + i\omega C_{D\perp} R_{D\perp}^2) / (1 + (\omega C_{D\perp} R_{D\perp})^2), \quad (9)$$

бу ерда $i = \sqrt{-1}$, ω - таъминлаш кучланишининг циклик такрорлиги; $R_{D\perp}$ - актив қаршилиқ; $C_{D\perp}$ - КДҚ электр сифими;

$$Z_{kp} = (2/R_1 + 1/Z_2 + 2/R_3)^{-1} = (1/Z_2 + 4/R_1)^{-1}, \quad (10)$$

бу ерда $R_1 = R_{11} + R_{12} + R_{13}$, $R_3 = R_{31} + R_{32} + R_{33}$, бунда $R_1 = R_3$. $R_{\alpha\beta}$ - бўйлама фазовий зарядлар соҳаси (ФЗС) нинг тегишли характерли қисмининг актив қаршилиги ($\alpha, \beta = 1, 2, 3$);

$$Z_2 = R_{o\beta} + (R_{21} + i\omega C_{21} R_{21}^2) / (1 + (\omega C_{21} R_{21})^2) + (R_{23} + i\omega C_{23} R_{23}^2) / (1 + (\omega C_{23} R_{23})^2), \quad (11)$$

бу ерда $R_{o\beta} = R_{22}$ - кристаллит квазинейтрал ҳажмининг қаршилиги; C_{21}, C_{22} и R_{21}, R_{23} - кўндаланг ФЗС тегишли сифим ва актив қаршиликлари;

Ушбу моделга кўра поликристаллардаги тензоэффект нафақат ҳажмий ($R_{o\beta}$) ва сиртбўйи ($R_{\alpha\beta}$) пьезоқаршилиқлар, балки $R_{o\beta}$ ва $R_{\alpha\beta}$ ларнинг сезиларли даражада ўзгаришларига олиб келадиган сирт ҳолатлари (СХ) нинг қайта зарядланиши туфайли ҳам содир бўлади. Поликристалларнинг бир ўкли деформациясидаги тензосезгирлиги кўп жиҳатдан заряд ташувчиларнинг бўйлама СХ дан кўндаланг СХ га ёки аксинча оқиб ўтиш жараёнлари билан аниқланади. Бу механизм торзонали поликристалл яримўтказгичлар пьезоқаршилигининг асосий механизмларидан биридир, чунки уларнинг электр ўтказувчанлигида сирт ҳолатлар жуда муҳим роль ўйнайди. $R_{\alpha\beta}$

ларни ҳисоблаш учун бўйлама ва кўндаланг потенциал тўсиқларнинг $L_{D\parallel}, L_{D\perp}, \varphi_{S\parallel}$ ва $\varphi_{S\perp}$ каби параметрларини билиш керак. Улар сирт ҳолатларнинг фаоллашиш энергияси ва концентрацияси, легирлаш даражаси ва деформацияга, $L_{D\perp}$ ва $\varphi_{S\perp}$ лар эса, шунингдек, ток зичлиги j га ҳам боғлиқ

бўлган катталардир.

Поликристаллнинг пьезоқаршилигига квазинейтрал хажмлар, бўйлама ва кўндаланг потенциал тўсиқ соҳалари қўшадиган тегишли парциал ҳиссаларни аниқлайдиган тензосезгирлик коэффициентлари $K_{об}$, $K_{об\perp}$ ва $K_{об\parallel}$ ҳисоблаб чиқилган:

$$K = K_{об} + K_{об\perp} + K_{об\parallel}, \quad K_{об} = 1 + 2\nu + \bar{m} + K_{зем.}^S, \quad (12)$$

$$\text{бу ерда} \quad K_{зем.}^S = d(L_{D\parallel}^+ + L_{D\parallel}^- + 4L_{D\perp}) / \ell_0 d\varepsilon \quad (13)$$

сирт ҳолатларининг қайта зарядланиши натижасида бўйлама ва кўндаланг ФЗС лар геометрик ўлчамларининг модуляцияси туфайли қўшилаётган ҳисса; ν - кристаллит учун Пуассон коэффициенти; \bar{m} - $(m_1 + m_2)/2$ ни фазовий йўналишлар бўйича ўртачалаш билан олинган эластоқаршилиқ доимийси.

$$K_{об\perp} = \left[1 + 2\nu + \bar{m} + df_{+-} / f_{+-} d\varepsilon \right] R_{кр} f^{\pm} / R_{об\perp} + 1 + 2\nu_D + m_D + \\ + \left[\exp\left(-2\sqrt{2m_n^*} \left(\sqrt{W_S - E_F} \varepsilon_2 + \Delta W_S / \sqrt{W_S - E_F}\right) d_0 / \hbar\right) \right] R_{D\perp} / R_{об\perp}, \quad (14)$$

$$K_{об\parallel} = 1 + 2\nu + \bar{m} - df_1 / f_1 d\varepsilon, \quad (15)$$

$$f_{+-} = f^+ + f^-, \quad f^{\pm} = \left(L_s / \ell_0 (1 - \lambda_{D\perp})^2 \right) \int_{Y_{S\parallel}}^0 F^{-1}(\lambda, Y) dY / (\exp Y \pm \lambda^{-2} \exp(-Y)),$$

$$f_1 = (L_s / \ell_0) \int_{Y_{S\perp}}^0 (\exp Y + \lambda^2 \exp(-Y)) dY / F(\lambda, Y), \quad F(\lambda, Y) = \sqrt{\lambda(e^Y - 1) - \lambda^{-1}(e^{-Y} - 1) + (\lambda^{-1} - \lambda)},$$

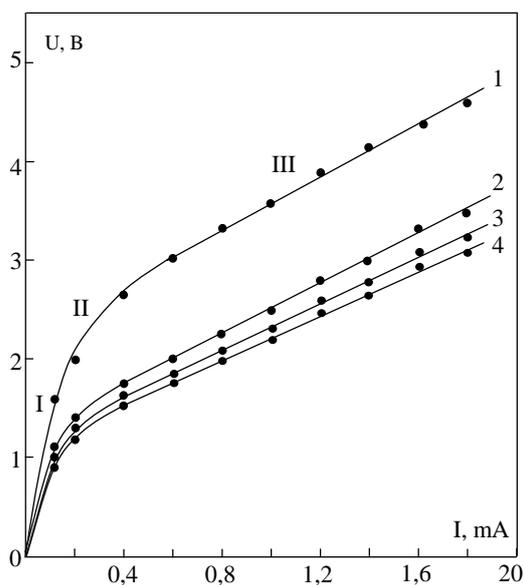
Бу ерда $L_s = \sqrt{2\pi\varepsilon_{II} kT / e^2 n_i}$ - Дебай экранлаш кенглиги, $\lambda = n_0 / n_i = n_i / p_0$, ν_D ва m_D - диэлектрик учун Пуассон коэффициенти ва эластоқаршилиқ доимийси; ΔW_S - бир ўқли деформацияда кристаллитнинг диэлектрик қатлам билан чегарасида потенциал тўсиқ баландлигининг ўзгариши (ΔW_S), ε_2 - кўндаланг диэлектрик қатламидаги нисбий деформация қиймати, \hbar - Планк доимийси.

"Стехиометрияси бузилган кўрғошин халькогенидлари поликристалл пленкаларининг ўзгармас ток ва бир томонлама статик деформациядаги тензометрик хоссалари" деб номланган учинчи бобда *n-PbS*, стехиометрияси бузилган *PbTe* ва *PbSe* поликристалл пленкаларининг легирлаш даражасига боғлиқ тензометрик характеристикаларини ўрганиш бўйича экспериментал тадқиқот натижалари келтирилган. Хусусан, деформациянинг ВАХ, Холл эффекти, электр ўтказувчанлик ва тензометрик параметрларга таъсирини, шунингдек, технологик факторлар ролини аниқлаш бўйича ўтказилган тажриба маълумотлари баён қилинган. Ток ўтказишнинг туннель ва Шоттки механизмлари асосида юпқа поликристалл

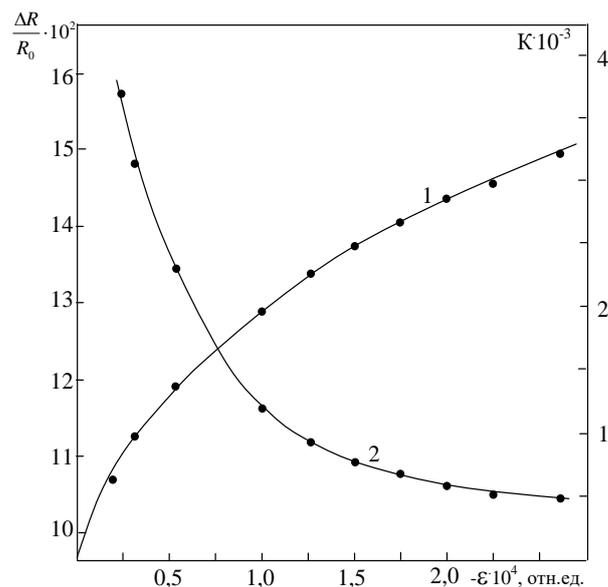
пленкалар ВАХ ва тензосезгирлигининг назарий ҳисоби бажарилган, экспериментал натижалар муҳокама қилинган.

Қалинлиги $h \approx 10 \text{ мкм}$ бўлган поликристалл $n\text{-PbS}$ пленкалар квазиберк ҳажмда қолдиқ буғларнинг ($10^{-2}\text{-}10^{-3}$ Па босимида ($T=333\text{-}393$ К) ҳароратли полиамид тагликда очиқ термик буғлатиш йўли билан ўстирилган. Пленкаларнинг электрофизик хоссаларини дастлабки экспериментал тадқиқотлари адабиётлардан маълум ишларнинг натижаларини сифат жиҳатдан тасдиқлади. Хусусан, ток ташувчиларнинг Холл ҳаракатчанлиги тагликнинг ҳарорати ва буғлатиш тезлигининг ўсиб бориши билан ортади, заряд ташувчиларнинг Холл концентрацияси эса бу технологик параметрларга деярли боғлиқ эмас, конденсирланган қатламнинг $0 < h \leq 6 \text{ мкм}$ қийматлар соҳасидаги қалинлиги пленкаларнинг электр хусусиятларини тўлиқ белгилайди. h ўсиши билан ток ташувчиларнинг ҳаракатчанлиги ортади, уларнинг концентрацияси монотон бўлмаган ҳолда ўзгаради, ТСК аввал ортади, сўнгра $h \geq 6 \text{ мкм}$ да тўйинишга чиқади. Янги тайёрланган пленкаларга атмосфера ҳавосида ёки S нинг буғларида термик ишлов бериш пленкаларнинг электр ва тензометрик хоссаларини барқарорлаштиради.

1-расмда нисбатан юқори қаршиликли PbS дан тайёрланган пленкали тензорезисторнинг бир ўқли сиқилиш деформациясининг ҳар хил қийматлардаги ВАХ лари келтирилган. Расмдан кўринадики, $U(I)$ эгри чизиқлари нисбий деформация мутлақ қийматининг ўсиши билан ордината



1-расм. PbS пленкали тензорезисторнинг сиқилиш деформациясининг турли қийматларидаги ВАХлари ($-\varepsilon \cdot 10^5$: 1-0; 2-7,5; 3-15; 4-25 нис.бир. $n = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $T=300 \text{ К}$).



2-расм. $n=5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ бўлган $n\text{-PbS}$ пленкали тензорезистор учун $|\Delta R/R_0|$ (1 чизиқ) ва ТСК (2) ларнинг сиқилиш деформациясига боғлиқлиги. $T=300 \text{ К}$.

ўқи бўйича пастга силжийди, бу эса сиқилиш пайтида пленканинг қаршилиги камаяётганидан дарак беради. Ҳар бир ВАХ эгри чизиғида учта характерли қисмларни ажратиш мумкин: чизиқли (I, III) ва ночизиқли II соҳалар. Таъкидлаш лозимки, ВАХ нинг бошланғич чизиқли I қисмидан бошқа III чизиқли қисмига ўтишнинг ночизиқли II соҳаси $|\varepsilon|$ ортиши билан тораяди, ва шу вақтда пленкада кучланиш U тушишининг кичик қийматлар соҳасига сурилади.

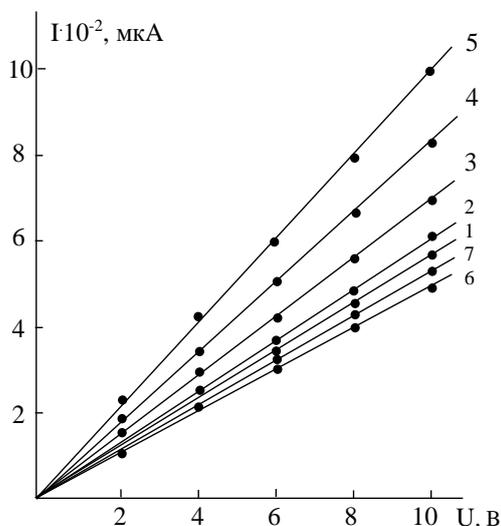
Кучланишнинг $U=U_{\dot{y}m}$ қиймати пленканинг юқориомли ҳолатдан пастомлироқ ҳолатга ўтишини характерлайди. Бир томонлама чўзилиш деформациясида ε нинг ўсиши билан $U_{\dot{y}m}$ катталиги орта боради. *PbS* поликристалл пленкалар ВАХ ининг бундай ўзига хос хусусияти торзонали яримўтказгичлар асосидаги шу каби пленкали структуралар учун умумийдир ва уларда микронуксонлар ҳамда улар билан боғлиқ потенциал тўсиқлар мавжудлигини намоён этади.

$n=5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ концентрацияли *n-PbS* дан тайёрланган пленкали тензорезистор қаршилигининг нисбий ўзгариши $|\Delta R/R_0|$ ва ТСК ларининг ε га боғлиқлиги 2-расмда кўрсатилган. 1 эгри чизиқ нисбий қаршилиқнинг ўзгаришини, 2 эгри чизиқ эса $K = f(\varepsilon)$ боғланишни тасвирлайди. Иккала эгри чизиқ ҳам ташқи манбанинг кучланиши $U > U_{\dot{y}m}$ бўлган хол учун олинган. Расмдан кўриниб турибдики, юқорида кўрсатилган электронлар концентрациясида *PbS* дан тайёрланган пленкали тензорезисторларнинг ТСК си $\varepsilon \approx -10^{-5}$ нисб.бир. кичик қийматлар соҳасида 4000 гача этади ва сиқилиш деформация даражаси ўсиши билан пасаяди. Нисбий деформациянинг $-(1-3) \cdot 10^{-4}$ нисб. бир. оралиғида $f(\varepsilon)$ боғланиш бир текис камаяди ва амалда $K \approx 5 \cdot 10^2$ га тенг бўлиб ўзгармай қолади.

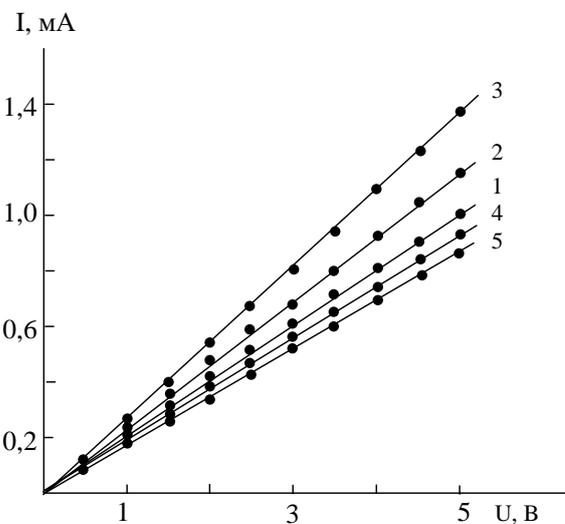
Конденсирланган қатламнинг оптимал фазавий ва кимёвий таркибини ўрнатиш, турғун параметрли ҳамда чизиқли деформацион характеристикали тензорезистив пленкаларни олиш мақсадида стехиоетрик *Pb* ёки *Te* кўшилмалар билан легирланган *PbTe* дан ясалган намуналар тадқиқотига эътибор қаратилди. 3-5-расмларда стехиоетрик таркибга яқин *n*-турли *PbTe*, ортиқча $\Delta Pb = 0,2$ масс. % кўрғошинли *PbTe:Pb* ва ортиқча $\Delta Te = 2,8$ масс.% теллурли *PbTe:Te* пленкаларининг ҳар хил нисбий ($0,33 \cdot 10^{-3} \div 1,32 \cdot 10^{-3}$ нис.бир) деформациялардаги ВАХ лари келтирилган.

Аввало, шуни таъкидлаш керакки, *PbTe* ва *PbTe:Pb* пленкалари учун барча графиклар деформация мавжудлигида ҳам, йўқлигида ҳам тўғри чизиқлидир. Бу сиқилиш ва чўзилиш деформацияси пленкада ўзининг электр фаоллигини кўйилган механик кучланишнинг ортишига қараб ўзгартирадиган "марказлар" ҳосил қилмаслигидан далолат беради. Ностехиоетрик *Pb* кўшилма пленка электр ўтказувчанлигининг стехиоетрик таркибга нисбатан ўсишига олиб келади. Бунда сиқилиш ўтказувчанликнинг ўсиши (3 эгри чизиқ), чўзилиш эса унинг камайиши (4,5 эгри чизиқлар) билан бирга содир бўлади. Бу, эҳтимол, деформация таъсирида таъқиқланган зона кенглигининг ўзгариши заряд ташувчилар концентрациясининг ўзгаришига олиб келиши билан боғлиқдир.

Te қўшилманинг *PbTe* пленкасидаги миқдорини оширилиши ВАХ нинг $U \geq 6$ В лар соҳасида чизиклиликдан қисман четланишга олиб келади (5- расм). Қўйилган кучланишнинг ортиши билан ўтказувчанлик секин камаяди. Бу, эҳтимол, стехиометриядан ортиқча *Te* нинг мавжудлигидан ёки *Te* нинг алоҳида яримўтказгич фазасининг ажралиб чиқишидан ҳосил бўлган нуқсонларда электронлар сочилишининг ортиб кетиши билан боғлиқдир.



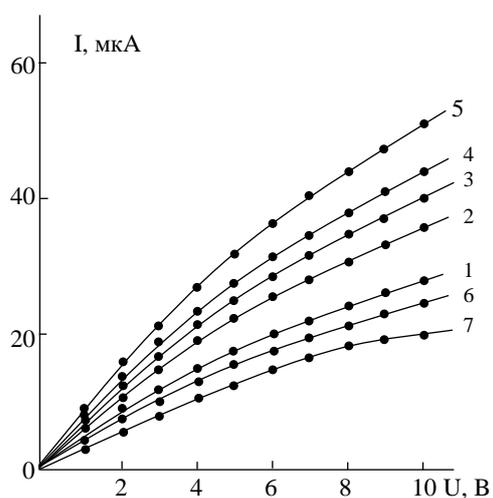
3-расм. Стехиометрик таркибли *PbTe* пленкасининг ВАХ лари; 1- деформациясиз; 2-5-сиқилишда; 6-7-чўзилишда. $n=4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.



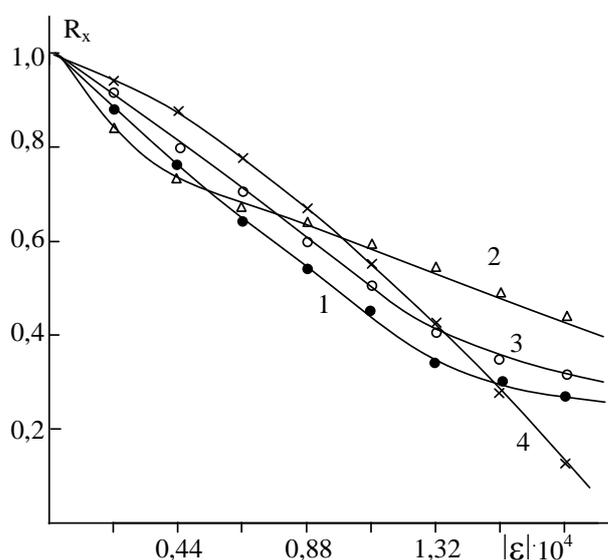
4-расм. Ортиқча $\Delta Pb = 0,2$ масс. % кўрғошинли *PbTe* пленкасининг сиқилиш (1,2) ва чўзилиш (4,5) деформацияларининг ҳар хил даражаларидаги ВАХ лари.

Кучланганлиги $H=6 \cdot 10^3$ Э магнит майдонидаги Холл ўлчовлари қоғоз тагликда тайёрланган барча *PbTe:Te* пленкалари электр ўтказувчанлик турини ўзгартирмаслигини кўрсатди. Нисбий сиқилиш деформацияси $\varepsilon=1,76 \cdot 10^{-4}$ нисб. бир. гача орттирилганда Холл доимийси R_x кучли камайишга учрайди. Камайиш даражаси пленка қалинлигига кучсиз боғлиқ (6-расм). Бу эса Холл коэффицентининг камайиши асосан сиқилиш деформациясига қараб заряд ташувчилар концентрацияси ортиб бориши ҳисобига содир бўлаётганлигидан дарак беради.

PbTe пленкаси стехиометриясининг *Pb* ёки *Te* қўшимчалари сабабли бузилиши, табиий, кристалл доначалар чегарасидаги потенциал тўсиқ баландлигининг ўзгаришига олиб келади. 1-жадвалда $\sigma = \sigma_0 \exp(-\Delta E_a / kT)$ формула ёрдамида *PbTe* учун *Pb* ва *Te* қўшимчаларнинг турли қийматларида активлашиш $\Delta \varepsilon_a = \varphi_{\text{эфф}}$ энергиясининг экспериментал аниқланган қийматлари келтирилган. Кўринадикки *Te* қўшимчаси кристаллитлар орасидаги потенциал тўсиқларнинг ўсишига олиб келади. Агар бирламчи материал n- турда бўлса, у ҳолда $\varphi_{\text{эфф}}$ нинг ўсиши қўшимча *Te* ўзини акцептор сифатида тутаётганини, яъни эркин электронларни бирлаштириб олиб, улар учун потенциал тўсиқни ошираётганлигини билдиради. Аксинча, *Pb* нинг ностехиометрик қўшимчалари ўзларини донор каби тутади, улар ўзларининг суст боғланган электронларини кристаллитнинг ўтказувчанлик зонасига беради ва шу йўл



5-расм. Ортиқча $\Delta Te=2,8$ масс.% миқдорли $PbTe$ пленкасининг ВАХ лари; 1 эгри чизик – деформациясиз; 2-5–сиқилишда; 6,7–чўзилишда.



6-расм. $PbTe:Te$ пленкаларида Холл коэффициентининг бир ўқли сиқилиш деформациясига боғлиқлиги. Пленка қалинлиги d , мкм: 1-5; 2-7; 3-9; 4-11.

билан потенциал тўсиқни ва фаоллашиш энергиясини камайтиради. Демак, кристаллитлар билан интерфейс орасидаги дастлабки потенциал тўсиқлар беркитувчи қатлам ҳосил қилади.

1-жадвал

$PbTe$ учун ўказувчанлик фаоллашув энергиясининг ΔTe ва ΔPb га боғланиши.

Te кўшимчаси, масс. %	ΔE_a , эВ	Pb кўшимчаси, масс. %	ΔE_a , эВ
0,8	0,085	0	0,080
1,8	0,090	0,2	0,090
2,8	0,095	1,2	0,040
3,8	0,105	2,2	0,015
4.8	0,12	3,2	-

Диссертацияда $PbTe$ пленкасидаги кўрғошин миқдорининг ошиши Te кўшимчасига нисбатан ТСК ини камайтириши ва унинг ҳароратга боғланишини пасайтириши, бу эса $PbTe$ поликристалл пленкасида Pb ва Te кўшимчаларнинг турлича роли ва фаоллиги билан изоҳланиши кўрсатилган.

2-жадвалда ҳар хил d қалинликдаги $PbSe$ пленкалари учун Холл коэффициенти R_x , ҳаракатчанлиги ($R_x \sigma$) ва заряд ташувчилар p концентрациясининг чўзилиш деформацияси даражасига боғлиқ ҳолда Холл эффекти ва электроўтказувчанлик усуллари билан ўлчанган эффектив кийматлари келтирилган. Кўриниб турибдики, $d \approx 10$ мкм да ТСК максимумга эришади, бунда ҳаракатчанлик чўзилиш даражасига боғлиқ равишда дастлаб камаяди, сўнгра сезиларли ошади, электр ўтказувчанлик 8 марта ортади.

2-жадвал

$PbSe$ пленка параметрларининг қалинлик d ва деформация ϵ га боғланиши.

№	$\varepsilon, 10^{-4}$	d, мкм	$R_{x\sigma}, \text{см}^3/\text{Кл}$	$\sigma, (\text{Ом}\cdot\text{см})^{-1}$	$R_{x\sigma}, \text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	$P \cdot 10^{-16}, \text{см}^{-3}$	d (мкм)	$R_{x\sigma}, \text{см}^3/\text{Кл}$	$\sigma, (\text{Ом}\cdot\text{см})^{-1}$	$R_{x\sigma}, \text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	$P \cdot 10^{-16}, \text{см}^{-3}$	d (мкм)	$R_{x\sigma}, \text{см}^3/\text{Кл}$	$\sigma, (\text{Ом}\cdot\text{см})^{-1}$	$R_{x\sigma}, \text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	$P \cdot 10^{-16}, \text{см}^{-3}$
1	0		230,7	0,36	84	32		166	0,58	96,9	4,5		158,9	1,47	4,6	232,3
2	1,75		179,4	0,37	66,4	4,1		118	0,6	77,8	6,2		149,4	1,5	4,9	228
3	3,55	5	133,2	0,38	50,6	5,5	10	97,4	0,62	60	7,5	17	100,8	1,6	7,3	159
4	5,25		56,2	0,4	22,4	13		75	1,6	123	9,6		72,7	1,65	10,1	120
5	7		12,4	0,41	5,04	59		54	5,1	271	13,6		56,7	1,71	15,7	80

3.4-параграфда кетма-кет уланган яримўтказгич-диэлектрик-яримўтказгич қатламлар (ЯДЯ-структуралар) дан иборат чизикли занжир сифатидаги поликристалл яримўтказгич пленканинг модели асосида ВАХ ва ТСКнинг назарий ҳисоби бажарилган. Соддалик учун диэлектрик қатламнинг иккала томонидаги ярим ўтказгичларни бир хил деб ҳисоблаймиз. Яримўтказгич ва диэлектрикнинг бутунлай бошқача параметрлари (электронга ўчлик χ , таъқиқланган зонанинг кенглиги ε_g ва ҳоказо) уларнинг бўлиниш чегарасидаги энергетик зоналарнинг сакраб ўзгаришига олиб келади. Бўлиниш чегарасидаги потенциал сакрашнинг қиймати χ_{II} и χ_D катталиклар билан аниқланади $\Delta E_c = \phi_s = \chi_{II} - \chi_D$. Структура орқали ўтадиган асосий бўлмаган заряд ташувчиларнинг оқимларини ҳисобга олмаймиз. Шунингдек ФЗС ва диэлектрикдаги заряд ташувчилар генерацияси ва рекомбинациясини ҳам эътиборга олинмайди. Заряд ташувчилар кўчирилишини ФЗС қатламлари орқали диод назарияси, диэлектрик қатлам орқали эса туннель ва шоттки механизмлари бўйича қараймиз. Структурадан оқиб ўтаётган электр тоқининг зичлиги $j = j_T + j_{III}$ га тенг. Диссертацияда j_T ва j_{III} лар учун қуйидаги ифодалар олинган:

$$j_T = j_s \exp(-\Theta_0^{(1)}(U)) \cdot \left[\exp \frac{2qU}{\kappa T} - 1 \right], \quad (16)$$

$$j_{III} = j_s \cdot \exp \left[-\frac{\phi_s + qU}{\kappa T} \right] \cdot \left(\exp \frac{2qU}{\kappa T} - 1 \right), \quad (17)$$

бу ерда

$$j_s = \frac{1}{4} q n_0 \bar{v} \exp \left(-\frac{\phi_0}{\kappa T} \right), \quad \Theta_0^{(1)}(U) = \sigma \lambda u_{\max}^{1/2} + \frac{qU + \beta^2 \phi_0 U^2}{\kappa T}, \quad \sigma = 2\sqrt{2m_n^*} / \hbar,$$

$$\chi = \frac{\varepsilon_D N_A}{\varepsilon_{II} N_D}, \quad \beta = \frac{2q}{A\lambda^2} \cdot \frac{1}{1+\chi}, \quad A = \frac{4\pi q^2}{\varepsilon_D} N_A, \quad \bar{v} = \sqrt{\frac{8\kappa T}{\pi m_n^*}},$$

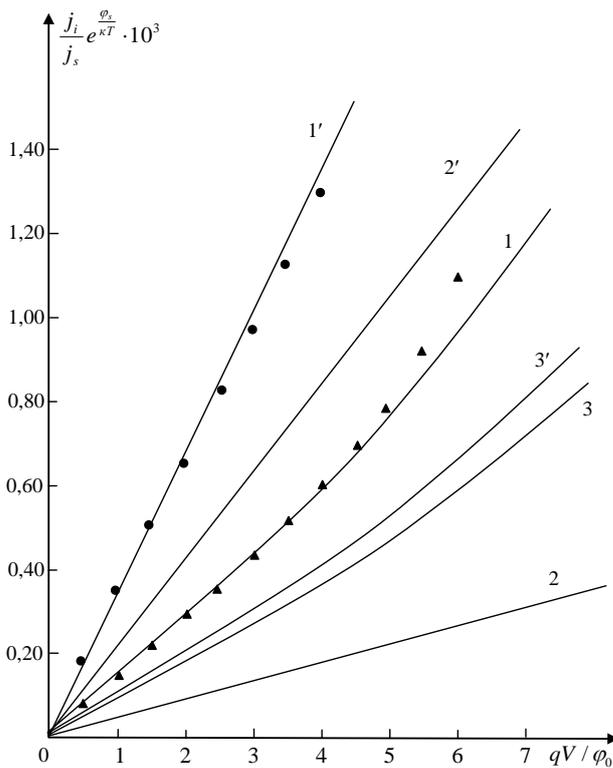
q , m_n^* и n_0 - электрон заряди, эффектив массаси ва концентрацияси, ϕ_0 - ФЗС потенциал тўсиғининг дастлабки мувозанат ҳолатдаги максимал баландлиги.

7-расмда ЯДЯ структуралари орқали ўтадиган тўла (1 чизик), туннель (2) ва Шоттки (3) тоқлари учун назарий ВАХ лар кўрсатилган. Кўришиб турибдики, 1 назарий эгри чизик $PbSe$ пленкасининг ($T_n=100$ °C ва $d \approx 10$ мкм)

экспериментал ВАХ чизиғини (учбурчаклар) сифат жиҳатдан яхши такрорляпти. 1, 2 ва 3 назарий эгри чизикларни таққослашдан хулоса қиламизки, ВАХ нинг юқори кучланишлар соҳасида юзага чиқадиган эгри чизиклиги асосан интерфейс орқали ўтадиган Шоттки токининг ҳиссасига тўғри келади. Шундай қилиб, поликристалл яримўтказгич пленкаларнинг ВАХ ини ҳисоблашнинг ривожлантирилган назарияси экспериментал эгри чизикларининг асосий хусусиятларини сифатли тўғри акс эттиради. 7-расмдаги сонли ҳисоблашнинг танланган параметрлари учун КТЧ нинг қуйидаги қийматлари олинган:

$$K_T = \frac{j_T^\varepsilon - j_T}{j_T \cdot \varepsilon} \approx 5 \cdot 10^2, \quad K_{ш} = \frac{j_{ш}^\varepsilon - j_{ш}}{j_{ш} \cdot \varepsilon} \approx 10, \quad K = \frac{j^\varepsilon - j}{j \cdot \varepsilon} \approx 4 \cdot 10^2. \quad (18)$$

КТЧ ни бундай қўпол баҳолаш PbS, PbTe ва PbS бўйича олинган экспериментал натижалар билан яхши тўғри келади.



7-расм. PbSe пленкаси параметрлари учун назарий ҳисобланган (узлуксиз чизиклар) ва экспериментал (учбурчаклар ва доирачалар) ВАХ лар.

диэлектрик сингдирувчанликлари, уларнинг ўзгарувчан токдаги деформацион характеристикалари ва шунингдек, уларга ишораси ўзгарувчан циклик механик деформация таъсирининг қиёсий тадқиқот натижалари баён қилинган.

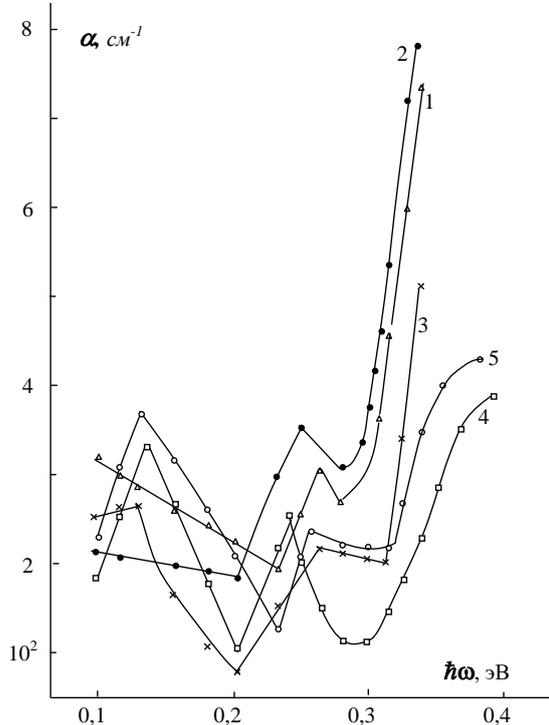
8 ва 9-расмларда PbTe:Te ва PbTe:Pb пленкаларининг ютилиш спектрлари келтирилган. Кўриниб турибдики, барча намуналар учун фундаментал ва аралашмали ютилишнинг аниқ спектрал соҳалари мавжуд. ИҚ фотонларнинг $\hbar\omega \approx E_g$ энергиясида заряд ташувчиларнинг зоналараро

7-расмда (16) ва (17) формулалар билан ҳисобланган назарий (1 чизик) ва экспериментал (доирачалар) ВАХ лар таққосланган. 1,2 ва 3 чизиклар $j(U)$, $j_T(U)$ ва $j_{ш}(U)$ назарий боғланишлардир ($\varepsilon=0$); 1', 2' ва 3' - ўша боғланишлар сиқилиш деформацияси $\varepsilon \approx -1.0 \cdot 10^{-2}$ нис.бир. қийматига мос келади. ВАХ нинг чизикли қисмида назария билан тажриба яхши мос келишини ва эгри чизикли қисмида кичик (5-7%) четлашишни кўришимиз мумкин.

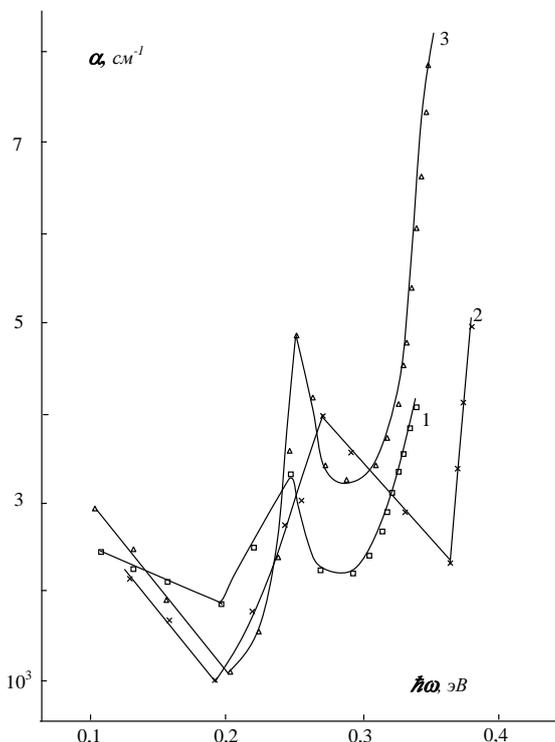
Диссертациянинг "Кучли легирланган поликристалл пленкаларнинг баъзи бир оптик хоссалари ва уларда ўзгарувчан токдаги деформацион ходисаларни тадқиқ қилиш" номли тўртинчи бобида кучли легирланган PbTe:Pb:Te, PbSe поликристалл пленкалар намуналарининг ютилиш ва қайтариш спектрлари,

оптик ўтишлари билан боғлиқ $\alpha \sim (\hbar\omega - E_g)^{1/2}$ ютилишининг кескин ортиши кузатилади. *PbTe:Te* пленкалари учун $\alpha^2(\omega)$ тўғри чизиқлар давомининг абцисса ўқи

билан кесишмасига мос энергия 0,29-0,33 эВ оралиғида жойлашган. Ортиқча 0,2 ва 2,2 мас.% кўрғошинли *PbTe:Pb* пленкаларида $\alpha^2(\omega)$ тўғри чизиғи абциссалар ўқида $\hbar\omega \approx 0,32$ эВ қийматни кесиб олади, бу *PbTe* монокристаллининг таъқиқланган зонаси оптик кенглиги билан деярли бир хил.



8-расм. Ортиқча теллури *PbSe:Te* пленканинг ютилиш спектрлари, ΔTe масса %: 1-0; 2-0,8; 3-1,8; 4-2,8; 5-3,8.



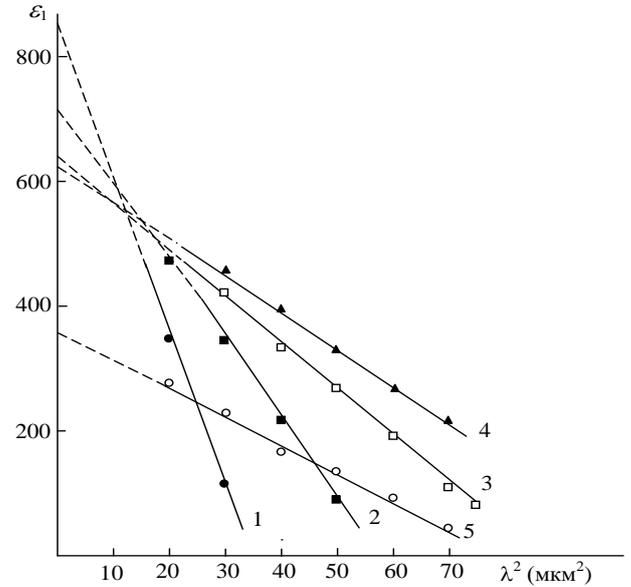
9-расм. *PbSe:Pb* пленканинг ютилиш спектрлари, ΔPb масса %: 1-0,2; 2-1,2; 3-2,2.

Ортиқча кўрғошин 1,2 масса % бўлганда хусусий ютилиш спектрининг чегараси легирланмаган намуналарнинг спектрига нисбатан қисқароқ тўлқинлар соҳасига сурилади. *PbTe:Te* ва *PbTe:Pb* пленкаларининг спектрларидаги $\hbar\omega \approx (0,24 \pm 0,02)$ эВ яқинидаги максимумлар пленкаларда кислороднинг борлиги билан боғланган, бу бошқа муаллифларнинг ишлари билан ҳам тасдиқланади. Ортиқча (1,8÷3,8) масса % теллури *PbTe:Te* нинг спектрларидаги $\hbar\omega \approx 0,13$ эВ энергиядаги кўшимча максимум эса эркин теллурунинг борлиги билан изоҳланади.

Маълумки, *PbTe* да эркин заряд ташувчилар томонидан ёруғликнинг энергетик зона ичида ютилишида $\alpha \sim \omega^a$ боғланиш ўринли бўлади. Бу ҳолда шу нарса аниқландики, агар заряд ташувчиларнинг концентрацияси $n < 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ бўлса, сочилишнинг устивор механизми – бу панжаранинг оптик тебранишларидаги сочиладир ва $a=3$. Агар $n > 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ бўлса, у ҳолда заряд ташувчилар асосан панжаранинг акустик тебранишларида сочилади ва

$a \approx 1,5$. $PbTe:Te$ ва $PbTe:Pb$ пленкалар ютилиш спектрларида топилган бу хусусиятлар тадқиқ қилинаётган пленкаларнинг структурасида ва таркибида баъзи бир фарқлар мавжудлигини кўрсатади, бу эса олдинроқ III бобда ушбу пленкаларнинг тензометрик параметрларини ўлчашда олинган маълумотлар билан мос тушади.

$PbSe$ пленка параметрларини барқарорлаштирувчи термик ишлов бериш вақтининг ҳар хил қийматларида $Re \varepsilon_\infty$ нинг λ^2 га экспериментал боғланиши 10-расмда келтирилган. Ушбу боғланишлар чизиқли қисмларининг экстраполяцияси пленкаларнинг юқори такрорликли диэлектрик сингдирувчанлиги ε_∞ ни аниқлаш имконини беради. Спектрнинг тўғри чизиқли қиялигидан N/m^* нисбатни аниқлаш мумкин. Шунингдек, $PbSe$ поликристалл пленкаларидаги заряд ташувчиларнинг эффектив массаси m^* , релаксация вақти τ ва концентрацияси N аниқланган. Ҳисоблашларнинг натижалари 3-жадвалда келтирилган. Бу ерда пленкаларнинг юқори такрорликли диэлектрик сингдирувчанлиги ε_∞ , синдириш кўрсаткичи n , қалинлиги d , тензосезгирлик коэффициенти K , солиштирма электр ўтказувчанлиги σ_0 ва заряд ташувчиларнинг ҳаракатчанлиги μ ларнинг экспериментал аниқланган қийматлари ҳам келтирилган.



10-расм. $PbSe$ пленка диэлектрик сингдирувчанлиги ҳақиқий қисмининг турли термик ишлов вақтлари $t_{куй}$ (мин) даги тўлқин узунлигига боғланиши: 1-0, 2- 30, 3- 80, 4- 120, 5- 180.

3-жадвал

$PbSe$ пленка параметрларининг термик ишлов вақтига боғланиши

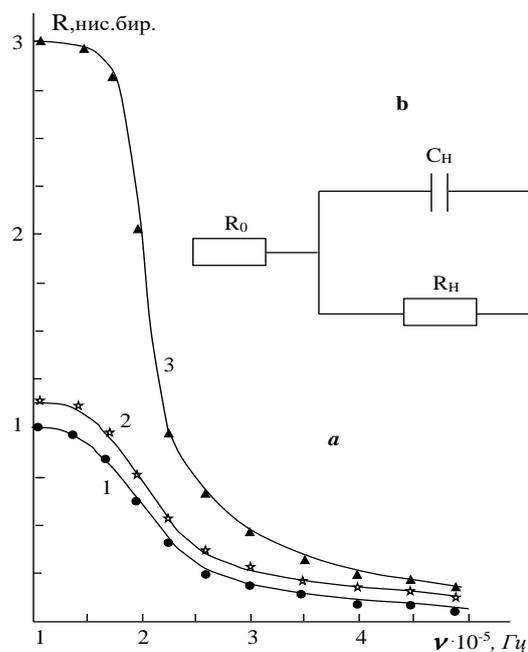
$T_{куд}$	ε_∞	n	d , мкм	K , нисб.бир.	$\langle \tau \rangle$, 10^{-12} с	σ_0 , $Ом^{-1}см^{-1}$.	μ , $см^2 / В \cdot с$	$N \cdot 10^{-16}$, $см^{-3}$	$\frac{m^*}{m} \cdot 10^2$
Куйд. маган	860	7,37	0,14	410	2,27	0,057	5,2	6,85	0,78
30 мин	730	12,81	0,13	220	1,22	0,026	2,37	6,86	0,92
80 мин	612	11,2	0,116	220	1,22	0,022	1,97	6,97	1,1
120 мин	618	7,38	0,39	120	0,66	0,012	1,1	6,86	1,09
180 мин	370	9,79	0,2	90	0,5	0,005	0,45	6,87	1,82

Кўрииб турибдики, оптик спектрлардан олинган экспериментал натижалар Холл ўлчовларидан олинган маълумотлар билан сифат жиҳатдан яхши мос тушади (2-жадвалга таққосланг).

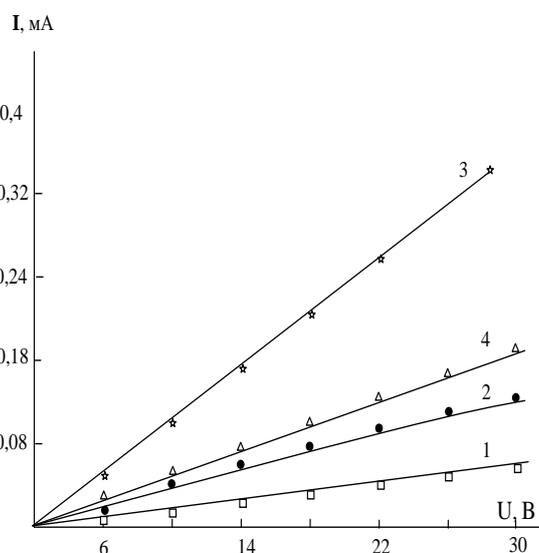
$PbTe:Te$ пленкалар қаршилигининг ўзгарувчан ток такрорлигига боғланиши $0 \leq \nu \leq 10^6$ Гц оралиғида ўрганилган. Натижалар 11-расмда келтирилган. Расмдан кўринадикки, қўшимча теллур пленка қаршилигининг

кескин ортишига олиб келмоқда. Қўйилган синусоидал кучланишнинг такрорлиги ортиши билан пленканинг қаршилиги дастлаб $1,5 \cdot 10^5 \text{ Гц}$ такрорликкача секин пасаяди, сўнгра кучли пасайиш кузатилади. Қаршилиқнинг такрорликка қараб ўзгариш характери $R(\nu)$ барча намуналар учун деярли бир хил бўлиб, турли ΔTe учун $\nu > 3 \cdot 10^5 \text{ Гц}$ қийматларда $R(\nu)$ боғланиш секинлашади ва чегаравий қийматга интилади.

$PbTe:Pb$ пленкалари ўзгарувчан токда $PbTe:Te$ пленкаларига нисбатан ўзларини бошқача тутиши аниқланди. Қўрғошин ΔPb 0,2 масса % гача ортганда $PbTe:Pb$ пленкаларининг электр ўтказувчанлиги $PbTe$ ва $PbTe:Te$ пленкаларидаги каби (12-расмдаги 1,2 чизиклар) ўзгарувчан ток такрорлиги ортиши билан кўпаяди, қўрғошини 0,2 масса % дан кўпроқ бўлган $PbTe:Pb$ намуналарида эса ўтказувчанлик бунга қарама-қарши равишда камаяди (3,4-чизикларга қаранг). Бу 12-расмда келтирилган ВАХлар қиялик бурчагидан яхши кўриниб турибди.



11-расм. Ортиқча ΔTe қўшилган $PbTe$ пленкалари қаршилигининг такрорликка боғлиқлиги. Масса %: 0 (1 эгри чизик), 0.8 (2), 3.8 (3).



12-расм. $PbTe:Te$ (1,2) ва $PbTe:Pb$ (3,4) пленкаларининг таъминлаш манбаи сигналининг $\nu=1,3-0; 2,4 \cdot 10^5 \text{ Гц}$ такрорликдаги ВАХ лари.

Ниҳоят, IV боб охирида $(Bi_{0,3}Sb_{0,7})_2Te_3$ тензорезистив пленкалар қаршилигининг ишораси ўзгарувчан циклик механик деформациялар таъсирига ва ўзгарувчан ток такрорлигига боғланиши тадқиқ қилинган. Полиамид тагликнинг $T_s \leq 363 \text{ K}$ ҳароратида термовакуумли буғлатиш йўли билан ўстирилган 3-4 мкм қалинликдаги ва $5 \times 30 \text{ мм}$ ўлчамли пленканинг қаршилиги ўзгарувчан токнинг $\omega_0 \approx 10^5 \text{ Гц}$ характерли такрорлиги яқинида $T_s \approx 423 \text{ K}$ бўлган ғоваксиз зич пленкалар қаршилиги қийматларигача кескин камайиши кўрсатилган. Амплитудаси $\epsilon = \pm 1,0 \cdot 10^{-3}$ нисб.бир. бўлган механик деформациянинг $N \approx 10^5$ цикллари таъсирдан сўнг пленканинг

каршилиги 1,5 баробар ортади, ω_0 нинг қиймати эса деярли 10^2 мартагача камаяди. Олинган натижалар ғовак пленкаларнинг кристалл гранулалараро интерфейсли модели асосида тушунтирилган.

ХУЛОСА

“Қўрғошин ва висмут халькогенидлари бирикмаларидан тайёрланган структураларда пьезоқаршилик ҳодисалари”ни ўрганиш бўйича ўтказилган назарий ва экспериментал тадқиқотлар натижаларига кўра қуйидаги хулосаларни чиқариш мумкин:

1. *PbS* туридаги яримўтказгич кристаллар эластоқаршилигининг силжиш $(m_{11}-m_{12})/2$, m_{44} ва ҳажмий $(m_{11}+2m_{12})/3$ коэффициентларининг "кичик эффектлар" инобатга олингандаги феноменологик ҳисоби қурилган ва m_{44} катталиқ икки қисмдан иборат бўлиб, улардан фақат ҳароратга қараб кучли ўзгарадиган ҳадигона концентрацияга боғлиқ эканлиги кўрсатилган.

2. Поликристалл яримўтказгичлар импеданси ва тензосезгирлик коэффициенти кристалл донларнинг сиртолди ҳажмий зарядлар соҳалари модуляциясини инобатга олган ҳолда назарий ҳисоблаб чиқилган, натижада аномал катта тензосезгирликка олиб келадиган кўндаланг ва бўйлама сирт ҳолатлар ўртасидаги зарядлар оқиб ўтиш эффекти башорат қилинган.

3. Шоттки ва туннель тоқлари механизмлари асосида юпқа поликристалл пленкалар ВАХ ва тензосезгирлик коэффициенти ҳисоблаб чиқилган. Сонли ҳисоблаш натижалари *PbSe* пленкали тензорезисторлар учун мавжуд экспериментал натижаларга яхши мос тушиши кўрсатилган.

4. Тоқ ташувчилар концентрацияси ортган сари *PbS* турдаги поликристалл пленкалар тензосезгирлигининг камайиши ва деформацион хоссаларининг барқарорлашуви аниқланган, натижада концентрацияни ўзгартириш орқали турғун параметрларга, чизиқли ВАХга ва мўътадил тензосезгирликка ($K \approx 250$) эга бўлган пленкали тензодатчиклар яратиш мумкинлиги асосланган.

5. *PbTe* поликристалл пленкага 2 масса % гача ностехиометрик *Pb* киритиш $\varepsilon < 1,32 \cdot 10^{-3}$ нисбий деформацияларда ВАХнинг чизиқлигини бузмаслиги ва электр ўтказувчанликни кўпайишига, кўшимча *Te* киритиш эса ВАХ ночизиқлигининг ортишига ҳамда сиқилиш деформациясида электр ўтказувчанликнинг кўпайишига, чўзилишда-камайишига олиб келиши кўрсатилган.

6. Эриш чегарасидаги ностехиометрик *Te* ва *Pb* кўшимчалар *PbTe* пленканинг оптик параметрларини сезиларли ўзгаришига, жумладан ҳажмий нотекис тақсимланган алоҳида фаза ташкил этиш орқали кучли қутбланишга ва $\varepsilon_{\phi\phi}$ ортишига, ютилиш спектрининг нотекис ўзгаришига олиб келиши экспериментал аниқланган.

7. *PbSe* пленканинг ИҚ соҳадаги қайтариш спектрларида заряд ташувчиларнинг плазма тебранишлари билан боғлиқ ω_{min} такрорликда минимум кузатилган, натижада улар эффектив массасини концентрацияси орқали баҳоланган, солиштирма электр ўтказувчанлик, электронлар ҳаракатчанлиги, релаксация вақти ва айрим оптик параметрлар аниқланган.

8. Тагликнинг $T_s \leq 363 K$ ҳароратида ўстирилган ғовакли поликристалл $(Bi_{0.3}Sb_{0.7})_2Te_3$ пленканинг қаршилиги ўзгарувчан токнинг $\omega_0 \approx 10^5$ Гц такрорлиги яқинида зичлиги катта ($T_s \approx 423 K$) пленкалар қаршилигигача кескин тушиб кетиши, $\varepsilon = \pm 1,0 \cdot 10^{-3}$ нисб.бир. амплитудали механик деформациянинг $N \approx 10^5$ циклик таъсирдан сўнг пленканинг қаршилиги 1,5 баробар кўпайиши, ω_0 нинг қиймати эса деярли 10^2 мартага камайиши аниқланган.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 ПО
ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК ПРИ ФЕРГАНСКОМ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ**

ФЕРГАНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

СУЛАЙМОНОВ ХУСАНБОЙ МАННОПОВИЧ

**ЯВЛЕНИЯ ПЬЕЗОСОПРОТИВЛЕНИЯ В СТРУКТУРАХ ИЗ
ХАЛЬКОГЕНИДОВ СВИНЦА И ВИСМУТА**

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам

Фергана-2020

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за номером В2020.2.PhD/FM39.

Диссертация выполнена в Ферганском Политехническом институте.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (www.felri.uz) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziyo.net).

Научный руководитель: Юлдашев Носиржон Хайдарович
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: Нуритдинов Иззатилло
доктор физико-математических наук, профессор

Расулов Рустам Явкачович
доктор физико-математических наук, профессор

Ведущая организация: Ташкентский университет информационных технологий
имени Мухаммада ал-Харезми

Защита диссертации состоится «11» 11 2020 года в 14:00 часов на заседании Научного совета PhD.03/27.02.2020.ФМ.106.01 при Ферганском политехническом институте (Адрес: 150107, г. Фергана, ул. Ферганская, дом 86. Тел: (+99873) 241-12-06, факс (+99873) 241-12-06, e-mail: uzferfizika@mail.ru, малый зал заседания).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке (ЦИР) института. (зарегистрирована за № 0003-А) Адрес: 150107, г. Фергана, ул. Ферганская, дом 86. Тел: (+99873) 241-12-06,

Автореферат диссертации разослан «7» 11 2020 года.

(реестр протокола рассылки № PhDFM-02 от «7» 11 2020 г.)



Н.А. Султанов
председатель Научного совета по присуждению
ученой степени доктора философии,
д.ф.-м.н., профессор

Б.З. Полтовов
ученый секретарь Научного совета по присуждению ученой
степени доктора философии, PhD ф.-м.н., доцент

Р.Я. Расулов
председатель научного семинара при Научном
совете по присуждению ученой степени доктора
философии, д.ф.-м.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время в мировом уровне, несмотря на глубокие и всесторонние исследования эффекта пьезосопротивления в монокристаллах и поликристаллических пленках, не ослабевает интерес к тензорезистивным явлениям в этих материалах. Более того комплексное изучение физических свойств различных кристаллических низкоразмерных структур с применением методов тензометрии, является сегодня перспективным и актуальным как в научном, так и в прикладном плане. В связи с этим особый интерес представляет исследование температурных зависимостей эластосопротивления монокристаллических образцов с учетом «малых эффектов» и свойства глубоких уровней радиационных дефектов в деформированных кристаллах, изучение новых тензорезистивных эффектов в поликристаллических пленках и явлений деформации приповерхностных слоев, а также свойств твердотельных структур совместно деформационными и оптическими методами.

На сегодняшний день в области микроэлектроники и научного приборостроения основное внимание ученых ведущих научно-исследовательских центров мира обращено к важной проблеме - установлению новых тонких механизмов тензочувствительности моно- и поликристаллических полупроводниковых структур и создание на их основе различных тензоэлектрических приборов с линейными деформационными характеристиками. Поэтому представляет интерес проведение фундаментальных исследований по следующим актуальным задачам твердотельной тензометрии: разработка метода теоретического расчета констант эластосопротивления в зависимости от концентрации носителей с учетом «малых эффектов» пьезосопротивления в узкозонных кристаллах типа *PbS*; расчет общей тензочувствительности поликристаллических полупроводников с учетом продольного и поперечного пьезосопротивления; деформационные характеристики поликристаллических пленок халькогенидов свинца с нарушенной стехиометрией при односторонней статической деформации на постоянном токе; корреляция оптических и тензометрических свойств сильнолегированных пленочных образцов *PbTe*, *PbSe*, Bi_2Te_3 и исследование в них деформационных эффектов на переменном токе.

За последние годы правительством Республики Узбекистан уделено существенное внимание актуальным приоритетным научным направлениям фундаментальных и прикладных исследований. Следует отметить, что в нашей стране по технологии получения моно- и поликристаллических материалов для изготовления солнечных панелей достигнуты определенные результаты. В Стратегии действия по дальнейшему развитию Республики Узбекистан, особое внимание обращено задачам создания эффективных механизмов практического применения научных и инновационных разработок. В этом аспекте очень важным является развитие новых методов

глубокого теоретического исследования электрофизических параметров кристаллических структур в области фотоники и микроэлектроники. Данная диссертационная работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию новых механизмов пьезорезистивного эффекта в объемных кристаллических и тонкопленочных поликристаллических структурах типа *PbS*, результаты которых может служить для усовершенствования технологии создания твердотельных тензодатчиков, оптико-механических сенсоров и других аналогичных микроэлектронных приборов.

Исследования настоящей диссертации в определенной степени служат выполнению задач, предусмотренных в Указе Президента Республики Узбекистан № УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» от 7 февраля 2017 года и в Постановлениях Президента № ПП-2772 «О мерах по дальнейшему совершенствованию управления, ускоренному развитию и диверсификации электротехнической промышленности на 2017-2021 гг.» от 13 февраля 2017 года, № ПП-2789 «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности» от 17 февраля 2017 года и № ПП-3876 «О мерах по дальнейшему повышению размеров оплаты труда работников сферы науки и высшего образования, а также государственной поддержки внедрения результатов научной и научно-технической деятельности» от 20 июля 2018 года, а также в других аналогичных нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере и изложенных в соответствующих законодательных документах.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан. Задачи диссертации выполнены в рамках приоритетных направлений развития науки и технологий Республики Узбекистан «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение, транспорт, машино- и приборостроение; развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники, электронного приборостроения».

Степень изученности проблемы. Впервые эффект пьезосопротивления в полупроводниковых кристаллах был открыт К.С. Смитом, который экспериментально установил некоторые общие закономерности пьезосопротивления на Ge и Si, что оказалось возможным объяснить только на основе “многодолинной” модели энергетических зон кристаллов и “эффектом перетекания” носителей заряда, развитых К. Херрингом. В дальнейшем эффект пьезосопротивления теоретически рассматривался российскими и зарубежными учеными Г.Е. Пикусом и Г.Л. Биром, Ф.Ж. Морином, С. Рабии, Б.Я. Мойжесом, и Ю.В. Илисавским и др.

В работах узбекских физиков Н.Х. Юлдашева, К. М. Дошчанова и С.Х. Шамирзаева, Э.А. Абдуллаева и Ш.Б. Атакулова, Г. Гулямова разработаны феноменологические теории тензорезистивного эффекта в поликристаллических пленках на основе одномерного барьерного механизма продольной электропроводности. Однако основные особенности высокой

тензочувствительности пленок халькогенидов свинца и висмута не возможно объяснить до конца в рамках существующих механизмов тензорезистивного эффекта.

Отсутствие работ по целенаправленному комплексному изучению общих электрофизических, оптических и тензометрических свойств, а также нелинейные деформационные характеристики тонкопленочных кристаллических структур сдерживает широкое практическое применение пленочных тензодатчиков.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнено в Ферганском политехническом институте, в частности, в рамках фундаментального научного проекта: Грант № 80-06 Фонда Поддержки Фундаментальных Исследований АН РУз; Грант по контракту ККРНТ № 28 «Поляритонный принцип организации квантовых каналов связи» за 2012-2013гг. и перспективного научного плана института на 2015-2020 гг. по теме: «Деформационные явления в полупроводниковых пленочных структурах халькогенидов свинца и висмута».

Целью исследования является установление новых механизмов пьезосопротивления кристаллов, поликристаллов, поликристаллических пленок типа PbS и разработка пленочных тензорезисторов на их основе со стабильными, линейными деформационными характеристиками.

В соответствии с поставленной целью необходимо было решить следующие основные задачи:

- роль «малых эффектов» пьезосопротивления в монокристаллах и механизмы тензочувствительности поликристаллов типа PbS ;
- тензорезистивные свойства поликристаллических пленок халькогенидов свинца с нарушенной стехиометрией при односторонней статической деформации на постоянном токе;
- корреляция некоторых оптических и тензометрических свойств сильнолегированных поликристаллических пленок $PbTe$, $PbSe$, Bi_2Te_3 и исследование в них деформационных эффектов на переменном токе.

Объектом исследования являются чистые и легированные полупроводниковые кристаллы PbS , $PbTe$, $PbSe$ со симметрией цинковой обманки и тензочувствительные поликристаллические пленки на их основе, а также $(Bi_xSb_{1-x})_2Te_3$.

Предметом исследования является эффект пьезосопротивления в кристаллах типа PbS , деформационные и оптические явления в поликристаллических пленках PbS , $PbTe$, $PbSe$ и $(Bi_xSb_{1-x})_2Te_3$ с большой ($K \approx 10^3$) тензочувствительностью.

Методы исследований. Для решения поставленных задач использованы теоретические методы физики твердого тела и математической физики, в частности, зонная теория кристаллов, тензорное исчисление и теория групп, дифференциальные уравнения в частных производных и интегральное

исчисление, экспериментальное измерение ВАХ при деформации в постоянном и переменном токе и методы холловских измерений, а также оптико-спектроскопические методы исследования кристаллов и поликристаллических пленочных материалов.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

разработан метод теоретического расчета сдвигового m_{44} и объемного $(m_{11}+2m_{12})/3$ коэффициентов эластосопротивления монокристаллов типа PbS с учетом «малых эффектов», связанных с изменением эффективной массы носителей заряда и ширины запрещенной зоны;

- впервые разработан метод теоретического расчета тензочувствительности поликристаллических полупроводников с учетом вкладов модуляции потенциальных барьеров и поверхностных состояний, перпендикулярных и параллельных к направлениям тока и деформации;

- рассчитана ВАХ поликристаллической пленки при деформации с учетом туннельного и шоттковского механизмов токопрохождения через межзеренных интерфейсов и показано хорошее совпадение расчета с экспериментальной ВАХ пленки PbSe, PbS;

- показано, что с увеличением уровня легирования, толщины поликристаллических пленок *PbTe:Pb* и деформации сжатия снижаются высоты потенциальных барьеров межзеренных границ, вследствие чего холловская подвижность $R_H\sigma$ и концентрация носителей заряда увеличиваются и ВАХ тензорезистора линейаризуется;

- впервые установлена тесная корреляция между деформационными характеристиками и спектрами поглощения пленок PbTe со сверхстехиометрическими добавками теллура и свинца;

- показано, что зависимость сопротивления и КТЧ плёнок $(Bi_{0.7}Sb_{0.3})_2Te_3$ от числа циклов деформации, частоты переменного тока и температуры связано с изменением параметров интерфейсов между кристаллитами и образованием новых микротрещин в плёнке.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

- на пленочных тензорезисторах из *PbS* возможно достигать аномально высокие значения КТЧ ($K \approx 4 \cdot 10^3$) в комнатной температуре при малых деформациях сжатия $\approx 0,2 \cdot 10^{-5}$ отн.ед.;

- в отличие от моно- и поликристаллических (прессованных) тензорезисторов, пленочные тензорезисторы *PbS* возможно применять в довольно широком интервале относительных деформаций $(0,25-50) \cdot 10^{-5}$ отн.ед.;

- типом проводимости пленок *PbSe* можно управлять изменением температуры подложки, не меняя исходной шихты. В оптимальных технологических условиях ($T_{\text{п}} \approx 100$ 0С и $d \approx 20$ мкм) электропроводность пленки обладает максимальным значением ($\sigma \approx 1,5$ (Ом·см)⁻¹), а её ВАХ суперлинейна ($j \sim E^n$ с $n \approx 1,3$) лишь при относительно высоких напряженностях $E \geq 10$ В/см;

- экспериментальная зависимость $\text{Re} \varepsilon_{\infty}$ от λ^2 для различного времени отжига линейна в длинноволновой области ИК спектра. Экстраполяция

линейного участка этих зависимостей позволяет находить высокочастотную диэлектрическую проницаемость пленок ϵ_{∞} , а из наклона прямолинейного участка спектра можно определить удельной концентрации N/m^* .

Достоверность результатов исследований обосновывается тем, что в диссертации применяются современные теоретические и экспериментальные методы исследования физики твердого тела и полученные новые результаты согласуются с известными результатами других авторов, а аналитические формулы для коэффициентов эластосопротивления и тензочувствительности качественно хорошо воспроизводят соответствующие экспериментальные результаты для кристаллов PbS и поликристаллических пленок PbSe.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость состоит в том, что предложенные методы расчета и анализа деформационных характеристик кристаллов и поликристаллических пленок халькогенидов свинца и висмута может быть использованы для правильной интерпретации механизмов эффекта пьезосопротивления и тензочувствительности в других кристаллах, а также для комплексного изучения физических свойств различных полупроводниковых низкоразмерных структур с применением методов тензометрии.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что разработанные теоретические и экспериментальные методы анализа деформационных и оптических явлений в кристаллических и поликристаллических материалах типа *PbS* могут служить для усовершенствования технологии создания тензодатчиков, оптико-механических сенсоров и других аналогичных приборов твердотельной микроэлектроники.

Внедрение результатов исследования. На основе результатов исследования механизмов тензочувствительности полупроводниковых поликристаллических пленок PbS, PbSe и PbTe:

- разработанные теоретический и экспериментальный методы анализа деформационных явлений в моно- и поликристаллах, поликристаллических пленках халькогенидов свинца, позволяющий усовершенствовать технологии получения полупроводниковых тензодатчиков методом термовакuumного испарения прошел апробации на АО «FOTON» АК «Узэлтехсаноат» (Справка АК «Узэлтехсаноат» № 04-1/1165 от 19.06.2020 г.). Научные результаты можно внедрят в предприятиях Узэлтехсаноат. Применение этой научной новизны, несомненно приводит к модернизации способа изготовления полупроводниковых пленочных тензодатчиков;

- результаты теоретического расчета коэффициентов эластосопротивления кристаллов типа PbS и кинетических параметров электронов с помощью спектров отражения и поглощения поликристаллических пленок PbS и PbTe:Pb;Te использованы при выполнении фундаментального проекта Ф-2-21 «Математическое моделирование определения плотности состояний на границе полупроводник-диэлектрик» (2012–2016гг.) для определения параметров

электронов и экситонов в полупроводниковых структурах (Справка Министерства высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан № 89-03-1887 от 03.06.2020 г.). Использование научных результатов позволило проанализировать физических механизмов электронных кинетических явлений в сильнолегированных полупроводниковых структурах при собственном и примесным поглощении света.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на 6 международных и 4 республиканских научно-практических конференциях.

Публикации результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 20 научных трудов, из них 10 статей в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных работ.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованной литературы и изложена на 137 машинописных страницах, включая 7 таблиц и 34 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении кратко обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, определена связь исследований с основными приоритетными направлениями развития науки и технологий в Республике Узбекистан, проведен краткий обзор научных работ по теме диссертации и степени изученности проблемы, сформулированы цели и задачи, выявлены объекты, предметы и методы исследования, изложена научная новизна исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта их теоретическая и практическая значимость, приведены сведения о внедрении результатов и апробации работы.

В первой главе «**Современное состояние изучения явлений пьезосопротивления в узкозонных полупроводниках типа PbS** » вкратце изложены предварительные основные сведения о тензорезистивном эффекте. Рассмотрены общие вопросы эффекта пьезосопротивления в многодолинных полупроводниках, о механизме перетекания Херринга и о роле «малых эффектов». Дается обзор литературы по актуальным вопросам твердотельной пленочной тензометрии за рубежом и в Узбекистане. На основе критического анализа имеющихся литературных данных сформулирована общая постановка задачи диссертации.

Вторая глава «**Малые эффекты пьезосопротивления в полупроводниковых кристаллах типа PbS и тензочувствительность поликристаллов**» посвящена конкретному количественному расчету констант эластосопротивления многодолинных кристаллов типа PbS с учетом зависимости ширины запрещенной зоны, эффективной массы, подвижности и концентрации носителей от механической деформации. Так, рассчитаны сдвиговый m_{44} и объемный $(m_{11}+2m_{12})/3$ коэффициенты эластосопротивления невырожденных монокристаллических полупроводников типа PbS с учетом

«малых эффектов» при слабых упругих деформациях. В частности показано, что в вырожденном случае $(m_{11}+2m_{12})/3$ и $(m_{11}-m_{12})/2$ при любых степенях легирования не зависят от анизотропии подвижности электронов и дырок, не проявляя при этом существенную концентрационную и температурную зависимости. А величина m_{44} , как и в невырожденном случае, состоит из двух частей, причем лишь сильно изменяющееся с температурой слагаемое зависит от концентрации.

Экспериментальные результаты, полученные при изучении эффекта пьезосопротивления для кристаллов PbS и PbSe, трудно поддаются теоретической интерпретации и порой сильно различаются. Так, в PbSe сдвиговой коэффициент эластосопротивления m_{44} значительно больше аналогичной константы $(m_{11}-m_{12})/2$, но не имеет температурной зависимости $\sim 1/T$ вопреки известной теории перетекания на основе $\langle 111 \rangle$ -модели. Напротив, в PbS величина m_{44} изменяется обратно пропорционально температуре, однако значение ее слишком мало, чтобы ее можно было объяснить эффектом перетекания. Во всех халькогенидах свинца объемный коэффициент эластосопротивления $(m_{11}+2m_{12})/3$ имеет довольно большое положительное значение, когда согласно $\langle 111 \rangle$ -модели он должен равняться нулю.

Как отмечали многие авторы, эти особенности пьезосопротивления обусловлены отсутствием в PbS и PbSe сильной анизотропии подвижностей и связаны «малыми эффектами», прежде всего изменением эффективной массы от деформации. Однако конкретный количественный расчет констант эластосопротивления с учетом зависимости ширины запрещенной зоны, эффективной массы, подвижности и концентрации носителей от механической деформации не проводился.

Рассмотрим невырожденный полупроводник типа PbS, зона проводимости и валентная зона которого простые и экстремумы последних находятся на кристаллографических осях $\langle 111 \rangle$ в точках L первой зоны Бриллюэна. Пренебрегая вкладом непараболичности зон и изменения времени релаксации носителей в эффект пьезосопротивления, как и вкладом изменения деформационных потенциалов при деформации в диссертации для констант эластосопротивления $m_{11} \equiv m_{11,11}$, $m_{12} \equiv m_{11,12}$ и $m_{44} \equiv m_{12,12}$ получены следующие выражения:

$$\frac{m_{11} + 2m_{12}}{3} = -\frac{Q}{b\eta^0 + 1} E_{g1}, \quad (1)$$

$$\frac{m_{11} - m_{12}}{2} = 0, \quad (2)$$

$$m_{44} = -\frac{1}{3} \frac{1}{b\eta^0 + 1} \left[\frac{1}{kT} \left(b\eta^0 \frac{1 - K_e}{1 + 2K_e} \Xi_{um} - \frac{1 - K_h}{1 + 2K_h} \Xi_{up} \right) \right] + \frac{1}{2E_g} \left[b\eta^0 \left(\frac{1 - K_e}{1 + 2K_e} + \frac{1 - K_h}{1 + 2K_h} \right) (\Xi_{um} - \Xi_{up}) \right], \quad (3)$$

где $\eta^0 = n^0 / p^0$, $b = (\mu_{e,\parallel} + 2\mu_{e,\perp}) / (\mu_{h,\parallel} + 2\mu_{h,\perp})$, $K_e = \mu_{e,\perp} / \mu_{e,\parallel}$, $K_h = \mu_{h,\perp} / \mu_{h,\parallel}$,

$$Q = \frac{1}{kT} \frac{\eta^0}{\eta^0 + 1} (b+1) + \frac{1}{E_g} \left[1 - (b\eta^0 - 1) \frac{\eta^0 - 2}{\eta^0 + 1} \right],$$

$$E_{g1} = \Xi_{g,d} + \frac{1}{3} \Xi_{g,u}.$$

Здесь n^0 и p^0 – концентрация электронов и дырок в недеформированном полупро-воднике, $\mu_{e,\parallel}, \mu_{e,\perp}$ и $\mu_{h,\parallel}, \mu_{h,\perp}$ – компоненты их подвижностей относительно главных осей эллипсоида долин, E_g – ширина запрещенной зоны, $\Xi_{g,d}, \Xi_{g,u}$ – деформационные потенциалы по Херрингу для E_g , $\Xi_{um} = D_{\parallel}^c - D_{\perp}^c$, $\Xi_{up} = D_{\parallel}^v - D_{\perp}^v$, а $D_{\parallel}^c, D_{\perp}^c, D_{\parallel}^v, D_{\perp}^v$ – компоненты деформационных потенциалов для свободной и валентной зон.

Сразу же заметим, что, во-первых, для широкозонных полупроводников при выполнении условий

$$1 \ll b \eta \ll E_g/kT \quad (4)$$

формулы (1) - (3) переходят в известные формулы Пикуса Г.Е. и Бира Г.Л. . Во-вторых, константа $(m_{11}+2m_{12})/3$ не зависит от анизотропии подвижностей носителей тока и в предельных случаях $\eta^0 \gg 1$, $\eta^0 \ll 1$ имеет одинаковое значение, равное E_{g1}/E_g , не меняет знак. Константа m_{44} обусловлена анизотропией подвижностей электронов и дырок; $m_{44} \equiv 0$, если $K_e = K_h = 1$. В-третьих, в соответствии с известными экспериментами для узкозонных полупроводников в отсутствии фермиевского вырождения обе константы эластосопротивления существенно зависят от концентрации (η^0) и температуры T , причем в общем случае их можно представить в виде суммы двух слагаемых, одно из которых слабо зависит от температуры, а другое обратно пропорционально температуре. При выполнении условия

$$b\eta^0 \gg \frac{E_g}{kT}, \quad (5)$$

величина $\frac{m_{11} + 2m_{12}}{3}$ почти не зависит от температуры, что и происходит с константой m_{44} при

$$b\eta^0 \gg 1, \quad \left| \frac{\Xi_{up}}{\Xi_{um}} \right| \gg \frac{2E_g}{kT}. \quad (6)$$

Первое и второе из этих условий можно удовлетворить практически всегда, а третье – весьма жесткое и заведомо выполняется только для PbS .

В главе 2 также выполнен теоретический расчет КТЧ поликристаллических полупроводников с учетом вкладов как продольных, так и поперечных барьеров, обусловленных модуляцией поперечных к направлению тока приповерхностных ОПЗ кристаллических зерен под действием деформации и влиянием поперечных поверхностных состояний, участвующих в создании поперечных потенциальных барьеров.

Для простоты рассмотрено кристаллическое зерно кубической формы с прилегающими к ним диэлектрическими слоями. Считается, что поликристалл

типа *PbS* образован периодическим чередованием в трех пространственных направлениях *OX*, *OY* и *OZ* одинаковых кубических кристаллитов с идентичными параметрами. Тогда сопротивление - импеданс поликристалла определяется как

$$Z = r^0 \cdot Z_0, \quad (7)$$

где $r^0 = Ld/ab$; L , a и b – длина, ширина и высота образца; $d = l_0 + d_0$, l_0 и d_0 – линейный размер кристаллита и ширина диэлектрической прослойки; Z_0 – импеданс одной ячейки. Исходя из принципиальной электрической схемы поликристаллического полупроводника, рассчитан импеданс

$$Z_0 = \left(2R_{D\parallel}^{-1} + Z_{kp}^{-1}\right)^{-1} + Z_{D\perp}, \quad (8)$$

где $R_{D\parallel}$, $Z_{D\perp}$ – сопротивление продольного и импеданс поперечного диэлектрических слоев (*ПДС*), Z_{kp} – импеданс кристаллита;

$$Z_{D\perp} = \left(R_{D\perp} + i\omega C_{D\perp} R_{D\perp}^2\right) / \left(1 + (\omega C_{D\perp} R_{D\perp})^2\right), \quad (9)$$

где $i = \sqrt{-1}$, ω – циклическая частота питающего напряжения; $R_{D\perp}$ – активное сопротивление; $C_{D\perp}$ – емкость *ПДС*;

$$Z_{kp} = \left(2/R_1 + 1/Z_2 + 2/R_3\right)^{-1} = \left(1/Z_2 + 4/R_1\right)^{-1}, \quad (10)$$

где $R_1 = R_{11} + R_{12} + R_{13}$, $R_3 = R_{31} + R_{32} + R_{33}$, причем $R_1 = R_3$. Здесь $R_{\alpha\beta}$ – активное сопротивление соответствующего характерного участка продольных ОПЗ;

$$Z_2 = R_{o\beta} + \left(R_{21} + i\omega C_{21} R_{21}^2\right) / \left(1 + (\omega C_{21} R_{21})^2\right) + \left(R_{23} + i\omega C_{23} R_{23}^2\right) / \left(1 + (\omega C_{23} R_{23})^2\right), \quad (11)$$

где $R_{o\beta} = R_{22}$ – сопротивление квазинейтрального объема кристаллита; C_{21}, C_{22} и R_{21}, R_{23} – соответствующие емкости и активные сопротивления поперечных ОПЗ.

В данной модели тензоэффект в поликристаллах обусловлен не только объемным ($R_{o\beta}$), приповерхностным ($R_{\alpha\beta}$) пьезосопротивлением, но и перезарядкой поверхностных состояний (ПС), приводящим к существенным изменениям $R_{o\beta}$ и $R_{\alpha\beta}$. Тензочувствительность поликристаллов при одноосной деформации во многом будет обусловлена процессами перетекания носителей заряда из продольных ПС к поперечным ПС или наоборот. Это и является одним из главных механизмов пьезосопротивления в поликристаллах узкозонных полупроводников.

Для расчета $R_{\alpha\beta}$ необходимо знать параметры продольных и поперечных барьеров $L_{D\parallel}, L_{D\perp}, \varphi_{S\parallel}$ и $\varphi_{S\perp}$, которые зависят от энергии активации и концентрации поверхностных примесных состояний, от степени легирования и деформации, а $L_{D\perp}$ и $\varphi_{S\perp}$ также и от плотности тока j .

Далее рассчитаны КТЧ $K_{об}$, $K_{\sigma\perp}$ и $K_{\sigma\parallel}$, определяющие парциальные вклады в пьезосопротивление поликристалла квазинейтральных объемов, поперечных и продольных барьерных областей соответственно

$$K_{об} = 1 + 2\nu + \bar{m} + K_{геом.}^S, \quad (12)$$

где

$$K_{геом.}^S = d(L_{D\parallel}^+ + L_{D\parallel}^- + 4L_{D\perp})/\ell_0 d\varepsilon \quad (13)$$

вклад в КТЧ, обусловленный модуляцией геометрических размеров продольных и поперечных ОПЗ, в результате перезарядки поверхностных состояний; ν - коэффициент Пуассона для кристаллита; \bar{m} - константа эластосопротивления, полученная путем усреднения $(m_{11} + m_{12})/2$ по пространственным направлениям.

$$K_{\sigma\perp} = \left[1 + 2\nu + \bar{m} + df_{+-}/f_{+-} d\varepsilon \right] R_{кр} f^\pm / R_{\sigma\perp} + 1 + 2\nu_D + m_D + \left[\exp\left(-2\sqrt{2m_n^*}(\sqrt{W_S - E_F} \varepsilon_2 + \Delta W_S / \sqrt{W_S - E_F}) d_0 / \hbar\right) \right] R_{D\perp} / R_{\sigma\perp}, \quad (14)$$

$$K_{\sigma\parallel} = 1 + 2\nu + \bar{m} - df_1/f_1 d\varepsilon, \quad (15)$$

$$f_{+-} = f^+ + f^-, \quad f^\pm = \left(L_s / \ell_0 (1 - \lambda_{D\perp})^2 \right) \int_{Y_{s\parallel}}^0 F^{-1}(\lambda, Y) dY / (\exp Y \pm \lambda^{-2} \exp(-Y)),$$

$$f_1 = (L_s / \ell_0) \int_{Y_{s\perp}}^0 (\exp Y + \lambda^2 \exp(-Y)) dY / F(\lambda, Y), \quad F(\lambda, Y) = \sqrt{\lambda(e^Y - 1) - \lambda^{-1}(e^{-Y} - 1) + (\lambda^{-1} - \lambda)},$$

где $L_s = \sqrt{2\pi\varepsilon_{II}kT/e^2n_i}$ - длина экранирования Дебая, $\lambda = n_0/n_i = n_i/p_0$, ν_D и m_D - коэффициент Пуассона и константа эластосопротивления для диэлектрического слоя; ΔW_S - изменение высоты потенциального барьера на границе кристаллита с диэлектрическим слоем при одноосной деформации, ε_2 - значение относительной деформации в поперечном диэлектрическом слое, \hbar - постоянная Планка.

В третьей главе «Тензометрические свойства поликристаллических пленок халькогенидов свинца с нарушенной стехиометрией при односторонней статической деформации на постоянном токе» приведены результаты экспериментов по изучению тензометрических характеристик поликристаллических пленок n - PbS в зависимости от уровня легирования, $PbTe$ и $PbSe$ с нарушенной стехиометрией. В частности, изложены результаты опытов по влиянию деформации на ВАХ и эффекта Холла, температурной зависимости электропроводности и тензометрических параметров, а также по выявлению роли технологических факторов. Выполнен теоретический расчет ВАХ и тензочувствительности тонких

поликристаллических пленок на основе туннельного и шоттковского механизмов токопрохождения, обсуждаются экспериментальные результаты.

Поликристаллические пленки из $n\text{-PbS}$ с толщиной $h \approx 10 \text{ мкм}$ выращивались на полиамидной подложке с температурой $T \approx 333\text{--}393 \text{ К}$ методом открытого термического испарения в квазизамкнутом объеме при давлении остаточных паров $\sim 10^{-2}\text{--}10^{-3} \text{ Па}$. Предварительные экспериментальные исследования электрофизических свойств пленок качественно подтверждали результаты известных работ. В частности, холловская подвижность носителей тока увеличивается с ростом температуры подложки и скорости напыления, а холловская концентрация носителей практически не зависит от этих технологических параметров, толщина конденсированного слоя в области значений $0 < h \leq 6 \text{ мкм}$ существенно определяет электрические характеристики пленок. С ростом h подвижность носителей тока растет, их концентрация изменяется немонотонно, КТЧ сначала растет, а затем при $h \geq 6 \text{ мкм}$ выходит на насыщение. Термическая обработка свежеприготовленных пленок на атмосферном воздухе или в парах S стабилизирует электрические и тензометрические свойства пленок.

На рис. 1 приведены ВАХ пленочного тензорезистора из относительно

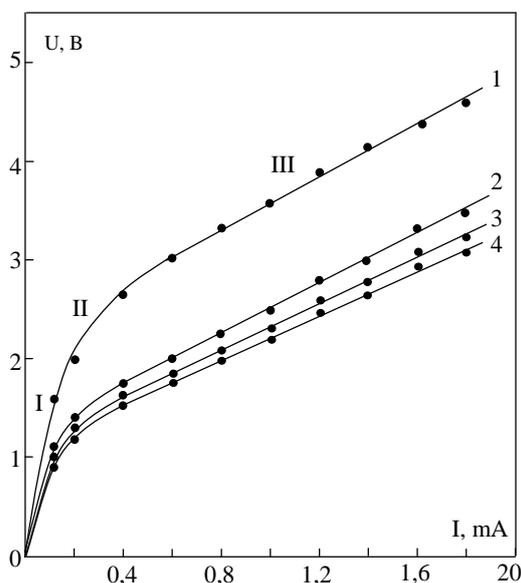


Рис. 1. ВАХ пленочного тензорезистора из $n\text{-PbS}$ при различных уровнях деформации сжатия $-\varepsilon \cdot 10^5$: 1-0; 2-7,5; 3-15; 4-25 отн.ед. $n = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $T = 300 \text{ К}$.

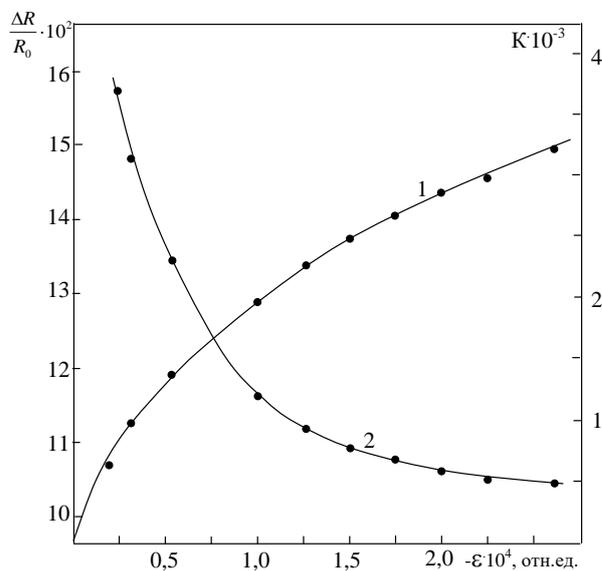


Рис. 2. Зависимость $|\Delta R/R_0|$ (кривая 1) и КТЧ (2) от уровня деформации сжатия для пленочного тензорезистора из $n\text{-PbS}$ с $n = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. $T = 300 \text{ К}$.

высокоомного PbS при различных уровнях одноосной деформации сжатия. Как видно из рисунка, кривые $U(I)$ с ростом абсолютного значения относительной деформации смещаются вниз по ординате, что говорит об уменьшении сопротивления пленки при сжатии. На каждой кривой ВАХ можно выделить три характерные участки: линейные (I, III) и нелинейный II.

Причем переходная нелинейная область II из начального линейного участка I на другой линейный участок III ВАХ сужается с ростом $|\varepsilon|$, перемещая одновременно в область малых значений падения напряжений U в пленке. Значение $U=U_{пер}$ характеризует переключения пленки из высокоомного состояния в более низкоомное. При односторонней деформации растяжения с ростом ε величина $U_{пер}$ увеличивается. Подобная особенность ВАХ поликристаллических пленок PbS является общим для аналогичных пленочных структур на основе узкозонных полупроводников и отражает наличие в них микро неоднородностей и связанные с ним потенциальных барьеров.

Зависимость относительного изменения сопротивления $|\Delta R/R_0|$ и КТЧ пленочного тензорезистора $n-PbS$ с концентрацией $n = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, показана на рис. 2. Кривая 1 изображает изменение относительного сопротивления, а кривая 2- зависимость $K = f(\varepsilon)$, которые снимались при напряжении внешнего источника $U > U_{пер}$. Как видно из рисунка, КТЧ пленочных тензорезисторов из PbS с указанной выше концентрацией электронов доходит до 4000 в области малых значений $\varepsilon \approx -10^{-5}$ отн. ед. и с ростом уровня деформации сжатия падает. В интервале относительной деформации $-(1-3) \cdot 10^{-4}$ отн. ед. зависимость $f(\varepsilon)$ плавно уменьшается и КТЧ практически остается постоянной, равной $K \approx 510^2$.

С целью установления оптимального фазового и химического состава слоев и для получения тензорезистивных пленок с линейными деформацион-

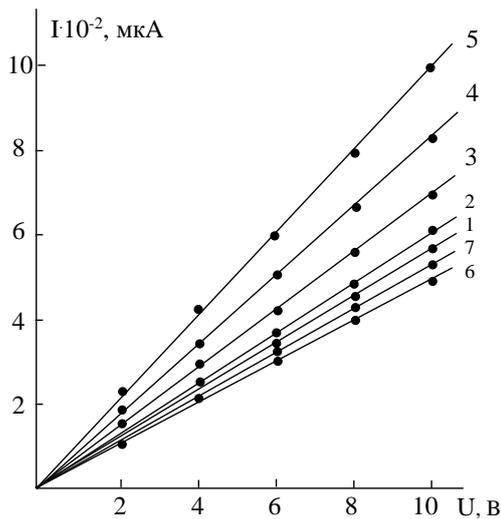


Рис. 3. ВАХ пленки $PbTe$ стехиометрического состава; 1-без деформации; 2-5-при сжатии; 6,7- при растяжении. $n=4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

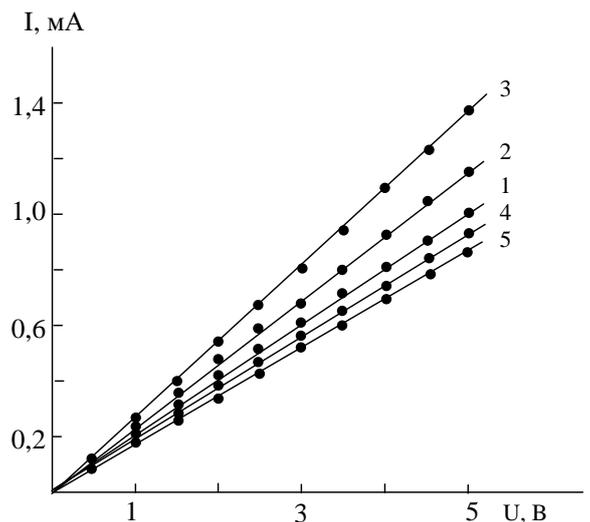


Рис. 4. ВАХ пленки $PbTe$ с избытком свинца $\Delta Pb = 0,2$ масс. % при различных уровнях деформации сжатия (2,3) и растяжения (4,5).

ными характеристиками обращали внимание на исследование образцов из $PbTe$, легированных сверхстехиометрическими добавками Pb , Te .

На рисунках 3-5 приведены ВАХ пленок $PbTe$ n -типа, близкой к

стехиометрическому составу и $PbTe:Pb$ с избытком свинца $\Delta Pb = 0,2$ масс. %, $PbTe:Te$ с избытком $\Delta Te = 2,8$ масс.%, соответственно, при различных относительных деформациях ($0,33 \cdot 10^{-3} \div 1,32 \cdot 10^{-3}$ отн. ед.). Прежде всего, следует отметить, что для пленок $PbTe$ и $PbTe:Pb$ все графики как при наличии, так и в отсутствии деформации, прямолинейны. Это свидетельствует о том, что деформация сжатия и растяжения не создает в пленке такие “центры”, которые меняли бы свои активности с ростом приложенного механического напряжения. Сверх стехиометрическая добавка Pb приводит к росту проводимости пленки по сравнению стехиометрическим составом. При этом сжатие как обычно сопровождается ростом проводимости (кривая 3), а растяжение - уменьшением её (кривые 4, 5). Это скорее всего связано с изменением ширины запрещенной зоны под действием деформации и приводящей к изменению концентрации носителей зарядов. Увеличение добавки Te в пленке $PbTe$ приводит к отклонению ВАХ от линейности в области $U \geq 6$ В (рис. 5). С ростом приложенного напряжения проводимость медленно уменьшается. Это видимо связано с ростом рассеяния электронов на дефектах, образованных сверх стехиометрическим присутствием Te или выделенным отдельной полупроводниковой фазы Te .

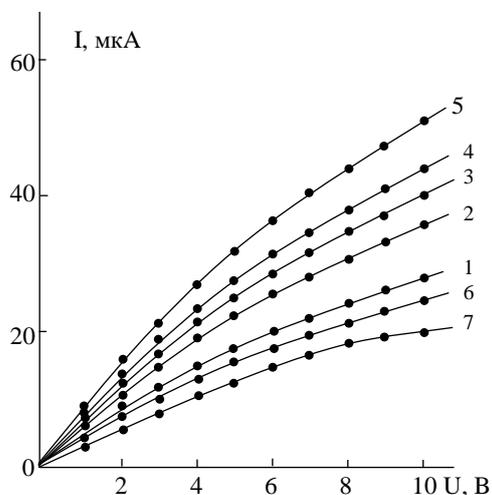


Рис. 5. ВАХ пленки $PbTe$ с избытком $\Delta Te = 2,8$ масс.%; кривая 1-без деформации; 2-5-сжатие; 6,7-растяжение.

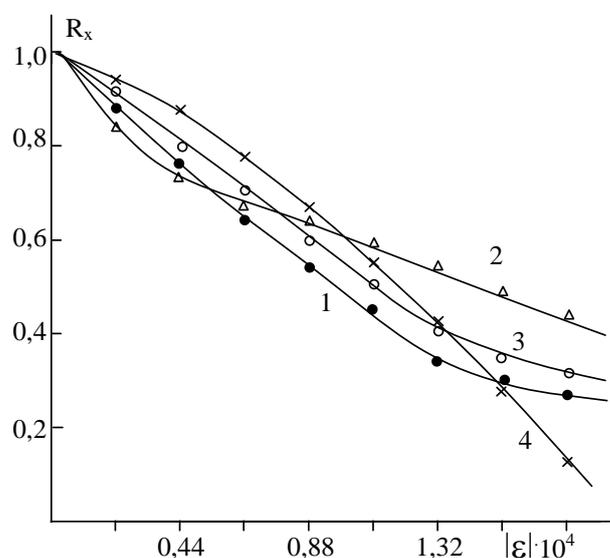


Рис. 6. Зависимость коэффициента Холла пленок $PbTe:Te$ от одноосной деформации сжатия. Толщина пленок d , мкм: 1-5; 2-7; 3-9; 4-11.

Как показывает холловские измерения при напряженности магнитного поля $H = 6 \cdot 10^3$ Э, все пленки $PbTe:Te$, изготовленные на бумажной подложке, не меняли тип проводимости. С ростом относительной деформации сжатия до уровня $\varepsilon = 1,76 \cdot 10^{-3}$ отн. ед. (рис. 6) постоянная Холла R_x сильно уменьшается. Степень уменьшения почти не зависит от толщины пленки. Это свидетельствует о том, что уменьшение коэффициента Холла в основном происходит за счет роста концентрации носителей зарядов с деформацией сжатия.

Нарушение стехиометрии пленки $PbTe$ вследствие добавки Pb или Te ,

естественно, приводит к изменению высоты потенциального барьера. В таблице 1 приводятся экспериментально определенные с помощью формулы $\sigma = \sigma_0 \exp(-\Delta E_a / kT)$ значения энергии активации $\Delta E_a \approx \varphi_{эфф}$ для *PbTe* для различных значений добавки *Pb* и *Te*. Избыток *Te* приводит к росту потенциальных барьеров между кристаллитами. Если исходный материал *n*-типа, то увеличение $\varphi_{эфф}$ означает, что добавочный *Te* ведет себя как акцептор, присоединяя к себе электроны увеличивает барьер для электронов. Сверх стехиометрические добавки *Pb* ведут себя как доноры, отдавая слабосвязанных электронов в зону проводимости кристаллита и, тем самым, снижает потенциальный барьер и энергию активации. Следовательно, исходные потенциальные барьеры на границе между кристаллитами и интерфейса являются запирающими.

Энергия активации проводимости *PbTe*, в зависимости от ΔTe и ΔPb . Таблица 1

избыток <i>Te</i> , масс. %	ΔE_a , эВ	избыток <i>Pb</i> , масс. %	ΔE_a , эВ
0,8	0,085	0	0,080
1,8	0,090	0,2	0,090
2,8	0,095	1,2	0,040
3,8	0,105	2,2	0,015
4.8	0,12	3,2	-

В диссертации показано, что снижения КТЧ и ослабления его температурной зависимости с увеличением содержания свинца в пленке *PbTe* по сравнению с добавкой *Te* связано с различной ролью и активностью *Pb* и *Te* в поликристаллической пленке *PbTe*.

В таблице 2 приведены эффективные значения коэффициента Холла R_x , подвижности ($R_x \sigma$) и концентрации носителей p , измеренные методами эффекта Холла и электропроводности для пленок *PbSe* в зависимости от уровня деформации растяжения при различных толщинах d . Видно, что при $d \approx 10$ мкм подвижность сначала уменьшается, затем сильно растет в зависимости от уровня растяжения, а электропроводность пленок изменяется в 8 раз.

Параметры пленки *PbSe*, в зависимости от толщины и деформации. Таблица 2

№	ε , 10^{-4}	d , мкм	R_x , см ³ /кл	σ , (Ом см) ⁻¹	$R_x \sigma$, см ² /В·с	$P \cdot 10^{-16}$, см ⁻³	d (мкм)	R_x , см ³ /кл	σ , (Ом см) ⁻¹	$R_x \sigma$, см ² /В·с	$P \cdot 10^{-16}$, см ⁻³	d (мкм)	R_x , см ³ /кл	σ , (Ом см) ⁻¹	$R_x \sigma$, см ² /В·с	$P \cdot 10^{-16}$, см ⁻³
1	0		230,7	0,36	84	32		166	0,58	96,9	4,5		158,9	1,47	4,6	232,3
2	1,75		179,4	0,37	66,4	4,1		118	0,6	77,8	6,2		149,4	1,5	4,9	228
3	3,55	5	133,2	0,38	50,6	5,5	10	97,4	0,62	60	7,5	17	100,8	1,6	7,3	159
4	5,25		56,2	0,4	22,4	13		75	1,6	123	9,6		72,7	1,65	10,1	120
5	7		12,4	0,41	5,04	59		54	5,1	271	13,6		56,7	1,71	15,7	80

В §3.4 выполнен теоретический расчет ВАХ и КТЧ на основе модели поликристаллической полупроводниковой пленки как линейной цепочки последовательно включенных полупроводник-диэлектрик-полупроводник-

диэлектрик-... слоев (ПДП-структуры). Для простоты считаем полупроводники с обеих сторон диэлектрической прослойки одинаковыми. Совершенно разные параметры (средство к электрону χ , ширина запрещенной зоны E_g и т.д.) полупроводника и диэлектрика приводят к разрыву энергетических зон на их границе раздела. Величина скачка потенциала на границе раздела определяется величинами χ_{II} и χ_D : $\Delta E_c = \phi_s = \chi_{II} - \chi_D$. Потоками неосновных носителей через структуру пренебрегаем. Также не принимаем во внимание генерацию и рекомбинацию носителей зарядов в ОПЗ и диэлектрика. Механизм переноса носителей через ОПЗ слои является диодным, а через диэлектрический слой - туннельным и шоттковским. Протекающий через структуру плотность электрического тока $j = j_T + j_{Ш}$. Для j_T и $j_{Ш}$ получены выражения

$$j_T = j_s \exp(-\Theta_0^{(1)}(U)) \cdot \left[\exp \frac{2qU}{\kappa T} - 1 \right], \quad (16)$$

$$j_{Ш} = j_s \cdot \exp \left[-\frac{\phi_s + qU}{\kappa T} \right] \cdot \left(\exp \frac{2qU}{\kappa T} - 1 \right), \quad (17)$$

где

$$j_s = \frac{1}{4} q n_0 \bar{v} \exp \left(-\frac{\phi_0}{\kappa T} \right), \quad \Theta_0^{(1)}(U) = \sigma \lambda u_{\max}^{1/2} + \frac{qU + \beta^2 \phi_0 U^2}{\kappa T}, \quad \sigma = 2\sqrt{2m_n^* / \hbar},$$

$$\chi = \frac{\varepsilon_D N_A}{\varepsilon_{II} N_D}, \quad \beta = \frac{2q}{A\lambda^2} \cdot \frac{1}{1 + \chi}, \quad A = \frac{4\pi q^2}{\varepsilon_D} N_A, \quad \bar{v} = \sqrt{\frac{8\kappa T}{\pi m_n^*}}.$$

Здесь q , m_n^* и n_0 - заряд, эффективная масса и концентрация электронов, ϕ_0 - максимальная высота потенциального барьера ОПЗ в исходном состоянии.

На рис. 7 показаны теоретические ВАХ для полного (кривая 1), туннельного (2) и шоттковского (3) токов через структуры ПДП. Видно, что теоретическая кривая 1 качественно хорошо воспроизводит экспериментальную кривую ВАХ пленки *PbSe* с $T_n=100$ °С и $d \approx 10$ мкм (треугольники). Из сравнения теоретических кривых 1, 2 и 3 заключаем, что нелинейность ВАХ, обнаруживающаяся при более высоких напряжениях в основном обусловлена шоттковским вкладом тока через интерфейс. Таким образом, развитая теория расчета ВАХ поликристаллических полупроводниковых пленок качественно правильно отражает основные особенности экспериментальных кривых.

Для выбранных параметров численного расчета на рис. 7 получены следующие значения КТЧ

$$K_T = \frac{j_T^\varepsilon - j_T}{j_T \cdot \varepsilon} \approx 5 \cdot 10^2, \quad K_{Ш} = \frac{j_{Ш}^\varepsilon - j_{Ш}}{j_{Ш} \cdot \varepsilon} \approx 10, \quad K = \frac{j^\varepsilon - j}{j \cdot \varepsilon} \approx 4 \cdot 10^2. \quad (18)$$

Такая грубая оценка КТЧ хорошо совпадает с экспериментальными результатами по *PbS*, *PbTe* и *PbSe*.

На рис.7 представлено сравнение экспериментальной (кружки) и теоретической (кривая 1') ВАХ при деформации сжатия $\varepsilon \approx -1.0 \cdot 10^{-2}$ отн.ед.,

рассчитанная по формулам (16) и (17). Видно хорошее совпадение теории с экспериментом в линейном и небольшое отклонение (5-7 %) в нелинейном участках ВАХ.

В четвертой главе диссертации «Некоторые оптические свойства сильнолегированных поликристаллических пленок и исследование в них деформационных эффектов на переменном токе» излагаются результаты сравнительного исследования спектров поглощения, отражения, диэлектрической проницаемости сильнолегированных поликристаллических пленочных образцов $PbTe:Pb:Te$, $PbSe$, деформационных характеристик на переменном токе этих пленок и пленок $(Bi_{0,3}Sb_{0,7})_2Te_3$.

На рисунках 8 и 9 представлены спектры поглощения пленок $PbTe:Te$ и $PbTe:Pb$. Видно, что для всех образцов имеются четкие полосы как фундаментального, так и примесного поглощения. При энергии ИК фотонов $\hbar\omega \geq E_g$ наблюдается резкое возрастание поглощения, обусловленное межзонными оптическими переходами носителей зарядов $\alpha \sim (\hbar\omega - E_g)^{1/2}$.

Для пленок $PbTe:Te$ отсекаемые продолжением прямых участков $\alpha^2(\omega)$ на оси абсцисс находится в интервале 0,29-0,33 эВ. В пленках $PbTe:Pb$ с избытком свинца 0,2 и 2,2 масс % $\alpha^2(\omega)$ отсекает на оси абсцисс значение $\hbar\omega \approx 0,32$ эВ, что почти совпадает с оптической шириной запрещенной зоны монокристаллов теллурида свинца. При избытке свинца 1,2 вес % край спектра собственного поглощения сдвигается в более коротковолновую область по сравнению со спектром нелегированных образцов. Максимумы в спектрах поглощения пленок $PbTe:Te$ и $PbTe:Pb$ вблизи $\hbar\omega \approx (0,24 \pm 0,02)$ эВ связаны присутствием в пленках кислорода, что подтверждается и работами других авторов, а дополнительный максимум на энергии $\hbar\omega \approx 0,13$ эВ в

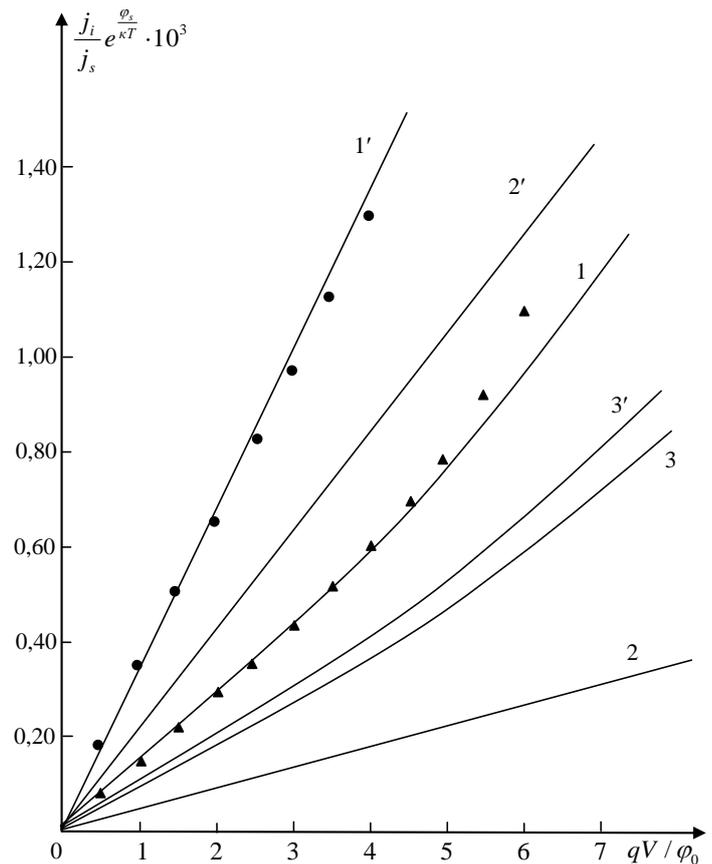


Рис. 7. Теоретические (сплошные линии) и экспериментальные (треугольники и кружки) ВАХ структуры ПДП и пленки $PbSe$. Кривые 1, 2 и 3 зависимости $j(U)$, $j_T(U)$ и $j_{III}(U)$, а 1', 2' и 3'-то же самые при деформации сжатия $\varepsilon \cong -1,0 \cdot 10^{-2}$ отн.ед.

спектрах $PbTe:Te$ с избытком теллура (1,8÷3,8) масс. % - наличием свободного теллура.

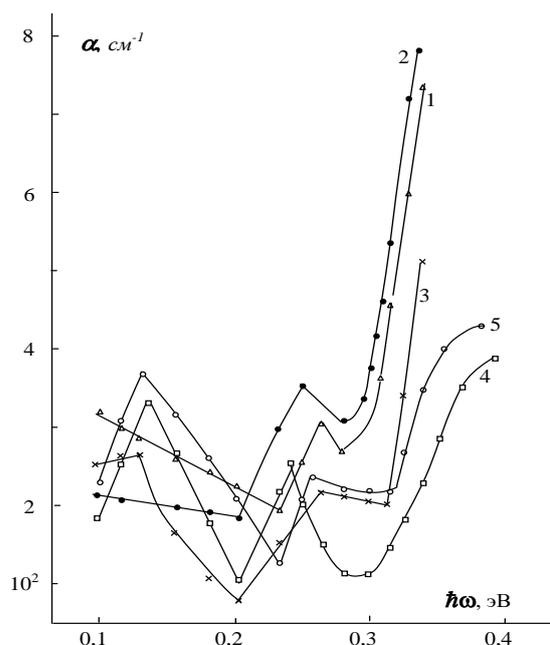


Рис. 8. Спектры поглощения пленок $PbTe$ с избытком ΔTe , масс %: 1-0; 2-0,8; 3-1,8; 4-2,8; 5-3,8.

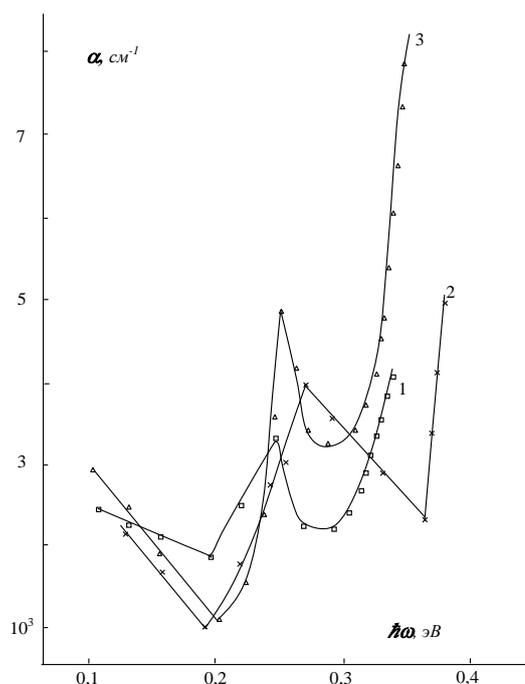


Рис. 9. Спектры поглощения пленок $PbTe$ с избытком ΔPb , масс %: 1-0,2; 2-1,2; 3-2,2.

Известно, что в $PbTe$ при внутрizonном поглощении света свободными носителями, имеет место зависимость $\alpha \sim \omega^a$. При этом оказалось, что если концентрация носителей заряда $n < 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, то преобладающим механизмом рассеяния является рассеяние на оптических колебаниях решетки и $a=3$. Если $n > 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, то носители заряда рассеиваются в основном на акустических колебаниях решетки и $a \approx 1,5$.

Эти обнаруженные особенности спектров поглощения пленок $PbTe:Te$ и $PbTe:Pb$ показывают на некоторые различия в структуре и составе исследуемых пленок, что находится в согласии с ранее полученными данными при измерении тензометрических свойства этих пленок в гл. III.

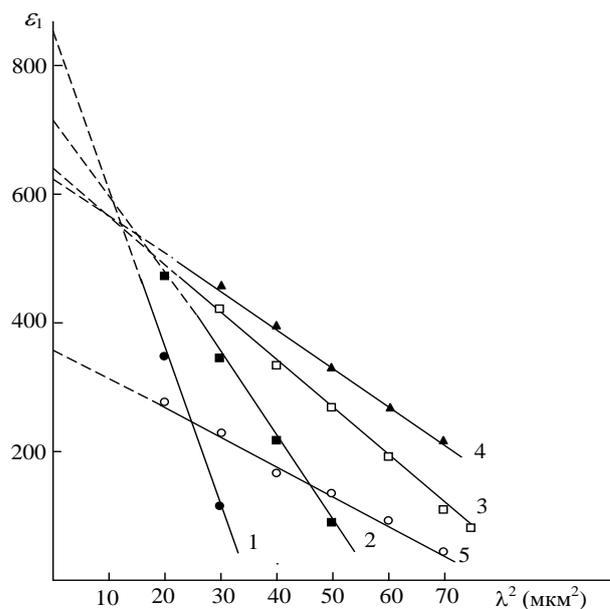


Рис. 10. Зависимость вещественной части диэлектрической проницаемости $PbSe$ от квадрата длины волн при различном времени отжига $t_{отж}$ (мин): 1-0, 2-30, 3-80, 4-120, 5-180.

Экспериментальная зависимость $\text{Re} \varepsilon_\infty$ от λ^2 для $PbSe$ с различными временами отжига представлена на рис.10. Экстраполяция линейного участка этих зависимостей позволяет определить высокочастотную диэлектрическую проницаемость пленок ε_∞ . Из наклона прямолинейного участка спектра можно определить отношение N/m^* . Были определены эффективная масса m^* , время релаксации τ и концентрация N носителей заряда в поликристаллических пленках $PbSe$. Результаты вычислений представлены в таблице 3. Здесь также приведены экспериментально определенные значения высокочастотной диэлектрической проницаемости ε_∞ , показателя преломления n , толщины d , коэффициента тензочувствительности K , удельной электропроводности σ_0 пленок и подвижности μ носителей заряда.

Параметры пленки $PbSe$, в зависимости от времени отжига.

Таблица 3

$t_{отж}$	ε_∞	n	d , мкм	K , отн.ед.	$\langle \tau \rangle$, 10^{-12} с	σ_0 , $\text{Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$.	μ , $\text{см}^2 / \text{В} \cdot \text{с}$	$N \cdot 10^{-16}$, см^{-3}	$\frac{m^*}{m} \cdot 10^2$
Неотож.	860	7,37	0,14	410	2,27	0,057	5,2	6,85	0,78
30 мин	730	12,81	0,13	220	1,22	0,026	2,37	6,86	0,92
80 мин	612	11,2	0,116	220	1,22	0,022	1,97	6,97	1,1
120 мин	618	7,38	0,39	120	0,66	0,012	1,1	6,86	1,09
180 мин	370	9,79	0,2	90	0,5	0,005	0,45	6,87	1,82

Видно, что полученные экспериментальные результаты из оптических спектров качественно согласуются с данными, полученными холловских измерений (ср. с табл. 2).

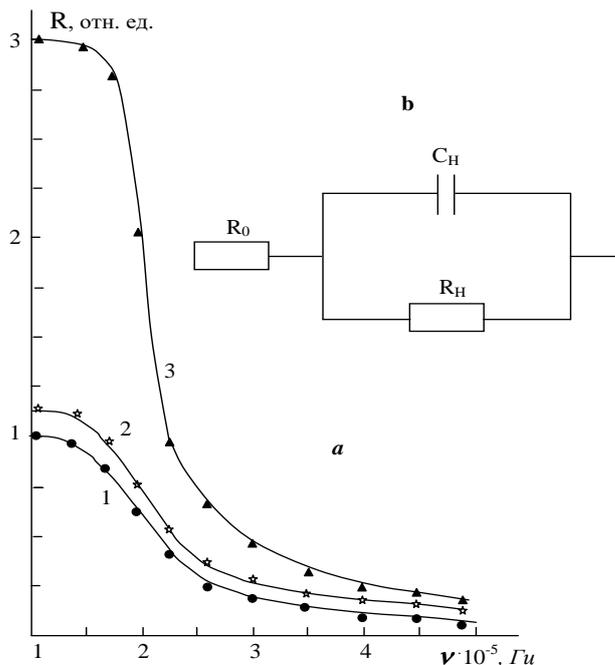


Рис. 11. Частотная зависимость сопротивления пленок $PbTe$ с избытком ΔTe в масс %: 0 (кривая 1), 0.8 (2), 3.8 (3).

Была изучена частотная зависимость сопротивления пленок $PbTe:Te$ в интервале частоты переменного тока $0 \leq \nu \leq 10^6 \text{ Гц}$. Результаты приведены на рис. 11. Видно, что

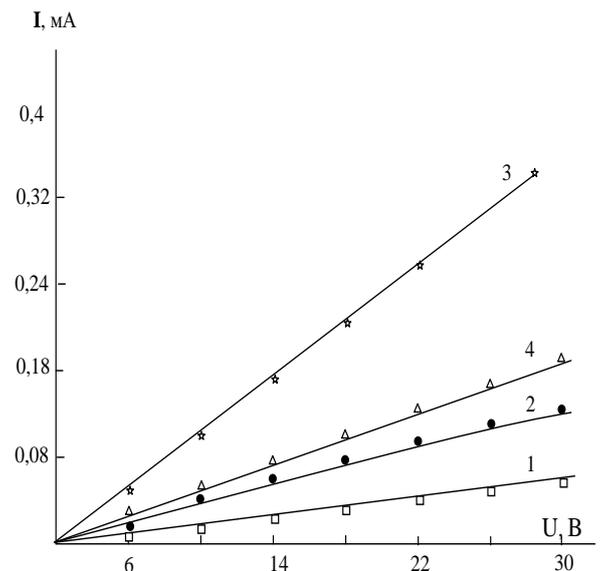


Рис.12. ВАХ пленок $PbTe:Te$ (1,2) и $PbTe:Pb$ (3,4) при частотах питающего сигнала ν , Гц : 1,3-0; 2,4- $4 \cdot 10^5$.

Была изучена частотная

избыток теллура приводит к резкому увеличению сопротивления пленки. С ростом частоты приложенного синусоидального напряжения электрическое сопротивление пленки сначала до частоты $1,5 \cdot 10^5$ Гц медленно падает, затем наблюдается резкий лоренцевский спад. Характер изменения сопротивления от частоты $R(\nu)$ для всех образцов почти одинаковый. При значении $\omega > 3 \cdot 10^5$ Гц зависимость сопротивления с различным избытком ΔTe замедляется и стремится к предельному значению.

Оказалось, что пленки $PbTe:Pb$ при переменном токе ведут себя несколько по иному, чем пленки $PbTe:Te$. Электропроводность пленок, с избытком свинца ΔPb до 0,2 масс % с ростом частоты переменного тока увеличивается, как и в пленках $PbTe$ и $PbTe:Te$ (кривые 1,2 на рис 11), а у образцов $PbTe:Pb$, содержащих больше 0,2 масс.% свинца, наоборот проводимость уменьшается. Это хорошо видно из угла наклона $ВАХ$, приведенных на рис.12 (кривые 3,4). Рост угла наклона $ВАХ$ к оси абсцисс соответствует увеличению проводимости.

В главе IV также исследована частотная зависимость сопротивления тензорезистивных пленок $(Bi_{0,3}Sb_{0,7})_2Te_3$ под действием циклической знакопеременной механической деформации. Показано, что сопротивление пленки толщиной 3-4 мкм и размерами 5x30 мм, выращенной термовакуумным испарением при температуре полиамидной подложки $T_s \leq 363$ К, резко уменьшается вблизи пороговой частоты $\omega_0 \approx 10^5$ Гц переменного тока до значений сопротивления плотных пленок с $T_s \approx 423$ К. После воздействия $N \approx 10^5$ циклов механической деформации с амплитудой $\varepsilon = \pm 1 \cdot 10^{-3}$ отн.ед. сопротивление пленки увеличивается в 1.5 раза, а значение ω_0 уменьшается почти в 10^2 раз. Полученные результаты объясняются на основе модели пористых пленок с межгранульными интерфейсами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований “Явления пьезосопротивления в структурах из халькогенидов свинца и висмута” можно сделать следующие выводы:

1. Разработан метод феноменологического расчета сдвиговых $(m_{11}-m_{12})/2$, m_{44} и объемного $(m_{11}+2m_{12})/3$ коэффициентов эластосопротивления полупроводниковых кристаллов типа PbS с учетом «малых эффектов» и показано, что величина m_{44} , состоит из двух частей, причем лишь сильно изменяющееся с температурой слагаемое зависит от концентрации.

2. Теоретически рассчитаны импеданс и коэффициент тензочувствительности поликристаллических полупроводников с учетом модуляции приповерхностных ОПЗ кристаллических зерен, в результате чего предсказан эффект перетекания между продольными и поперечными поверхностными состояниями, приводящий к аномально большой тензочувствительности.

3. Проведен расчет ВАХ и КТЧ тонких поликристаллических пленок на основе механизмов шоттковского и туннельного токопрохождения и показано, что результаты численного расчета хорошо воспроизводят известные экспериментальные результаты для пленочных тензорезисторов PbSe.

4. Обосновано, что с ростом концентрации носителей тока КТЧ поликристаллических пленок типа PbS уменьшается и деформационные свойства стабилизируются, в результате чего варьируя концентрацией носителей можно создавать тензодатчиков с устойчивыми параметрами, линейными ВАХ и более умеренными значениями КТЧ ≈ 250 .

5. Показано, что сверх стехиометрические добавки Pb до 2 масс.% в поликристаллической пленке $PbTe$ не нарушает линейность ВАХ при относительных деформациях $\varepsilon < 1,32 \cdot 10^{-3}$ отн.ед. и приводит к росту проводимости пленки, а введение добавки Te уменьшает проводимость и увеличивает нелинейность ВАХ, причем деформация сжатия сопровождается ростом проводимости, а растяжение - уменьшением её.

6. Экспериментально показано, что сверхстехиометрические добавки Te и Pb в пределах растворимости заметно изменяет оптические параметры пленок $PbTe$, в частности, путем образования отдельных фаз с неоднородным распределением по объему пленки приводит к сильной поляризации, увеличению $\varepsilon_{эфф}$ и неоднородному изменению спектра поглощения.

7. Показано, что в спектрах отражения PbSe в ИК области наблюдается характерный минимум с частотой ω_{min} , обусловленный плазменными колебаниями носителей заряда, что позволило определить эффективную массу носителей заряда по известному значению их концентрации N , а также удельную электропроводность, подвижность электронов, время их релаксации и ряд оптических параметров.

8. Обнаружено, что сопротивление пористой поликристаллической пленки $(Bi_{0.3}Sb_{0.7})_2Te_3$, выращенной при температуре подложки $T_s \leq 363 K$, резко уменьшается вблизи пороговой частоты $\omega_0 \approx 10^5$ Гц переменного тока до значений сопротивления плотных пленок с $T_s \approx 423 K$, а после воздействия $N \approx 10^5$ циклов механической деформации с амплитудой $\varepsilon = \pm 1 \cdot 10^{-3}$ отн.ед. сопротивление пленки увеличивается в 1.5 раза, значение ω_0 уменьшается почти в 10^2 раза.

**SCIENTIFIC COUNCIL of PhD.03/27.02.2020.FM.106.01
ON AWARD OF PHYLOSOFY DOCTOR DEGREE
AT THE FERGHANA POLYTECHNIC INSTITUTE OF UZBEKISTAN**

FERGHANA POLYTECHNIC INSTITUTE

KHUSANBOY MANNOPOVICH SULAYMONOV

**PIEZO RESISTANCE PHENOMENA IN STRUCTURES FROM LEAD
AND BISMUTH CHALCOGENIDES**

01.04.07- Condenced matter physics

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

Ferghana – 2020

The theme of dissertation of doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences was registered at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number № B2020.2.PhD/FM39.

Dissertation has been prepared at the Fergana Polytechnic Institute.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the website of Scientific council (www.ferpi.uz) and on Information and educational portal "ZiyoNet" (www.ziynet.uz).

Scientific supervisor: Nosirjon Khaydarovich Yuldashev
Doctor of physical-mathematical sciences, professor

Official opponents: Izzatillo Nuritdinov
Doctor of physical-mathematical sciences, professor
Rustam Yavkachovich Rasulov
Doctor of physical-mathematical sciences, professor

Leading organization: Tashkent university of information technology
named after Muhammad al-Kharezmi

Dissertation defense will take place 21 " 11 2020 at 14:00 at the meeting of the Scientific Council PhD.03 / 27.02.2020.FM.106.01 at the Fergana Polytechnic Institute (Address: 150107, Fergana, Fergana str., 86. Phone: (+99873) 241-12-06, fax (+99873) 241-12-06, e-mail: uzferfizika@mail.ru , small meeting room).

The thesis can be found in the library (CIR) of the Institute. (registered under No. 0001-A)
Address: 150107, Ferghana, st. Ferghana, 86. Tel: (+99873) 241-12-06,

The abstract of the dissertation sent out on "7" "11" 2020.

(Mailing report No. PhD-FM-02 on "7" "11" 2020)



N.A. Sultanov

N.A. Sultanov
Chairman of scientific council
on award of doctor philosophy,
DSc in physics and mathematics, professor

B.Z. Polvonov

B.Z. Polvonov
Scientific secretary of scientific council
on award of doctor philosophy,
PhD in physics and mathematics, docent

R.Ya. Rasulov

R.Ya. Rasulov
Chairman of scientific Seminar under Scientific
Council on award of doctor philosophy,
DSc in physics and mathematics, professor

INTRODUCTION (abstract of PhD dissertation)

The aim of research work is to study new mechanisms of the piezoelectric resistance of crystals, polycrystals of the PbS type and the strain sensitivity of polycrystalline films based on them.

In accordance with the goal it was necessary to solve the following **tasks**:

- the role of the "small effects" of the piezoelectric resistance in semiconductor single crystals and the strain sensitivity mechanisms of type polycrystals;

- tensometric properties of polycrystalline films of lead chalcogenides with impaired stoichiometry with unilateral static deformation on direct current;

- the correlation of some optical and tensometric properties of heavily doped polycrystalline films, and the study of the deformation effects in them with alternating current.

The object of the research work is pure and doped PbS, semiconductor crystals, with symmetry of zinc blende and strain-sensitive polycrystalline films based on them.

The scientific novelty of the research is as follows:

a method for theoretical calculation of the shear m_{44} and bulk $(m_{11}+2m_{12}) / 3$ coefficients of elastoresistance of PbS single crystals has been developed, taking into account the "small effects" associated with a change in the effective mass of charge carriers and the band gap;

- for the first time, a method was developed for theoretical calculation of the tensosensitivity of polycrystalline semiconductors, taking into account the contributions of modulation of potential barriers and surface states perpendicular and parallel to the directions of current and deformation;

- the I–V characteristic of a polycrystalline film under deformation was calculated, taking into account the tunneling and Schottky mechanisms of current passage through grain interfaces, and it was shown that the calculation was in good agreement with the experimental I–V characteristic of the PbSe, PbS film;

- it was shown that with an increase in the doping level, the thickness of polycrystalline PbTe: Pb films and compression deformation, the heights of potential barriers of grain boundaries decrease, as a result of which the Hall mobility $R_x\sigma$ and the concentration of charge carriers increase and the CVC of the strain gauge is linearized;

- for the first time, a close correlation was established between the deformation characteristics and absorption spectra of PbTe films with super stoichiometric additions of tellurium and lead;

- it has been shown that the dependence of the resistance and CPF of $(\text{Bi}_{0.7}\text{Sb}_{0.3})_2\text{Te}_3$ films on the number of deformation cycles, alternating current frequency and temperature is associated with a change in the parameters of interfaces between crystallites and the formation of new microcracks in the film.

Implementation of research results. Based on the results of a study of the mechanisms of strain sensitivity of semiconductor polycrystalline PbS, PbSe and PbTe films:

The developed theoretical and experimental methods for the analysis of deformation phenomena in single-, polycrystals and polycrystalline films of lead chalcogenides, which allows improving the technology for producing semiconductor strain gauges by thermal vacuum evaporation, were introduced at Uzeltekhsanoat JSC FOTON (Reference Uzeltekhsanoat AK No. 04-1/1165 from Uzeltekhsanoat 06/19/2020). The application of this method has led to the modernization of the method of manufacturing film strain gauges with linear deformation characteristics.

The results of a theoretical calculation of the elastic resistance coefficients of PbS crystals and kinetic parameters of electrons using the reflection and absorption spectra of polycrystalline PbS and PbTe: Pb; Te films were used in the fundamental project F2-2-21 “Improving the efficiency of emitters, photocells, and other optoelectronic devices on the basis of the study of excitons, polarons, bipolarons and kinetic phenomena in hetero- and nano-structures with quantum dots ”(2012–2016) to determine the parameters of electrons and excitons in semiconductor structures (Certificate of the Ministry of Higher and Secondary Special Education of the Republic of Uzbekistan No. 89-03-1887 of Juyne 16, 2020). Using scientific results, it was possible to analyze the physical mechanisms of electronic kinetic phenomena in heavily doped semiconductor structures with intrinsic and impurity absorption of light.

Approbation of research results. The main results of the dissertation were reported and discussed at 6 international and 4 republican scientific and practical conferences.

Publication of research results. On the topic of the dissertation, 20 scientific papers were published, of which 10 articles in journals recommended by the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for the publication of the main scientific results of dissertations.

The structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion, a list of used literature and is set out on 137 type written pages, including 7 tables and 34 figures.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (1 часть; part 1)

1. Sulaymonov Kh.M., Yuldashev N.Kh. Effect of Internal Stresses on the Static Strain Characteristics of $p-(Bi_{0.3}Sb_{0.7})_2Te_3$ Composite Films. // Journal of surface investigation: X-ray, synchrotron and neutron techniques, Moscow, 2016. Vol.10, No. 4, p.52-56 (Springer, IF: 0.747).
2. Сулаймонов Х.М. Влияние циклической деформации на электропроводность пленок $p-(Bi_{0.3}Sb_{0.7})_2Te_3$ на переменном токе. // Журнал технической физики. – Российская Федерация, 2017. –Т. 87, № 3, с. 471-472 (Springer, IF: 1.02).
3. Сулаймонов Х.М., Юлдашев Н.Х. Тензорезистивный эффект в поликристаллических полупроводниках с учетом продольных и поперечных поверхностных электронных состояний. // Физическая инженерия поверхности. - Украина, 2015, т. 13. № 3, с.318-324 (01.00.00, №91).
4. Юлдашев Н.Х., Сулаймонов Х.М. Спектры фундаментального поглощения сильнолегированных тензочувствительных пленок $PbTe:Pb$ и $PbTe:Te$ // Журнал Евразийский союз ученых. 2019. №10 (67), с. 76-79 (GIF. 0.388).
5. Сулаймонов Х.М., Умаров М.Г., Юлдашев Н.Х. Тензочувствительность поликристаллических пористых пленок //Актуальные проблемы современной науки-Россия. 2015, №4, с. 149-154 (01.00.00, №91).
6. Сулаймонов Х.М., Юлдашев Н.Х. Тензометрические свойства поликристаллических пленок $n-PbS$ в зависимости от уровня легирования // Узбекский Физический Журнал.-Ташкент, 2017, Vol.19. №2, с. 84-87 (01.00.00, №5).
7. Сулаймонов Х.М. Влияние сверхстехиометрических добавок Pb и Te на тензоэлектрические свойства поликристаллических пленок $PbTe$. // Научно-Технический журнал ФерПИ. - Фергана, 2013. №3, с.116-118 (05.00.00, №20).
8. Сулаймонов Х.М., Маматхонова Г.Ш., Юлдашев Н.Х., Мухторов Ф.М. Тор зонали PbS турдаги ярим- ўтказгичларнинг кичик деформацион эффектларини эътиборга олгандаги пьезоқаршилиги. // Научно-Технический журнал ФерПИ. - Фергана, 2014. №3, с. 15-22 (05.00.00, №20).
9. Сулаймонов Х.М. Влияние технологических факторов на электропроводность и тензочувствительность пленок $PbSe$. // Научно-Технический журнал ФерПИ. - Фергана, 2019. Т.23. Спец. вып. 2, с. 207-211 (05.00.00, №20).
10. Сулаймонов Х.М., Юлдашев Н.Х. Электропроводность и тензочувствительность полупроводниковых поликристаллических

II бўлим (2 часть; part 2)

11. Sulaymonov Kh.M., Yuldashev N.Kh. The deformation properties of $(Bi_{0.3}Sb_{0.7})_2Te_3$ films under the influence of unilateral cyclic sign-variable pressure. // "The Third European Conference on Physics and Mathematics " Austria, Vienna 2015 12th September. P.19-26.
12. Ахунова Ё.Н., Маматхонова Г.Ш., Сулаймонов Х.М., Юлдашев Н.Х. Эффект пьезосопротивления в поликристаллических полупроводниках с учетом поверхностных состояний. // Материалы III Международной конференции по «Оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро и наноструктурах». Фергана. 2014 г. 14-15 ноября. С 346-348.
13. Сулаймонов Х.М., Юлдашев Н.Х. Тензорезистивный эффект в поликристаллических полупроводниках с учетом продольных и поперечных поверхностных электронных состояний. // Международной конференции «Фундаментальные и прикладные вопросы физики». Ташкент. 2015 г. 5-6 ноября. С. 286-291.
14. Сулаймонов Х.М. Влияние циклических деформаций на электропроводность композитных пленок $(Bi_xSb_{1-x})_2Te_3$ в зависимости от частоты переменного тока. // XI международной заочной конференции « Развитие науки в XXI веке». Украина, Харьков. 2016 г, 14 марта. С.24-27.
15. Сулаймонов Х.М. Спектры поглощения сильнолегированных пленок $PbTe:Pb$, $PbTe:Te$. //V Международной конференции по актуальным проблемам молекулярной спектроскопии конденсированных сред. Самарканд . 2016 г. 22-24 сентября. С. 105-106.
16. Мамадиева Д.Т., Насиров М.Х., Сулаймонов Х.М., Юлдашев Н.Х. Тензодатчики конструкций при циклической знакопеременной деформации на основе полупроводниковых поликристаллических пленок. // Материалы I Международной научно-практической конференции "Актуальные проблемы внедрения инновационной техники и технологий на предприятиях по производству строительных материалов, химической промышленности и в смежных отраслях" Фергана, 24-25 мая 2019. С.331-332.
17. Сулаймонов Х.М., Султанов Ш.Д. Частотная зависимость сопротивления пленок $PbTe$ сверхстехиометрического состава. // «Физика ва физик таълимнинг замонавий муаммолари» Республика илмий анжумани. Самарканд. 2009.11-12-декабрь. С. 112-114.
18. Сулаймонов Х.М., Юлдашев Н.Х. Тензочувствительность поликристаллических пленок $PbTe:Pb$ и $PbTe:Te$. Материалы Республиканской конференции «Фундаментальные и прикладные

- вопросы физики», посвященной 100-летию Академика С. Азимова Ташкент. 2014 г. 6-7 ноября. С.114-116.
19. Жумабоев Ж.И., Сулаймонов Х.М., Исмоилов И.К. Деформационные характеристики тонких пленок $PbTe:Pb$ и $PbTe:Te$. Материалы Республиканской конференции «Современные проблемы физики полупроводников» -2015, 26-27 октября 2015 г. Нукус – 2015. С. 24-26.
20. Мамадиева Д.Т., Сулаймонов Х.М., Юлдашев Н.Х. Спектры оптического поглощения пленок из $PbTe$, сильнолегированных сверхстехиометрическими Pb и Te . “Яримўтказгичлар физикасининг ва кайта тикланувчи энергия манбаларини ривожлантиришнинг замонавий муаммолари” мавзусида Республика илмий-амалий анжумани. Андижон, 2018 йил 20-21 апрел , 126-127 бетлар.

Илмий раҳбар

Н.Х.Юлдашев

Тадқиқотчи

Ҳ.М.Сулаймонов

Авторефератнинг ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги нусхалари
Фарғона политехника институти муассислигидаги “Scientific technical
journal” журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилди.
(06.11.2020 й.)

Босишга рухсат этилди: 2020 й. Нашриёт босма табағи -3,5.
Шартли босма табағи -1,75. Бичими 84x108, 1/16.
Адади 100.
Гувоҳнома реестри № PhD/FM-02
“Poligraf Super Servis” МЧЖ
Босмахона манзили: 150100, Фарғона ш., Авиасозлар кўчаси, 2-уй.

