

**ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ҚОШИДАГИ  
ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАР ФИЗИКАСИ ВА МИКРОЭЛЕКТРОНИКА  
ИЛМИЙ-ТАДҚИҚОТ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ  
ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 РАҚАМЛИ  
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**ФАРҒОНА ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ**

**ОНАРКУЛОВ МАҚСАДЖОН КАРИМБЕРДИЕВИЧ**

**КИНЕТИК ЖАРАЁНЛАРИНИ МАТЕМАТИК МОДЕЛЛАШТИРИШ  
БИЛАН ТЕНЗОСЕЗГИР  $(\text{Bi Sb})_2\text{Te}_3$  ЮПҚА ПАРДАЛАРНИ ОЛИШ  
ТЕХНОЛОГИЯСИНИ БОШҚАРИШ**

**01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси**

**ТЕХНИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)  
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

**Тошкент – 2021**

**Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD)  
диссертацияси автореферати мундарижаси**

**Оглавление автореферата диссертации  
доктора философии (PhD) по техническим наукам**

**Contents of dissertation abstract  
of doctor of philosophy (PhD) on technical sciences**

**Онаркулов Мақсаджон Каримбердиевич**

Кинетик жараёнларни математик моделлаштириш билан тензосезгир (BiSb)<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> юпқа пардаларни олиш технологиясини бошқариш..... 4

**Онаркулов Мақсаджон Каримбердиевич**

Управление технологией получения тензочувствительных пленок (BiSb)<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> математическим моделированием кинетических процессов..... 23

**Onarkulov Maksadjon Karimberdievich**

Control of the technology of obtaining strain-sensitive films (BiSb)<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> by mathematical modeling of kinetic processes..... 43

**Эълон қилинган ишлар рўйхати**

Список опубликованных работ  
List of published works..... 47

**ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ҚОШИДАГИ  
ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАР ФИЗИКАСИ ВА МИКРОЭЛЕКТРОНИКА  
ИЛМИЙ-ТАДҚИҚОТ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ  
ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 РАҚАМЛИ  
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**ФАРҒОНА ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ**

**ОНАРКУЛОВ МАҚСАДЖОН КАРИМБЕРДИЕВИЧ**

**КИНЕТИК ЖАРАЁНЛАРИНИ МАТЕМАТИК МОДЕЛЛАШТИРИШ  
БИЛАН ТЕНЗОСЕЗГИР  $(\text{Bi Sb})_2\text{Te}_3$  ЮПҚА ПАРДАЛАРНИ ОЛИШ  
ТЕХНОЛОГИЯСИНИ БОШҚАРИШ**

**01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси**

**ТЕХНИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)  
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

**Тошкент – 2021**

Техника фанлари буйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2020.4.PhD/FM484 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация иши Фарғона давлат университетида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (Ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифасида ([www.ispm.uz](http://www.ispm.uz)) ва «ZiyoNet» ахборот-таълим порталининг [www.ziyo.net](http://www.ziyo.net) веб-саҳифаси манзилига жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:

Далиев Хожакбар Султанович  
Физика-математика фанлари доктори,  
профессор

Расмий оппонентлар:

Рахматов Ахмаджон Зайнитдинович  
техника фанлари доктори, профессор  
Зикриллаев Нурилла Фатхуллаевич  
Физика-математика фанлари доктори,  
профессор

Етакчи ташкилот:

Нукус давлат педагогика институти

Диссертация химояси Ўзбекистон Миллий университети қошидаги Яримўтказгичлар физикаси ва микроэлектроника илмий-тадқиқот институти ҳузуридаги илмий даражалар берувчи DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 рақамли Илмий кенгашнинг 2021 йил «25» 12 соат 10<sup>00</sup> даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100057, Ўзбекистон, Тошкент ш., Янги Олмазор кўчаси, 20-уй, Тел.: (+99871)248-79-94, факс: (+99871)248-79-92, e-mail: [info@ispm.uz](mailto:info@ispm.uz))

Диссертация билан Ахборот технологияларини жорий этиш бўлимида танишини мумкин. (21 рақам билан рўйхатга олинган). Манзил: 100057, Ўзбекистон, Тошкент шаҳри, Янги Олмазор кўчаси, 20-уй. Тел.: (+99871) 248-79-92; e-mail: [info@ispm.uz](mailto:info@ispm.uz)).

Диссертация автореферати 2021 йил «18» 12 кун тарқатилди.  
(2021 йил «18» 12 даги 31 рақамли реестр баёниномаси).



Ш.Б. Утамурадова  
Илмий даражалар берувчи  
илмий кенгаш раиси, ф.-м.ф.д., профессор

Ж.Ж. Хамдамов  
Илмий даражалар берувчи  
илмий кенгаш илмий котиби, PhD,  
кўмакчи илмий ходим

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

## КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳонда яримўтказгичлар физикасидаги фундаментал кашфиётлар билан бир вақтда яримўтказгич материаллари олиш ва уларга асосланган қурилмаларни ишлаб чиқариш технологияси ҳам ривожланиб бормоқда. Висмут-сурьма тизимининг қотишмалари асосидаги материал юқори тензо ва термоэлементларни яратиш учун энг самарали материаллардан биридир, шу сабабли уларда кечадиган физик ҳодисаларни, хусусан, тензосезгирликни ушбу материалларга асосланган кичик ўлчамли тузилмаларни ўрганиш ва улар асосида замонавий электрон қурилмалар ишлаб чиқаришда муҳим аҳамият касб этади.

Бугунги кунда дунё миқёсида поликристалл тузилмалардаги физик жараёнларни ўрганиш, хусусан, поликристал пардаларнинг шаклланиш жараёнларини ўрганиш; технологик омилларнинг физик механизмларга таъсири, энергетик спектрларнинг шаклланиш қонуниятларини ўрнатиш ва кинетик жараёнларни моделлаштириш муҳим вазифалардан бири ҳисобланади. Ушбу муаммоларнинг ечими юқори ишчи параметрларига эга бўлган тензосезувчи элементларини ишлаб чиқариш имкониятларини сезиларли даражада кенгайтиришга имкон беради. Ушбу йўналишларда олиб борилган илмий-тадқиқот ишлари диссертация мавзусининг долзарблигини кўрсатади.

Республикамизда қаттиқ қоришмаларнинг эпитаксиал қатламларини олиш технологиясига, шунингдек яримўтказгич материаллар ва улар асосидаги асбоблар структураларининг хусусиятларини комплекс ўрганиш борасида муайян натижаларга эришилмоқда. Бу соҳада турли хил тагликларда тор зонали яримўтказгичли қаттиқ қоришмаларнинг монокристалл эпитаксиал қатламларини ўстириш ва улар асосида инфрақизил соҳада сезгирлиги юқори бўлган кўп қатламли структуралар олишга бўлган эҳтиёж ортиб бормоқда. Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида «... мутлақо янги турдаги маҳсулотлар ва технологияларни ишлаб чиқаришни ўзлаштириш, шу асосда маҳаллий товарларнинг ташқи ва ички бозорларда рақобатбардошлигини таъминлаш»<sup>1</sup> вазифалари белгиланган. Мазкур йўналишда микроэлектроника қурилмаларини ишлаб чиқариш учун зарур электрофизик хусусиятларга эга бўлган янги яримўтказгич материаллар қаттиқ қоришмаларни яратиш муҳим илмий аҳамият касб этади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сонли Фармони билан тасдиқланган 2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясига мувофиқ илмий-тадқиқот ва инновацион фаолиятни ривожлантиришнинг самарали механизмларини яратиш, илмий ва инновацион ютуқларни

амалиётга жорий этиш масалаларида, замонавий усулларни яратишга, шунингдек юқори самарадорликка эга асбоблар олиш технологияси учун

---

<sup>1</sup> Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги "2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича ҳаракатлар стратегияси тўғрисида" ги ПФ 4947-сонли фармони.

дастурий таъминотга алоҳида эътибор қаратилмоқда. Ушбу диссертация тадқиқотлари маълум даражада Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 13 февралдаги "2017-2021 йилларда электротехника саноатини ривожлантиришнинг устувор йўналишлари тўғрисида" ги ПФ-2772-сонли Фармонида, 2017 йил 17-февралдаги ПФ-2789-сонли "Фанлар академиясининг фаолияти ва илмий-тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида", 2018 йил 19 февралдаги 5349-сонли ва "Ахборот технологиялари ва коммуникацияларини янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида" фармонларида, шунингдек ушбу соҳада қабул қилинган бошқа норматив-ҳуқуқий ҳужжатлар ва актларда кўзда тутилган вазифаларни бажаришга хизмат қилади.

**Тадқиқотларнинг Республикасида фан ва технологиялари тараққиётининг устувор йўналишларига мослиги.** Мазкур тадқиқот иши республика фан ва технологиялар ривожланишининг III. «Энергия, энергия ресурсларини тежаш, транспорт, машинасозлик ва асбобсозлик; замонавий электроника, микроэлектроника, фотоника, электрон асбобсозликни ривожлантириш» устувор йўналишларига мувофиқ бажарилган.

**Муаммони ўрганилганлик даражаси.** Халқ хўжалигининг турли соҳаларида қўлланиладиган электрон қурилмаларнинг ривожланиши билан боғлиқ ҳолда, сўнгги йилларда дунёнинг илғор мамлакатлари олимлари ва ишлаб чиқарувчиларининг эътиборлари поликристалл конструкцияларга йўналтирилган физик жараёнларни ўрнатишга, шунингдек уларнинг ишлаш ишчи параметрларини ошириш усуллари ишлаб чиқишга қаратилди.

Рус олимлари В.И.Стафеев, В.И.Кайданов, А.Н.Серьезнов, В.И. Фистуль ва бошқалар томонидан бир жинсли бўлмаган тузилмаларни ўрганилган ва уларда юз берадиган физик жараёнларнинг хосликлари ўрнатилган, киришмаларнинг энергетик спектрлари аниқланган, улардан фойдаланиш ва ишчи параметрларини ошириш усуллари аниқланди.

Яримўтказгичлар ва яримўтказгичли қурилмалар физикасининг ривожланишига Ўзбекистоннинг олимлари, шу жумладан академиклар М.С.Саидов, Р.А.Мўминов, А.Т.Мамадалимов, С.З.Зайнабидинов, М.К.Баходирхоновлар ва бошқалар ўз хиссаларини қўшдилар. Поликристалл яримўтказгичларнинг хусусиятларини физика-математика фанлари докторлари С.Х.Шамирзаев (бир жинсли бўлмаган тузилмалардаги кинетик жараёнларни ўрганиш), Б.А.Атакулов (поликристалл юпқа пардалардаги деформация ҳодисаларини ўрганиш), Ш.Б.Атакулов (юпқа пардали тузилмаларнинг термо ва тензоэлектрик хусусиятлари), Абдурахманов К.П. (нуқсонларни ҳосил қилиш жараёнлари) ва бошқалар томонидан ўрганилган ва кристаллитлар чегара қисмини ярим ўтказгич ва диэлектрикнинг ҳажмий қисми хусусиятларидан фарқли бўлишини белгилайдиган асосий омил, бу яримўтказгичнинг тақиқланган зонасида энергетик сатҳ ҳосил қиладиган сирт электрон ҳолатларининг мавжуд эканлиги аниқланди.

Яримўтказгичлар ва яримўтказгич конструкцияларининг хусусиятларини ўрганиш бўйича экспериментал маълумотларнинг кўплигига қарамай, юқори самарали юпқа пардалар асосидаги конструкцияларни олиш учун технологик

жараёнларни мақсадли бошқаришга имкон берадиган жараён ҳали ҳам мавжуд эмас.

**Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган олий таълим ёки илмий-тадқиқот муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги.** Диссертация тадқиқоти Фарғона давлат университетининг илмий-тадқиқотлар режасининг ИТД-12-56 “Яримўтказгичли термоэлектрик материалларни олиш технологияси” (2012-2014)) илмий лойиҳаси доирасида бажарилган.

**Тадқиқотнинг мақсади** висмут ва сурьма халкогенидлари асосида юқори самарали поликристалли юпқа парда элементларини олиш технологиясини назорат қилиш мақсадида кинетик жараёнларнинг математик моделини ишлаб чиқишдан иборат.

**Тадқиқот вазифалари:**

$Bi_{2-x}Sb_xTe_3$  асосида юқори сезгир юпқа пардали таркибларини олишнинг технологик жиҳатларини аниқлаш;

юпқа пардаларни олиш технологик шароитларини уларнинг таркиби ва тузилишига таъсирини аниқлаш;

$Bi_{2-x}Sb_xTe_3$  поликристалл юпқа пардаларида кинетик жараёнларнинг физик механизмини яратиш;

$Bi_{2-x}Sb_xTe_3$  асосида юпқа пардалардаги кинетик жараёнларнинг математик моделини яратиш;

$Bi_{2-x}Sb_xTe_3$  асосидаги юпқа пардали сезгир элементлардан механик зўриқишларни ўлчаш учун ўлчагичлар сифатида амалий фойдаланиш имкониятларини аниқлаш.

**Тадқиқот объекти** сифатида вакуумда термик буғлантириш усули билан олинган  $Bi_{2-x}Sb_xTe_3$  асосидаги поликристалл юпқа пардалар олинган.

**Тадқиқот предмети**  $Bi_{2-x}Sb_xTe_3$  дан тензосезгир юпқа пардаларни олишни технологик жараёнларни ўрнатиш, электрофизик параметрларнинг ўзгариш кинетикасининг математик моделини ишлаб чиқиш ва тажриба натижалари билан таққослашдан иборат.

**Тадқиқот усуллари.** Белгиланган вазифаларни ҳал қилиш учун қуйидаги усуллар қўлланилган: вакуумда термик буғлантириш, электрон микроскоп, рентгенологик таҳлил ва компьютер дастурини ишлаб чиқиш усулларида фойдаланилган.

**Тадқиқотининг илмий янгилиги** қуйидагилар иборат:

$Bi_{2-x}Sb_xTe_3$  асосида юқори сезгир поликристалли юпқа парда элементларини олиш физико-кимёвий жиҳатлари ва технологиясини ишлаб чиқилган;

$Bi_{2-x}Sb_xTe_3$  асосида тензосезгир юпқа пардалар олишнинг оптимал ҳолатлари аниқланган. Максимал тензосезгирлик коэффициенти  $T_{\pi} = 90^{\circ}C$  ва  $W=200 \text{ \AA}/c$  да кузатилган.  $T_{\pi}$  ва  $W$  ортиши билан юпқа пардаларнинг муайян солиштирма қаршилиги камайиши аниқланган;

ҳавода юпқа пардаларни оптимал мувозанатлаштириладиган қиздириш вақти 6-8 соат эканлиги аниқланган, бу эса  $125^{\circ}C$  ҳароратда шундай қиздириш учун теллур буғида сарфланадиган вақтдан 4 соат кам эканлиги аниқланган;

тензо кўрсаткич сифатида юпка парда структураларини қўллаш орқали  $\text{Vi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$  асосида паст ҳароратларда ( $20\div 40$  °C) юпка парда ҳажмининг ўзгаришини қайд қилиш учун янги усул ишлаб чиқилган;

$\text{Vi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$  поликристалли юпка пардаларнинг ҳосил бўлиш механизми белгиланган ва  $50\text{-}150$  °C таглик ҳарорати  $100\text{Å}$  дан  $500\text{Å}$  гача ошиши билан юпка пардалардаги кристаллитларнинг ўртача катталиги ортиб бориши кўрсатилган;

**Тадқиқотнинг амалий натижалари** қуйидагилар иборат:

$\text{Vi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$  бирикмаси асосидаги поликристалл юпка пардаларни паст ҳароратларда ҳажм ўзгаришини қайд этиш учун қўллаш бўйича тавсиялар ишлаб чиқилди;

Реал энергетик структурани ҳисобга олган ҳолда поликристалл юпка пардали элементлардаги кинетик жараёнларни тажрибавий натижаларга мос келадиган дастур ишлаб чиқилди.

**Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги** замонавий ўлчаш воситалари ва тадқиқот усуллари қўлланилганлиги, экспериментал ва ҳисобланган маълумотларни бошқа муаллифларнинг назарий натижаларни билан мувофиқлиги, шунингдек олинган натижаларни замонавий физик моделлар асосида тавсифланганлиги билан асосланган.

**Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.** Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти  $\text{Vi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$  бирикмаси асосида юқори сезгирликка эга бўлган поликристалл юпка пардаларни олиш технологиясининг индивидуал ва умумлаштирилган эмпирик қонуниятларини аниқлаш ва бир жинсли бўлмаган тузилмаларда юз берадиган физик жараёнлар ҳақидаги тушунчаларни кенгайтириш билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти  $\text{Vi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$  бирикмаси асосида юқори тензо ва термоэлементларни яратиш, тензосезгирликни ушбу материалларга асосланган кичик ўлчамли тузилмалар асосида замонавий электрон қурилмалар ишлаб чиқаришда қўлланилишидан иборат.

**Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши.**

$\text{Vi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$  бирикмаси асосида юқори сезгирликка эга бўлган поликристалл юпка пардаларни олиш технологиясининг индивидуал ва умумлаштирилган эмпирик қонуниятларини аниқлаш бўйича олинган илмий натижалар асосида:

$\text{Vi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$  асосидаги поликристалл юпка пардалар таркиби ва структурасини шаклланиши механизмини ўрганиш натижалари ва улар асосида зарядлар кўчиши кинетик ҳодисалари характерини ойдинлаштириш, уларни математик моделлаштириш ва тажрибавий натижалар билан таққослаш илмий тадқиқот натижалари 2012-2016 йилларда Наманган давлат университетиде бажарилган Ф2-ОТ-О-15494 “Нурлатгичлар, фотоэлементлар ва бошқа оптоэлектрон қурилмалар самарадорлигини кутбий, биқутбий ва кучайтириш ҳодисалари асосида квантли нуқтавий гетеро ва наноструктураларда кенгайтиришни ўрганиш асосида ошириш” фундаментал лойиҳада қўлланилган (Олий ва ўрта махсус таълим вазирлигининг 2020 йил

2 октябрдаги № 89-03-3616 маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш оптоэлектрон нурлатгичларнинг самарадорлигини ошириш имконини берган.

тензосезгирлик коэффициенти ва қаршилиқнинг температуравий коэффициенти ўзгаришини аниқлаш бўйича тадқиқотлар натижаларидан Россия фанлар академияси Сибир бўлими А.В.Ржанов номидаги Яримўтказгичлар физикаси институтида Россия фундаментал тадқиқотлар фондининг №17-32-50161 «Ярим ўтказгич квант ўраларида оптик фаоллик ва магнит индукцияланган фазовий дисперсияни экспериментал тадқиқот қилиш» мавзусидаги ишни бажаришда фойдаланилган (РФА СБ Яримўтказгичлар физикаси институтидан 01.10.2020 йилдаги № 15307-26-2433 маълумотнома). Илмий натижалардан фойдаланиш диссертация ишида тавсия қилинган технологик жараённи ярим ўтказгич структуралардаги кинетик жараёнларни математик моделлаштириш орқали бошқариш натижалари юқори самарали поликристалл сезгир элементлар олиш ва датчикларини яратиш имконини берган.

**Тадқиқот натижаларининг апробацияси.** Диссертация ишининг асосий натижалари 7 та халқаро миқёсда ўтказилган конференцияда ва 4 та республика илмий-амалий конференцияларида маъруза ва муҳокама қилинди.

**Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги.** Диссертация мавзуси бўйича асосий натижалар 17 та илмий ишда, шундан Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссияси томонидан тавсия этилган журналларда 5 та мақола, шу жумладан 3 та мақола хорижий халқаро журналларда чоп этилган. Ўзбекистон Республикаси Адлия вазирлиги ҳузуридаги Интеллектуал мулк агентлигидан ихтиролар учун 1 та гувоҳнома олинган.

**Диссертациянинг ҳажми ва таркиби.** Диссертация кириш, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертациянинг ҳажми 30 та расм, 6 та жадвални ўз ичига олган ҳолда, 112 бетни ташкил этади.

## **ДИССЕРТАЦИЯ ИШИНING АСОСИЙ МАЗМУНИ**

Кириш қисмида мавзунинг долзарблиги асослаб берилган, диссертация тадқиқотининг фан ва техника тараққиётининг устувор йўналишлари билан боғлиқлиги, хусусан, поликристалл юпқа пардали тузилмаларида кинетик жараёнларнинг физик моделларини ишлаб чиқиш ва уларни математик моделлаштириш усуллари кўриб чиқилган. Диссертацияда ёритилган мавзулар бўйича дунёда олиб борилган асосий илмий тадқиқотлар таҳлил қилинди ва муаммонинг ўрганилганлик даражаси кўриб чиқилди. Диссертация иши бажарилган ташкилотнинг илмий тадқиқотлари билан боғлиқлиги кўрсатилган. Мақсад ва вазифалар шакллантирилган, тадқиқот объекти, предмети ва усуллари белгиланган, илмий янгилик аниқланган, олинган натижаларнинг ишончлилик мезонлари, тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти кўрсатилган, натижаларнинг жорий этиш ва ишнинг

синовдан ўтказиш муҳокаmaları тўғрисида қисқача маълумотлар берилган, диссертация ҳажми ва тузилиши ҳақида маълумотлар берилган.

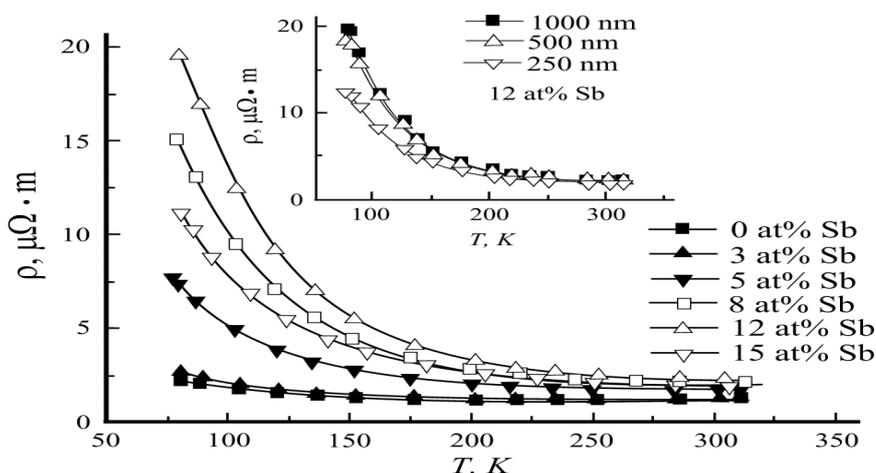
Биринчи бобда  $A_2^V B_3^{VI}$  бирикмаларга асосланган тензоэлектрик вакуум конденсатларининг физик-кимёвий хоссалари" висмут-сурма-теллур асосидаги қаттиқ қоришмаларнинг физик-кимёвий хоссалари, улар асосидаги поликристалл тузилмаларини олиш технологияси ва уларнинг кинетик хусусиятлари ҳақида адабиётлар таҳлили кўриб чиқилган.

Ушбу гуруҳнинг яримўтказгич бирикмалари ўрганилиш даражаси "классик" ярим ўтказгичларга, яъни германий ва кремнийга яқинлашиш эҳтимоллигини кўриш мумкун. Бу айниқса,  $(Bi_2Te_3)$ ,  $(Sb_2Te_3)$  ва айрим уларнинг асосидаги баъзи қаттиқ қотишмаларига тўғри келади.  $Bi_2Te_3$  ва  $Sb_2Te_3$  ярим ўтказгич бирикмалари узлуксиз изоморф қаттиқ қотишмалар ҳосил қилади. Висмут - сурма теллурид тор зонали бирикмаларга киради:  $300^0K$  да  $x=1,5$ га яқин бўлганда, бирикмадаги тақиқланган зона кенглиги  $E_g=0,14-0,16$ эВ бўлади. Висмут - сурма теллурид юпқа пардаларидаги кинетик коэффициентларнинг хосликлари асосан уларнинг зонавий тузилишининг ўзига хос хусусиятлари билан белгиланади. Монокристал юпқа пардаларда олиб борилган текширишлар шуни кўрсатдики, висмут-сурма теллуридда валент зона иккита ноэквивалент зоналардан иборат бўлиб, уларнинг экстремуми энергия ва импульс бўйича ажралиб туради.

Бир қанча ишларда  $Bi-Te$  ва  $Sb-Te$  ларнинг ҳолат диаграммалари тақдим этилган. Уларда  $Bi_2Te_3$  бирикмасининг стехиометрик таркиби 40.065%  $Bi$  ва 59.935%  $Te$  га тўғри келиши аниқланган. Оптик тақиқланган зона кенглиги  $E_g$ , қаттиқ қоришманинг таркибига қараб  $Bi_2Te_3$  дан  $Sb_2Te_3$  гача ортиб боради ва барча бирикмалар учун ҳарорат ошиши билан камаяди ( $dE_g/dT=-1,5 \cdot 10^{-4}$  эВ/град).

Юпқа пардаларнинг хусусиятларини аниқлайдиган муҳим кўрсаткич, уларнинг структураси бўлиб, у қайта буғланиш технологияси билан ҳам олинади. Кристаллитларнинг ўлчамлари слюдадаги юпқа пардалар учун 5-10 мкм ва полиимидда 1-2 мк ни ташкил этди. Кристаллитлар ўлчамлари юпқа парда қалинлигининг камайиши билан, шунингдек, қотишма таркибидаги сурьма кўпайиши билан камаяди. Мисол учун 1 - расмда қалинлиги 1000 нм бўлган, турли хил таркибли юпқа пардалар учун солиштирма қаршилиқнинг ҳароратга боғлиқлигини ўрганиш натижалари келтирилган. Температуранинг пасайиши билан висмут - сурьма қотишмалари юпқа пардаларида ҳароратнинг ўрганилаётган бутун диапазонда қаршилиқнинг монотон ўсиши кузатилади. Қотишма таркибидаги сурьманинг кўпайиши  $77^0K$  ҳароратда плёнкаларнинг қаршилигининг ошишига олиб келади, бу сурьма концентрациясининг ошиши билан монокристалларнинг қаршилигининг ўзгариши билан мос келади.

Максимал қаршилиқ  $77^0K$  да 1000 нм қалинликдаги  $Bi_{0,88}Sb_{0,12}$  юпқа пардаларида кузатилади (1-расмда ички кўшимча).  $Bi_{0,92}Sb_{0,08}$  ва  $Bi_{0,88}Sb_{0,12}$  дан ташқари барча таркиблар учун солиштирма қаршилиқ юпқа парда қалинлигининг камайиши билан ортади.



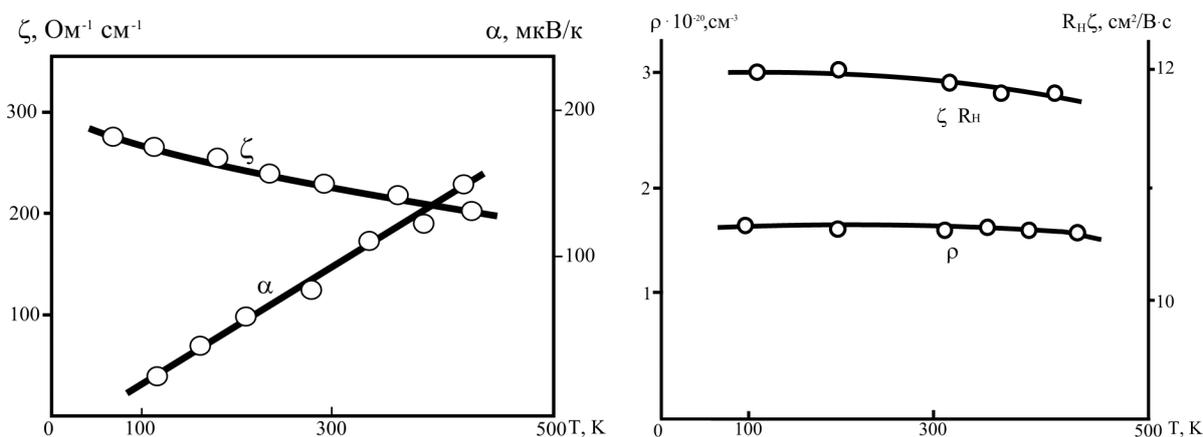
**1- расм. Слюдадаги қалинлиги 1000 нм бўлган юпқа парданинг солиштирма қаршилигини температурага боғлиқлиги. Ички қўшимча турли қалинликдаги  $\text{Bi}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}$  юпқа пардаларининг солиштирма қаршилигини ўзгаришини кўрсатади.**

Слюда  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$  вакуум конденсатларига кучли эпитаксиал таъсир кўрсатади. Электронограм ва рентгенографик тадқиқотлар таҳлили натижаларига кўра, конденсация ҳарорати тахминан  $360^\circ\text{K}$  бўлганда полимиддаги  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$  юпқа пардалари таглик текислигида (110) ва (200) текисликлар бўйича тасодифий йўналтирилган кристаллитлардан иборат поликристалдир. Ушбу текисликлар  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$  ўсиш текислигига перпендикуляр бўлиб, юқорида таъкидлаб ўтилганидек (0001) текисликка мос келади. Шу муносабат билан полимиддаги юпқа пардаларда конденсат ва тагликнинг чизикли кенгайиш коэффициентлари фарқидан келиб чиқадиган ички механик кучланишлар натижасида юпқа пардалар ўсиш текисликлари бўйлаб ёрилиб, микроёриқлар сеткаси ҳосил бўлади.

Материалнинг физик хусусиятларини одатда олиш усуллари жуда оддий бўлган монокристалл  $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$  юпқа пардаларига нисбатан олинади.  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$  монокристалл юпқа пардалардаги кинетик ҳодисалар ва баъзи зонавий параметрларини ўрганиш асосида (асосан таркиби  $x \approx 1,5$  га яқин намуналарда)  $T > 150^\circ\text{K}$  да  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$  да асосий сочилиш жараёни панжараларнинг акустик тебранишлари бўлиб ҳисобланади. Паст ҳароратларда асосий жараён аралашма сочилиши бўлиб, аралашма сочилишнинг қайси тури (ионланган ёки нейтрал марказларда сочилиш) устунлик қилишини аниқ айтиш жуда қийин, чунки висмут-сурьма теллурид юқори статик диэлектрик киритувчанликка эга бўлган бирикмаларга киради ва зарядланган марказларнинг кулон потенциали жуда қисқа масофаларда экранланади. Муаллифлар таъкидлаганидек, кучли даражада легирланганда ёки бирикма таркибининг стехиометриядан сезиларли даражада оғиши билан, аралашма сочилиш  $T > 150^\circ\text{K}$  да ҳам сезиларли даражада намоён бўлиши мумкин.

Конденсатланиш шароитларининг юпқа пардаларнинг параметрларига ва кинетик коэффициентларнинг ҳароратга боғлиқлиги қонуниятларига таъсирини аниқлаш борасида кенг миқдордаги тадқиқот ишлари олиб

борилди. Аморф тагликка ўтказилган ва юқори тензосезгирлик коэффициентларига эга  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$  юпқа пардалар электр ўтказувчанлиги  $\sigma$ , термоэлектрик коэффициенти  $\alpha$ , тешиклар концентрацияси  $\rho_n$  ва уларнинг Холл ҳаракатчанлиги  $\mu_n$  нинг ҳароратга боғлиқлиги 2- расмда келтирилган.



**2- расм Тензосезгирлиги юқори бўлган висмут-сурьма теллурид юпқа пардасининг кинетик коэффициентларининг температурага боғлиқлиги.**

Бу ерда юпқа пардаларнинг Холл ҳаракатчанлиги ва электр ўтказувчанлигининг ҳароратга боғлиқ ўзгариши камлиги диққатга сазовордир. 3-расмдан кўринадики,  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$  тензосезгир юпқа пардалари электр ўтказувчанлигининг температурага боғлиқлиги суяқ гелий ҳароратига қадар сақланиб қолади. Холл ҳаракатчанлигининг қиймати массив материаллар ва монокристалл юпқа пардалардагидан бир - икки даражага, баъзи ҳолларда эса уч даражагача паст. Юқори тензосезгирлик билан бир қаторда Холл ҳаракатчанлигининг бундай паст кўрсаткичлари ва  $\mu_n(T)$  ва  $\sigma(T)$  нинг суяқ боғлиқликлари аморф тагликларда синтезланган поликристалл  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$  юпқа пардаларининг структураларидаги нуқсонли тузилишининг ўзига хосликлари билан боғлиқ, яъни юпқа парда-таглик тизимидаги ички механик кучланишлар пайдо қилган микроёриқлар тўрнинг шаклланиши билан боғлиқ. Микроёриқлар энергетик тўсиқлар ҳосил қилади ва заряд ташувчилар улардан туннеллашув орқали ўтади. Ҳисоб-китобларга кўра, микроёриқлар қалинлиги ва шу сабабли улар билан боғлиқ бўлган энергетик тўсиқлар 20Å га тенг. Энергетик тўсиқлар кристаллитлар орасидаги электр ўтказувчанлигини сезиларли даражада чеклайди ва  $\mu_n$  ва  $\sigma$  нинг ҳароратга боғлиқлигининг ўзига хослигини аниқлайди. Адабиёт маълумотларини таҳлил қилиш асосида диссертация ишининг мақсад ва вазифалари белгиланган.

**Иккинчи боб “ $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$  тензосезгир юпқа пардаларини олиш технологияси ва параметрларини ўлчаш усуллари”.** Юпқа пардали тензоқаршилиқлар олишнинг асосий усули бу яримўтказгичли материални нейтрал диэлектрик тагликка маълум ўлчамларга эга бўлган ниқоб орқали вакуумда термик усулда ўтказишдир. Шундай қилиб Ge, Si, Bi, Te, InSb, PbS, ZnGa,  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ,  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  ва бошқа материаллардан юпқа пардали тензосезгир

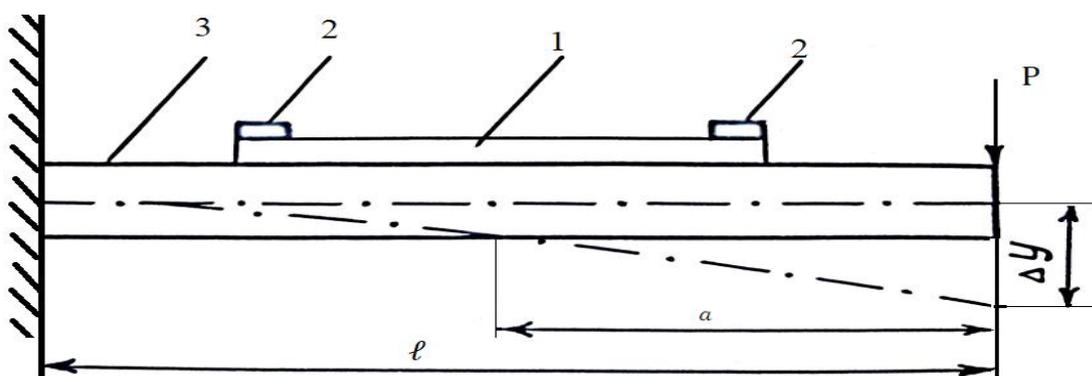
элементлар олинган. Биз юпқа пардали структураларни олиш учун модернизация қилинган битта постли ВОУ-1А вакуум қурилмасидан фойдаландик. Ишчи ҳажм - буғлатиш камераси зангламайдиган пўлат плитадан ва шиша гумбаздан иборат. Ток ўтказгичлари сифатида асосга мустаҳкамланган ва изоляция қилинган диаметри 12-16 мм бўлган латун таёқчалари хизмат қилади. Тутқич 60мм х 40мм ва 3 мм қалинликдаги иккита тўртбурчаклар мис (латун) пластинкалардан ясалган бўлиб, улар орасидаги слюда қистирмалари остида иситиш элементи - ясси нихром спирал жойлаштирилган. Таглик ушлагичининг конструкцияси ҳар хил материаллардан ясалган тагликларни ўрнатишга имкон беради, уларнинг юзалари тозалагандан кейин спиртли эритма билан артилади. Тутқич сифатида диаметри 80 мм ва қалинлиги 3 мм бўлган иккита думалоқ бронза диск ишлатилган. Тўртбурчак тантал буғлатгичлар  $(\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x})_2\text{Te}_3$  нинг буғланиши учун қўлланилди.

Дастлаб материални қиздириш жараёнида енгил учувчи компоненталар ва аралашмалар биринчи навбатда буғланиб, таглик ва канденсат ўртасида оралиқ қатлам ҳосил қилганлиги сабабли, бу қатламни олиб ташлаш учун таглик-буғлатгич тизимининг бўш ишлаши таъминланади, бунинг учун биз уларнинг орасига тутқич ўрнатдик. Тутқич ёпилганда, учувчи аралашмалар тутқичнинг пастки қисмида конденсацияланади.

Деформациянинг юпқа пардалар хусусиятларига таъсирини ўрганиш учун олинган наъмуналар пўлат пластинкаларга ёпиштирилади. Пластинкани эгиш орқали юпқа пардага деформация берилади. Наъмунани деформациялаш схемаси 3-расмда келтирилган. Эгилиш қиймати стрелкали индикатор ёрдамида ўлчанди. Нисбий деформация қуйидаги ифода бўйича ҳисоблаб чиқилган

$$E = \frac{3\alpha x}{l^2} \Delta y \quad (1)$$

бу ерда  $l$  пўлат пластинканинг асосга маҳкамлаш ва деформация кучи бериш нуктаси орасидаги узунлиги,  $\alpha$ - деформация кучи қўйиладиган нуктадан юпқа парда намунасининг ўртасигача бўлган масофа,  $\Delta y$ - деформация кучи қўйилиш нуктасида пластинканинг эркин учининг эгилиши катталиги (3-расм).



3- расм. Наъмуни деформациялаш мосламасининг схематик кўриниши; 1-юпқа пардалар, 2-контакт, 3-эластик пластинка.

Юпқа пардаларнинг тензосезгирлик коэффиценти куйидаги ифода бўйича ҳисоблаб чиқилган

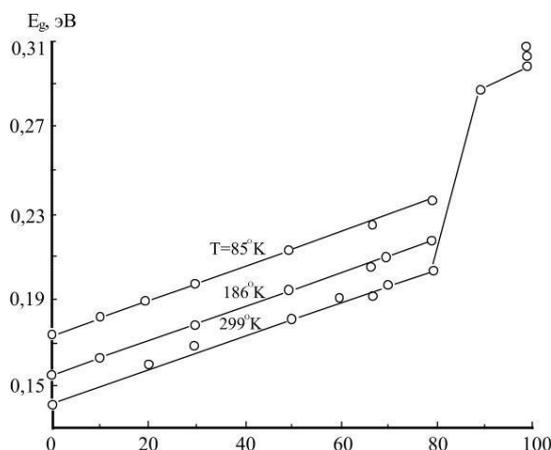
$$K = \frac{\Delta R}{R \cdot \varepsilon} \quad (2)$$

Ўлчашдаги хато асосан нисбий  $K$  деформация ва  $\Delta R/R$  қаршилиқнинг нисбий ўзгаришини аниқлашдаги хатолардан иборат эди. Ўлчовнинг максимал хатоси 2-5% дан ошмайди.

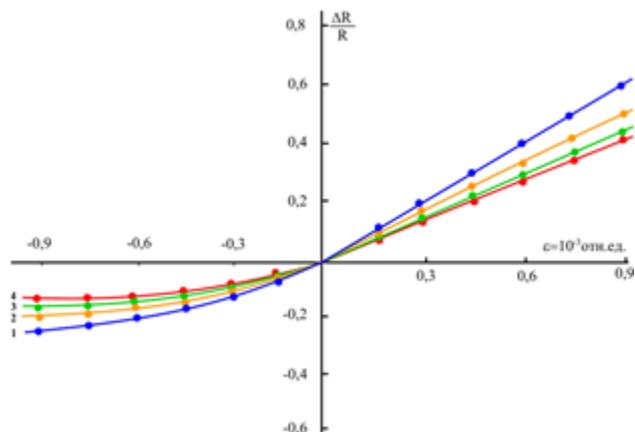
Иккинчи бобда вакуумда буғланиш йўли билан тензосезгир юпқа парда элементларини олишнинг технологик жиҳатлари ишлаб чиқилди, технологик жиҳозларга қўйиладиган асосий талаблар аниқланди. Деформацияга сезгир юпқа пардаларнинг кинетик параметрларини ўлчаш усуллари белгиланди, поликристалл юпқа пардаларнинг таркиби ва тузилишини ўрганиш учун намуналар тайёрлаш усули аниқланди.

**“Юпқа пардалар олиш технологиясининг  $(\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5})\text{Te}_3$  юпқа пардалар хусусиятларига таъсири”** деб номланган 3-бобда  $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$  асосидаги тензосезгир юпқа пардаларнинг электрофизик хусусиятлари ва кинетик коэффицентларига таъсир қилувчи технологик омилларни аниқлаш бўйича тадқиқотлар натижалари келтирилган.  $(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_x - (\text{Sb}_2\text{Te}_3)_{1-x}$  қаттиқ қотишмаларини вакуумда термик буғлатиш билан олинган юпқа пардаларнинг электрофизик ва тензорезистив хусусиятлари буғланган ва конденсатланган молекуляр оқимларнинг таркибига, тагликларнинг  $T_{\text{II}}$  тури ва ҳароратига, буғлатгичнинг  $T_{\text{U}}$  температураси, юпқа парданинг ўсиш тезлиги  $W$ , қалинлиги  $h$ , иссиқлик билан ишлов бериш ва бошқа макроскопик технологик параметрларга жуда боғлиқ бўлади. Буғланаётган қотишма  $(\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x})_2\text{Te}_3$  учун  $x$  нинг маълум бир қийматида, бошқа технологик параметрларнинг турли хил қийматларида физик хусусиятлари жуда кенг диапазондаги юпқа пардаларни олиш мумкин.  $x$  нинг қиймати 0 дан 1 гача кўтарилиши билан  $E_g$  қотишмасининг оптик тақиқланган зона оралиғи  $T = 300^{\circ}\text{K}$  да 0,29 эВ ( $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ ) дан 0,14 эВ ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) гача камаяди ва  $(\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x})_2\text{Te}_3$  қаттиқ қотишманинг барча таркиблари учун у температура ва гидростатик босимнинг ошиши билан камаяди ( $dE_g/dT = -1.5 \cdot 10^{-4}$  эВ/град,  $dE_g/dP = -2 \cdot 10^{-6}$  эВ/атм,  $P < 3 \cdot 10^4$  атм.). 4-

расмда кўринганидек,  $x \approx (0.1-0.3)$  оралиғида  $E_g$  қийматининг кескин ўсиши кузатилмоқда, бу маълум бир таркибли поликристалл юпка пардаларининг электрофизик хусусиятларининг уларни олиш технологиясига ва ташқи таъсирга кескин боғлиқлигида намоён бўлиши керак. Бу дастлабки  $(\text{Bi}_{0.25}\text{Sb}_{0.75})_2\text{Te}_3$  материални танлашни асослаб беради.



**4- расм. Оптик тақиқланган зона кенглиги  $E_g$  нинг  $85^\circ\text{K}$ ,  $186^\circ\text{K}$ ,  $299^\circ\text{K}$  температурадаги  $(\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x})_2\text{Te}_3$  қаттиқ қотишмаси учун таркибий нисбати  $x$  га боғлиқлиги.**



**5- расм.  $(\text{Bi}_{0.25}\text{Sb}_{0.75})_2\text{Te}_3$  юпка пардаларининг деформациявий характеристикалари: янги тайёрланган (1) ва  $5 \times 10^{-4}$  торрли вакуумда тобланган.  $T = 125^\circ\text{C}$  ҳароратда 2 соат (2), 4 соат. (3) ва  $6 \div 10$  соат (4).  $W = 200\text{\AA} / \text{с}$ .**

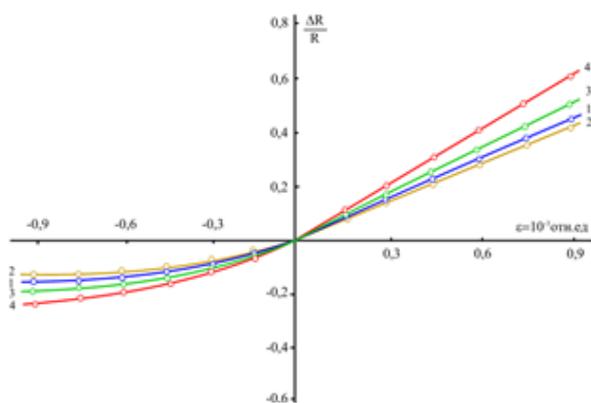
Энг юқори тензосезгирлик коэффициенти қийматини,  $2 \cdot 10^4$  га тенг нисбий бирлик, биз полиамид тагликка янги олинган  $(\text{Bi}_{0.25}\text{Sb}_{0.75})_2\text{Te}_3$  юпка пардасида ўлчадик. Аммо аномал даражада юқори тензосезгирлик коэффициентига эга бўлган бундай юпка пардаларнинг хоссалари беқарор: солиштирма қаршилиги, термоэлектрик коэффициенти  $\alpha$ , тензосезгирлик коэффициенти ва бошқа хусусиятлари вақт ўтиши билан ва синов пайтида ўзгаради.

5-7-расмларда турли хил газ муҳитларида  $125^\circ\text{C}$  температурада тобланган полиамид тагликлардаги қалинлиги 6 микронга тенг бўлган юпка пардаларнинг деформациявий характеристикалари кўрсатилган. Барча расмлардаги 1 эгри чизиқлар янги олинган юпка пардаларга тўғри келади.

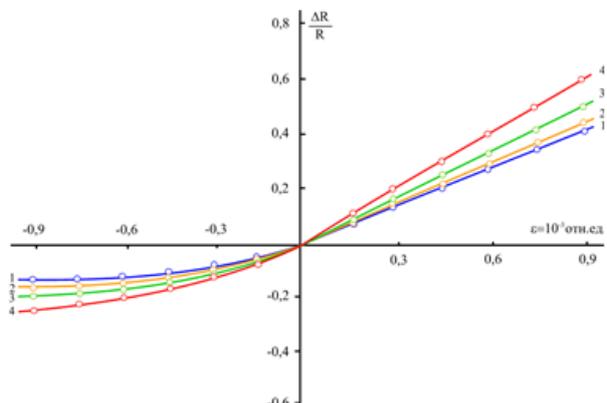
4-расмдан келиб чиқадики, вакуумда тоблаш юпка пардаларнинг деформациявий хусусиятларининг ёмонлашишига олиб келади. Шу билан бирга, теллур буғида (6-расм) ва ҳавода (7-расм) тобланганда тензосезгирлик коэффициенти ошади. Тажрибалар шуни кўрсатдики, теллур буғида ёки ҳавода тоблаш ҳам юпка пардалар барқарорлигини сезиларли яхшиланишига

олиб келади. Ҳавода юпқа пардаларни оптимал стабиллашадиган тоблаш вақти 6-8 соатни ташкил этади, бу эса 125<sup>0</sup>С ҳароратда теллур буғидаги шунга ўхшаш тоблаш вақтидан 4 соатга кам.

Афсуски, (Bi<sub>x</sub>Sb<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> асосидаги қаттиқ қотишмалар юпқа пардаларининг ташқи муҳит билан ўзаро таъсири масаласи жуда кам ўрганилган. Маълумки, бу бирикмаларда кислород теллурнинг аналоги, яъни донор киришма каби ҳаракат қилади. Бир қатор ишларнинг муаллифлари вакуумда ва инерт газ муҳитида 200<sup>0</sup>С дан юқори иссиқлик билан ишлов бериш натижасида юпқа пардалар хусусиятларининг ўзгаришини юпқа пардаларнинг кислород билан ўзаро таъсири билан эмас, балки узоқ вақт товланиш пайтида заряд ташувчилар концентрациясини мувозанатга яқинлашиши билан боғлайди.



**6- расм. Янги тайёрланган (Bi<sub>0.25</sub> Sb<sub>0.75</sub>)<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> (1) юпқа парданинг деформацион характеристика-лари ва теллур буғи таъсирида T = 125<sup>0</sup>С ҳароратда 2 соат (2), 4 соат (3) ва 6 ÷ 10 соат (4). W = 200 Å / с, T<sub>п</sub> = 90<sup>0</sup>С.**

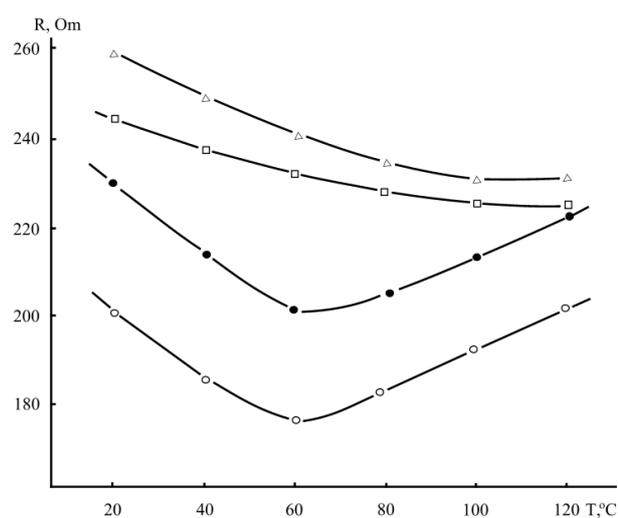


**7- расм. (Bi<sub>0.25</sub>Sb<sub>0.75</sub>)<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> юпқа пардаларининг деформациялаш хусусиятлари, янги тайёрланган (1) ва атмосфера ҳавосида T = 125<sup>0</sup>С ҳароратда 2 соат давомида товланган (2), 4 соат (3) ва 6 ÷ 10 соат (4).**

8-расмда тўрт турдаги юпқа пардаларни қаршилигининг температурага боғлиқлиги кўрсатилган ((Bi<sub>x</sub>Sb<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>). Янги тайёрланган (1) ва вакуумда товланган юпқа пардалар (мос ҳолда 1 ва 3 эгри чизиқлар), температурага ўзгаришларда R(T) 60<sup>0</sup>С да энг кам қийматга эга. Барқарорлаштириш тоблаши бутун температуралар оралиғида юпқа пардаларнинг қаршилигининг ошишига ва температуранинг ошиши билан қаршилиқнинг монотон пасайишига олиб келади. R(T) эгри чизиғида тахминан 60<sup>0</sup>С температурада характеристик минимумнинг мавжудлиги юпқа пардаларни яроксизлигининг экспериментал мезонидир. 20-120<sup>0</sup>С температура оралиғида қаршилиқнинг салбий температуравий коэффиценти бўлган юпқа пардалар энг яхши тензосезгирликка эга. Шундай қилиб, юпқа пардаларни вакуумда теллур буғида (4) ёки ҳавода (2) тоблаш уларнинг тензосезгирлигини барқарорлигини сезиларли даражада яхшилашга имкон беради. Бу ҳолда, қаршилиқнинг

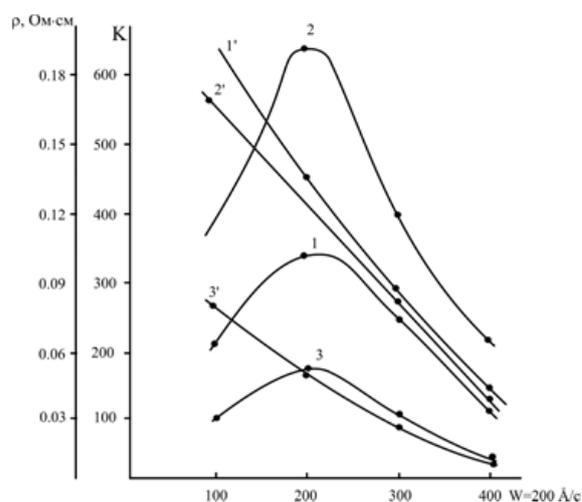
температурага боғлиқлиги юпка пардаларнинг сифатини баҳолаш учун характеристика ҳисобланади.

9-расмда ПМ-1 полиамид тагликда конденсатланган юпка пардалар учун ўтқазуш тезлиги  $W$  нинг  $\rho$  ва  $K$  қийматига таъсири бўйича тадқиқотлар натижалари кўрсатилган. Ушбу боғлиқликлар шуни кўрсатадики, ўтқазуш тезлигининг  $100 \text{ \AA} / \text{с}$  дан  $400 \text{ \AA} / \text{с}$  гача кўтарилиши билан юпка пардаларнинг қаршилиги  $\rho$  камаяди (эгри чизиқлар  $1^1, 2^1, 3^1$ ) ва тензосезгирлик коэффицентининг қиймати  $K$  (эгри чизиқлар 1, 2, 3) максималдан ўтади ( $W = 200 \text{ \AA} / \text{с}$ ), унинг амплитудаси буғланиш температураси билан белгиланади (бу ҳолда буғланиш температурасини ўзгартириш орқали ўтқазуш тезлиги ўзгартирилади). Эътибор беринг, дастлабки наъмуна массаси, таглик ҳарорати ва буғлатиш мосламаси билан таглик орасидаги масофанинг ўзгариши, бир хил буғланиш температурасида  $W$  нинг ўзгаришига олиб келди ва бу ҳам  $\rho$  ва  $K$  қийматларига таъсир кўрсатди.



**8- расм. Полиамид тагликдаги  $(\text{Bi}_{0.25}\text{Sb}_{0.75})_2\text{Te}_3$  юпка пардаларининг қаршилигининг ҳароратга боғлиқлиги ( $T_n = 90^\circ\text{C}$ ,  $W = 200 \text{ \AA} / \text{с}$ ,  $h = 6 \text{ мкм}$ ).**

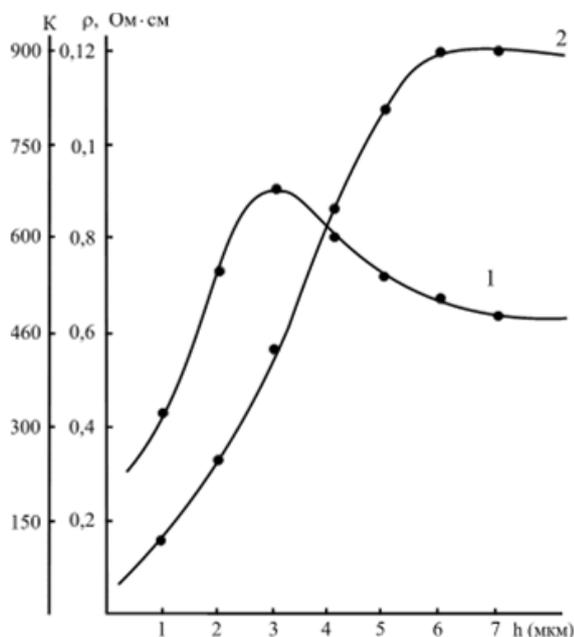
Янги тайёрланган (1), 6 соат давомида  $125^\circ\text{C}$  температурада мос ҳолда ҳавода (2), вакуумда (3), теллур (4) иштирокида иссиқлик билан ишлов берилган.



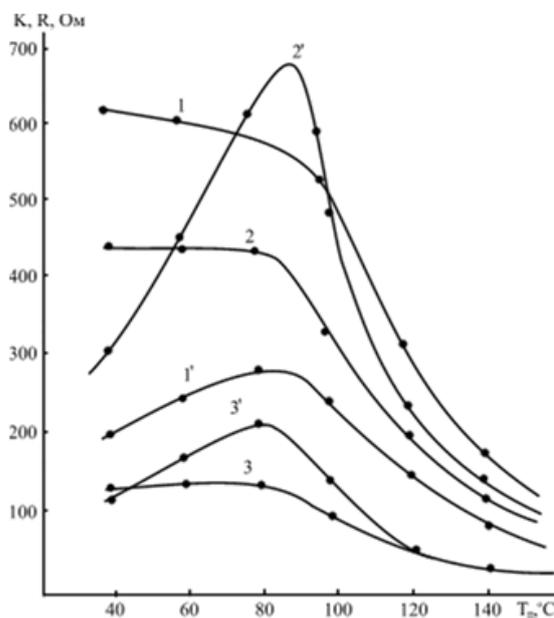
**9- расм.  $(\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x})_2\text{Te}_3$  юпка пардаларининг солиштирма қаршилиги ( $1^1, 2^1, 3^1$  эгри чизиқлар) ва тензосезгирлик коэффицентини (1, 2, 3 эгри чизиқлар) полиамид таглик ҳароратида боғлиқлиги:  $T_n = 50^\circ\text{C}$  ( $1.1^1$ ),  $90^\circ\text{C}$  ( $2.2^1$ ),  $150^\circ\text{C}$  ( $3.3^1$ ).**

10-расм юпка парданинг электрофизик хусусиятларининг қалинликка қараб ўзгаришини тасвирлайди. Кўриниб турибдики, кичик қалинликларда  $\rho$  ва  $K$  қийматлари фақат теллурни буғлантириб олинган юпка пардалар билан тахминан бир хил қийматларга эга (улар учун  $\rho = 0,05 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  ва  $K = 40$ ).

Бунга қўшимча равишда шуни таъкидлаш керакки, юпка парда қалинлигининг ошиши билан  $\rho$  ортиб,  $h = 3$  мкм қалинликда максимал қийматларга эга бўлади ва кейин  $h$  нинг ошиши билан камайиш бошланади. Бу ҳолда, турли хил қалинликдаги юпка пардалар бир хил  $T_u$  ва  $T_n$  да буғлатиш йўли билан турли хил ўтқазиш вақтларида олинган. Шунингдек, барча тажрибаларда 500 мг оғирликдаги намуна ишлатилган бўлиб, у тўлиқ буғланиб кетмаган.



**10-расм.** Солиштирма қаршиликнинг (1) ва тензосезгирлик коэффициентининг (2)  $(Bi_xSb_{1-x})_2Te_3$  юпка парданинг қалинлигига боғлиқлиги.  $w = 200 \text{ \AA} / \text{с}$ ,  $T_n = 90 \text{ } ^\circ\text{C}$ .



**11-расм:**  $(Bi_{0.25}Sb_{0.75})_2Te_3$  юпка пардаларининг солиштирма қарши-лиги (1<sup>1</sup>-3<sup>1</sup>) ва тензосезгирлик коэффициентини (1-3)  $T_n$  га боғлиқлиги.  $w = 100$  (1.1<sup>1</sup>), 200 (2.2<sup>1</sup>) ва 400 (3.3<sup>1</sup>).

11-расмда қалинлиги 6 мкм бўлган юпка пардаларнинг  $R$  қаршилик ва  $K$  тензосезгирлик коэффициентининг  $T_n$  га боғлиқлиги кўрсатилган. Кўриниб турибдики, юпка парданинг қалинлигини бир қийматида қаршилик кескин пасаяди. Ушбу пасайишни  $K(T_n)$  га қараб  $T_n = 90 \div 100 \text{ } ^\circ\text{C}$  да максимумнинг пайдо бўлишида ҳам кузатилади. Такдим этилган натижалар шуни кўрсатадики  $(Bi_{0.25}Sb_{0.75})_2Te_3$  бирикмасидан олинган юпка пардаларнинг солиштирма қаршилиги ва тензосезгирлик коэффициенти юпка парда қалинлигига, ўтқазиш пайтида тағлик ҳароратига ва қатламнинг ўсиш тезлигига боғлиқ. Ўтқазилгандан кейин юпка пардаларни тоблаш уларнинг тензометрик хусусиятларини ва параметрларнинг барқарорлигини сезиларли даражада яхшилаши мумкин. Юпка пардаларнинг кинетик параметрлари асосан ўтқазиш тезлигига, температура ва тағлик материалига ва уларга термик билан ишлов бериш режимига боғлиқ эканлиги аниқланди.

Тензосезгирликнинг максимал коэффиценти  $T_{\pi} = 90 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ва  $W = 200 \text{ \AA} / \text{с}$  га тўғри келади.  $T_{\pi}$  ва  $W$  нинг ортиши билан юпқа пардаларнинг солиштирма қаршилиги камаяди.

$(\text{V}_{0,5}\text{Sb}_{1,5})\text{Te}_3$  асосида тензосезгир юпқа пардаларни олишнинг оптимал усуллари аниқланди. Юпқа пардаларнинг кимёвий, фазавий таркиби ва тузилишини ҳар томонлама ўрганиш рентгеноспектрал анализ, электронлар дифракцияси ва электрон микроскоп ёрдами билан амалга оширилди. Кимёвий ва фазавий таркиби юпқа парда қалинлиги бўйича ўзгариб бориши ва конденсация тезлигига ва таглик ҳароратига боғлиқлиги аниқланди. Қалинлиги бўйича юпқа пардаларнинг кимёвий ва фазавий таркибининг ўзгариши уларда микроёриқлар пайдо бўлишига олиб келади, улар юпқа пардани алоҳида ўтказувчи блокларга ажратади.

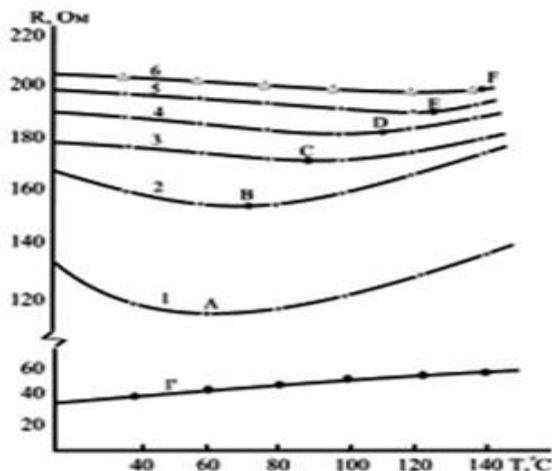
**Тўртинчи боб " $(\text{V}_{0,5}\text{Sb}_{1,5})\text{Te}_3$  поликристалл юпқа пардалардаги кинетик ҳодисаларнинг ташқи таъсирлар билан ўзгариши"** деб номланган. Монокристалллардан фарқли ўлароқ, поликристаллларда у ёки бошқа хусусиятларини бошқариш усуллари технологик жиҳатдан ҳам, ташқи таъсирлар билан ҳам хилма-хилдир. Полиамидда ўтказилган юқори тензосезгирликка эга  $\text{V}_{1-2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$  юпқа пардаларида Холл эффекти ва термоэдс коэффиценти ва  $77\text{-}500 \text{ }^{\circ}\text{K}$  оралиғида ўлчанди.  $\sigma(T)$  нинг температурага боғлиқлигининг панжара тебранишларида сочилишига мос келувчи  $\sigma \sim T^{-3/2}$  боғланишдан кучли оғиши, юпқа пардаларда кристаллит чегараларидаги тўсиқларда сочилишдан ташқари, заряд ташувчилар оқимини чеклайдиган кучлироқ омил ҳам борлигини кўрсатади.  $\sigma(T)$  ўзгаришининг хусусиятлари юпқа пардалар етарли даражада юқори энергетик тўсиқларга ( $W \gg \varphi_0 \gg \varphi_0$ ) эга деган хулосага келишимизга имкон беради, заряд ташувчилар улардан туннеллашиш орқали ўтади.

Тензосезгирлик коэффиценти  $K > 1000$  бўлган юпқа пардали элементларининг қаршилигини температурага боғлиқлигини  $20 \div 140^{\circ}\text{C}$  температура оралиғида ўрганишда, берилган температуралар оралиғида минимал қаршилик қийматига эга бўлган қисм мавжудлиги аниқланди (12-расм). Циклик деформациялар сонининг кўпайиши билан ушбу "бўлим" юқори температуралар соҳасига ўтади. Масалан, минимал қаршилик қийматига эга бўлган "бўлим" циклик деформациялар таъсиридан олдин  $T = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$  температурага тўғри келди.  $1 \cdot 10^5$  циклик деформациялар таъсиридан сўнг, бу "бўлим" ўнг томонга силжийди ва мос келадиган температура қиймати  $\sim 75 \text{ }^{\circ}\text{C}$  га тенг бўлди,  $2 \cdot 10^5$  цикл таъсиридан кейин  $\sim 90 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ва  $5 \cdot 10^5$  марта циклик деформациядан сўнг, бу "бўлим"  $T = 135 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ҳароратига мос келади.

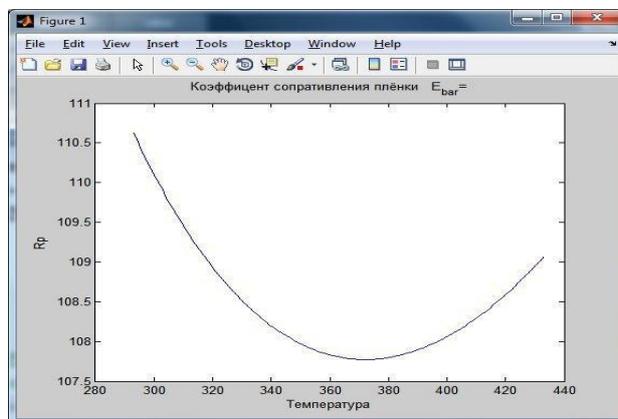
$(\text{V}_{0,5}\text{Sb}_{1,5})\text{Te}_3$  юпқа пардалари бўйича ўтказилган электрон микроскопик тадқиқотлар шуни кўрсатдики, улардаги дислокация деворлари мавжудлигидан ташқари, жуда кўп бўш каналлар ва ғоваклар ҳам бор. Юпқа парда узунлиги бўйлаб ток ўтказилганда, ихтиёрий ток оқими бўш канални туннеллашиш ёки ошиб ўтиш орқали ҳеч бўлмаганда бир марта кесиб ўтади.

Бу ҳолда туннел тўсиғининг баландлиги юпқа парда материалининг чиқиш иши билан ва қалинлиги эса каналнинг кенглиги билан белгиланади.

Туннел механизмига эга бўлган юпқа пардалар энг юқори тензосезгирликка эга, чунки бир ўқли деформациянинг остида ёриқлар ва каналлар, механик кучланишларнинг концентрати бўлиб, туннел тўсиғини сезиларли даражада ўзгартиради.



**12-расм.**  $T_n \approx 140^\circ\text{C}$  ( $1^1$  эгри чизик) ва  $T_n = 90^\circ\text{C}$  (I-6) ҳароратларда, (1- эгри чизик) деформациягача ва циклик деформацияга учраганидан кейин полиамид подложкаларда олинган  $(\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5})\text{Te}_3$ , юпқа пардалар қаршилигининг температурага боғлиқлиги: 2-6 эгри чизиклар учун мос равишда,  $N \cdot 10^{-5} = 1; 2; 3; 4;$  ва 5.



**13-расм.** Формулага биноан юпқа парда қаршилигининг температурага боғлиқ ҳисобланган ўзгариши.

$(\text{Bi,Sb})_2\text{Te}_3$  юпқа пардаларининг тензосезгирлиги деформация модуляцияси билан аниқланиши кўрсатилди. Заряд ташувчилар кўчишнинг туннел механизмига эга юпқа пардалар энг юқори тензосезгирликка эга, чунки механик кучланишларнинг концентратлари бўлган ёриқлар ва каналлар, туннел тўсиғини сезиларли даражада ўзгартиради. Юпқа пардаларда кислород кристаллит чегараларидаги дислокацияларнинг тўйинмаган боғланишлари бўйича адсорбцияланади ва тақиқланган зонада, кристаллит чегаралари яқинида эластик деформация туфайли пайдо бўлган  $E_{61}$  сатҳ энергиясидан фарқ қиладиган, янги  $E_{62}$  энергияли сатҳни ҳосил қилади. Бу кристаллит чегараларида боғланган электронларнинг икки ҳолат бўйича тақсимланишига олиб келади. Дастлаб  $E_{61} > E_{62}$  бўлгани учун электр ўтказувчанлиги, температура ўзгариши билан деярли ўзгармайдиган  $E_{61}$  билан аниқланади, бу ва шунга кўра юпқа пардаларнинг қаршилиги камаяди.

Кейинчалик ( $T > 100 \text{ }^\circ\text{C}$ ),  $E_{62}$  нинг хиссаси ошади, бу температура ошиши билан ортади ва тўсик кўтарилади, 12-расмдаги натижаларга тўғри келади.

Алоҳида кристаллитнинг электр ўтказувчанлиги кристаллитлараро қатламларнинг электр ўтказувчанлигидан фарқ қилади (улар юқори қаршиликка эга деб ҳисобланади) ва изотропик деб қабул қилинишидан иборат юпқа парданинг физик модели ишлаб чиқилган.

Моделда кристаллитлараро қатламнинг ҳар қандай соҳаси электр ўтказувчанлигининг бир хил қийматлари билан тавсифланади. Бутун юпқа парданинг ўтказувчанлиги фақат кристаллитлар ва кристаллитлараро қатламларнинг электр ўтказувчанлиги нисбатларига ва уларнинг геометрик ўлчамларига боғлиқ бўлади.

Юпқа пардаларнинг электр ўтказувчанлигининг тавсия этилган моделига кўра, юпқа парда қаршилигининг температурага боғлиқлиги қуйидагича ёзилиши мумкин:

$$R_{\text{пл}} = R_x^0 [1 + \alpha_k(T - T_0)] + R_n^0 \exp \frac{E_6}{kT}. \quad (3)$$

Таклиф этилаётган модел асосида жараённинг алгоритми ишлаб чиқилган ва математик моделлаштирилган бўлиб, натижалари 13-расмда келтирилган.

Қаршиликнинг минимал қийматига эга бўлган соҳасини ўзгарувчан ишораси циклик деформациялар сонига боғлиқ силжиши бўйича олинган натижаларга асосланиб юпқа парда элементларидан деталларнинг чарчаш датчиги сифатида ва нисбий чўзилиш қийматларининг фарқи бўйича паст ҳароратларда ҳажми ўзгариши датчиги сифатида қўлланиш усуллари таклиф этилади.

### Хулоса

Ишнинг асосий натижалари қуйидагича:

1.  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$  асосида юқори сезгир поликристалли юпқа парда элементларини олишнинг физик-кимёвий жиҳатлари ва технологияси ишлаб чиқилди;

2.  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$  асосида тензосезгир юпқа пардалар олишнинг оптимал ҳолатлари аниқланди, максимал тензосезгирлик коэффиценти  $T_{\text{п}} = 90 \text{ }^\circ\text{C}$  ва  $W = 200 \text{ } \text{Å}/\text{с}$  да кузатилди.  $T_{\text{п}}$  ва  $W$  ортиши билан юпқа пардаларнинг солиштирма қаршилиги камаяди;

3. ҳавода юпқа пардаларни оптимал мувозанатлаштириладиган қиздириш вақти 6-8 соат эканлиги аниқланди, бу эса  $125 \text{ }^\circ\text{C}$  ҳароратда шундай қиздириш учун теллур буғида сарфланадиган вақтдан 4 соат кам;

4. MATLAB дастурлаш муҳитида ишлаб чиқилган дастурий таъминот ёрдамида ҳарорат ва деформация таъсирида плёнкаларнинг электрофизик параметрларининг ўзгариши кинетикасини ўрганиш усули ишлаб чиқилган.

5. Тензо кўрсаткич сифатида юпқа парда элементларини қўллаш орқали  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$  асосида паст ҳароратларда ( $20 \div 40 \text{ }^\circ\text{C}$ ) юпқа парда ҳажмининг ўзгаришини қайд қилишнинг янги усул ишлаб чиқилди;

6.  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$  асосидаги юпқа пардадаги кинетик жараёнларнинг математик модели яратилди;

7.  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$  поликристалли юпка пардаларнинг ҳосил бўлиш механизми белгиланган ва 50-150 °C таглиг ҳарорати 100Å дан 500Å гача ошиши билан юпка пардалардаги кристаллитларнинг ўртача катталиги ортиб бориши кўрсатилган;

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12  
ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ ИНСТИТУТЕ ФИЗИКИ  
ПОЛУПРОВОДНИКОВ И МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ  
НАЦИОНАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА УЗБЕКИСТАНА**

---

**ФЕРГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**ОНАРКУЛОВ МАКСАДЖОН КАРИМБЕРДИЕВИЧ**

**УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЕЙ ПОЛУЧЕНИЯ  
ТЕНЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ПЛЕНОК  $(\text{BiSb})_2\text{Te}_3$ ,  
МАТЕМАТИЧЕСКИМ МОДЕЛИРОВАНИЕМ КИНЕТИЧЕСКИХ  
ПРОЦЕССОВ**

**01.04.10 – Физика полупроводников (технические науки)**

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD)  
ПО ТЕХНИЧЕСКИМ НАУКАМ**

**Ташкент – 2021**

Тема диссертации доктора философии (Doctor of Philosophy) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете министров Республики Узбекистан за B2020.4. PhD/FM484

Диссертация выполнена в Ферганском государственном университете.

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

**Научный руководитель:** Далиев Хожакбар Султанович  
доктор физико - математических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** Рахматов Ахмаджон Зайнитдинович  
доктор технических наук, профессор

Зикриллаев Нурилла Фатхуллаевич  
доктор физико - математических наук, профессор

**Ведущая организация:** Нукусский государственный педагогический институт

Защита диссертации состоится «25» 12 2021 года в 10<sup>00</sup> часов на заседании Научного совета DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 по присуждению ученых степеней при Научно-исследовательском институте Физики полупроводников и микроэлектроники Национального университета Узбекистана (Адрес: 100057, Узбекистан, г. Ташкент, ул. Янги Алмазар, дом 20. Тел: (+99871) 248-79-94, факс (+99871) 248-79-92, e-mail: [info@ispm.uz](mailto:info@ispm.uz)).

С диссертацией можно ознакомиться в Отделе внедрения информационных технологий института (зарегистрирована за № 31) по адресу: 100057, Узбекистан, г. Ташкент, ул. Янги Алмазар, дом 20. Тел: (+99871) 248-79-92

Автореферат диссертации разослан «18» 12 2021 г.  
(реестр протокола рассылки № 31 12 2021 г.).



Ш. Б. Утамурадова,  
Председатель Научного совета  
по присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

Ж. Ж. Хамдамов,  
Учсний секретарь Научного совета  
по присуждению ученых степеней, PhD

Х.К. Арипов,  
Председатель научного семинара  
при научном совете по присуждению  
ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

## **ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))**

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** В мире одновременно с фундаментальными открытиями в физике полупроводников развивалась технология производства полупроводниковых материалов и приборов на их основе. Одними из наиболее эффективных материалов для создания высокоэффективных тензо- и термоэлементов являются сплавы системы висмут–сурма, поэтому исследования физических явлений, в частности тензометрических, в низкоразмерных структурах на основе этих материалов являются весьма актуальными.

На сегодняшний день в мире изучение физических процессов в низкоразмерных структурах, в частности, проведение научных исследований в следующих направлениях считается одной из важных задач: исследование процессов формирования пленочных структур; влияния технологических факторов на физические механизмы; установление закономерностей формирования энергетического спектра; моделирование кинетических процессов. Решение указанных задач позволяет значительно расширять возможности производства тензочувствительных элементов с высокими эксплуатационными параметрами. Научно-исследовательские работы, проводимые в указанных направлениях, указывают на актуальность темы данной диссертации.

В нашей республике достигнуты определенные результаты в технологии получения эпитаксиальных слоев твердых растворов, а также в комплексном исследовании свойств полупроводниковых материалов и структур на их основе. В связи с этим растет потребность в выращивании монокристаллических эпитаксиальных слоев узкозонных полупроводниковых твердых растворов на различных инородных подложках и получении на их основе многослойных структур с высокой чувствительностью в инфракрасной области. В Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан отмечены задачи «...освоение выпуска принципиально новых видов продукции и технологий, обеспечение на этой основе конкурентоспособности отечественных товаров на внешних и внутренних рынках»<sup>2</sup>. В данном направлении создание новых полупроводниковых материалов – твердых растворов для разработки микроэлектронных приборов с востребованными электрофизическими свойствами имеет особое научное значение.

Данное диссертационное исследование соответствует задачам, обозначенным в Постановлениях Президента Республики Узбекистан, является наиболее важным повышением эффективности отрасли микроэлектроники на основе теоретических и практических исследований в области физики полупроводников за счет внедрения инновационных технологий. Согласно Стратегии действий по дальнейшему развитию

---

<sup>2</sup> Указ Президента Республики Узбекистан от 07 февраля 2017 года № УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017–2021 годы».

Республики Узбекистан в 2017-2021 годах, утвержденной Указом Президента Республики Узбекистан № УП-4947 от 7 февраля 2017 года, в вопросах создания эффективных механизмов развития научно-исследовательской и инновационной деятельности, внедрения в практику научных и инновационных достижений уделяется особое внимание созданию современных методов, а также программных обеспечений технологии получения высокоэффективных приборных структур. Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в постановлениях Президента Республики Узбекистан Указе № УП-2772 от 13 февраля 2017 года «О приоритетных направлениях развития электротехнической промышленности в 2017-2021 годы», Указе № УП-2789 от 17 февраля 2017 года «О мерах по дальнейшему совершенствованию организации, руководства и финансирования деятельности и научно-исследовательской работы Академии наук» и Указе № -5349 от 19 февраля 2018 года «О мерах по дальнейшему совершенствованию сферы информационных технологий и коммуникаций», а также в других нормативно-правовых актах, принятых в данной сфере.

**Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан.** Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий республики: III. «Энергия, энергосбережение, транспорт, машиностроение и приборостроение; развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники, электронного приборостроения».

**Степень изученности проблемы.** В связи с развитием электронных приборов использующихся в различных отраслях народного хозяйства, в последние годы внимание ученых и разработчиков передовых стран мира направлено на установление физических процессов, происходящих в поликристаллических структурах, а также на разработку способов повышения их рабочих параметров.

Российскими учеными Стафеевым В.И., Кайдановым В.И., Серьезновым А.Н., Фистульем В.И. и другими изучены неоднородные структуры и установлены особенности физических процессов протекающих в них, определены энергетические спектры примесных уровней, способы использования и улучшения рабочих параметров.

Определенный вклад в развитие физики полупроводников и полупроводниковых приборов внесли ученые Узбекистана, среди которых академики Саидов М.С., Муминов Р.А., Мамадалимов А.Т., Зайнабидинов С.З., Бахадырханов М.К. и другие. Свойства поликристаллических полупроводников были изучены докторами физико-математических наук Шамирзаевым С.Х, Атакуловым Б.А, Атакуловым Ш.Б, Абдурахмановым К.П. и др. и установлено, что основным фактором, определяющим отличие свойств скрытой границы раздела от свойств объема полупроводника и диэлектрика, является наличие поверхностных электронных состояний, создающих энергетические уровни в запрещенной зоне полупроводника.

Несмотря на большое число экспериментальных данных по изучению свойств полупроводников и полупроводниковых структур до настоящего времени отсутствует картина, позволяющая целенаправленного управления технологическими процессами получения высокоэффективных пленочных структур.

**Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного или научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация.** Диссертационное исследование выполнено в рамках плана научных исследований Ферганского государственного университета, в частности по теме ИТД-12-56 “Технология получения полупроводниковых термоэлектрических материалов (2012-2014 гг.).

**Целью исследования является** Разработка математической модели кинетических процессов с целью управления технологией получения высокоэффективных поликристаллических пленочных элементов на основе халькогенидов висмута и сурьмы.

**Задачи исследования:**

исследовать технологические аспекты получения высокочувствительных пленочных структур на основе  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$ ;

изучить влияние технологических режимов получения пленок на их состав и структуру;

установить физический механизм кинетических процессов в пленочных структурах на основе  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$ ;

создать математическую модель кинетических процессов в пленках на основе  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$ ;

определить возможности практического использования пленочных чувствительных элементов на основе  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$  в качестве тензодатчиков измерения механических напряжений;

**Объектом исследования** являются пленочные структуры на основе  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$ , полученные термическим испарением компонентов в вакууме.

**Предметом исследования** являются сравнения результатов оптимизаций технологических процессов тензочувствительных пленок из  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$  и создание математической модели кинетики процессов.

**Методы исследований.** Для решения поставленных задач были использованы: термический испарения в вакууме, электронный микроскоп, рентгеновские анализы и компьютерные программные расчеты.

**Научная новизна** исследования заключается в следующем:

разработаны физико-химические аспекты и технология получения высокочувствительных поликристаллических пленочных элементов на основе  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$ ;

определены оптимальные режимы получения тензочувствительных пленок на основе  $(\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5})\text{Te}_3$ . установлено, что максимальной коэффициент тензочувствительности наблюдается при  $T_{\text{п}}= 90 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $W=200 \text{ \AA}/\text{с}$ . Удельное сопротивление пленок падает с ростом  $T_{\text{п}}$  и  $W$ .

установлено, что время оптимального стабилизирующего отжига пленок на воздухе составляет 6-8 часов, что на 4 часа меньше времени аналогичного отжига в парах теллура при температуре 125 °С.

разработан новый способ регистрации изменения объема пленки при низких температурах (20÷40°С) путем применения пленочных элементов на основе  $\text{Vi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$  в качестве тензодатчиков;

установлен механизм формирования поликристаллических пленок  $\text{Vi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$  и показано что средней размер кристаллитов в пленках увеличивается при повышении температуры подложки 50÷ 150 °С от 100Å до 500Å.

**Практические результаты исследования** заключаются в следующем:

разработаны рекомендации по созданию поликристаллических пленочных тензопреобразователей на основе соединения  $\text{Vi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$  для регистрации изменения объема при низких температурах;

разработана программа кинетических процессов в поликристаллических пленочных элементах, учитывающая реальную энергетическую структуру, результаты которых, качественно соответствует экспериментальным результатам.

**Достоверность результатов исследований** подтверждается применением новейших датчиков технологических и измерительных оборудований, сравнения экспериментами и результатами и научные выводы соответствует с другими авторами, а также результаты и общепринятым представлениям и понятиям физики полупроводников.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.**

Научная значимость результатов исследования заключается в определении отдельных и обобщенных эмпирических закономерностей технологии получения высокочувствительных поликристаллических пленок на основе соединения  $\text{Vi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$  и в расширении представлений о физических процессах, происходящих в неоднородных структурах.

Практическая значимость результатов исследований - создание тензо и термоэлементов на основе соединения  $\text{Vi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$ , тензочувствительность применяется при производстве современных электронных устройств на основе этих материалов.

**Внедрение результатов исследования.**

На основе полученных научных результатов определены индивидуальные и обобщенные эмпирические закономерности технологии получения высокочувствительных поликристаллических тонких пленок на основе соединения  $\text{Vi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$ :

по результатам изучения механизмы формирования состава и структуры поликристаллических пленок  $\text{Vi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$  и на этой основе прояснения характера кинетики явлений переноса носителей, их математическое моделирование и сопоставления с экспериментом использованы в фундаментальном проекте «Повышение эффективности излучателей, фотоэлементов и других типов оптоэлектронных устройств на основе изучения полярных, биполярных

явлений и явлений усиления в расширениях в квантовых точечных гетеро и наноструктурах» Ф2-ОТ-О-15494 в Наманганском государственном университете в 2012-2016 гг.(справка № 89-03-3616 Министерства высшего и среднего образования от 2 октября 2020 г). Использование результатов научного исследования позволило повысить эффективности оптоэлектронных излучателей.

результаты исследований по определению изменения температурного коэффициента сопротивления и коэффициента тензочувствительности были использованы при выполнении работ по гранту №17-32-50161 Российского фонда фундаментальных исследований на тему «Экспериментальное исследование оптической активности и магнитоиндуцированной пространственной дисперсии в полупроводниковых квантовых ямах», в Институте физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук. (Справка № 15307-26-2433 ИФП СО РАН от 01.10.2020 г). Использование результатов предложенной в диссертационной работе управление технологическим процессом на основе математического моделирования кинетических процессов в полупроводниковых структурах позволило получить высокоэффективных поликристаллических чувствительных элементов и создании датчиков усталостных повреждений.

**Апробация результатов исследования.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 7 международных и 4 республиканских научно-практических конференциях.

**Публикации результатов исследования.** Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 17 научных трудах, из них 5 статей в научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных работ, в том числе 3 статьи в зарубежных международных реферируемых журналах., получены 1 сертификат Агентство по интеллектуальной собственности при Министерстве юстиции Республики Узбекистан на изобретения.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложения. Текст диссертации изложен на 112 страницах, включая 30 рисунков и 6 таблиц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Во введении обосновывается актуальность темы, рассматривается связь диссертационного исследования с приоритетным направлением развития науки и технологий, в частности разработки физических моделей кинетических процессов в поликристаллических пленочных структурах и их математическое моделированием. Сделан обзор основных научных исследований, проводимых в мире по темам, затрагиваемым в диссертации, проанализирована степень изученности проблемы. Показана связь диссертации с научными исследованиями организации, где выполнена диссертационная работа. Сформулирована цель и поставлены задачи,

определены объект, предмет и методы исследования, выявлена научная новизна, определены критерии достоверности полученных результатов, показана научная и практическая значимость результатов исследования, даны краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, кратко излагаются содержание и приведена информация об объёме и структуре диссертации.

**В первой главе, «Физико-химические свойства тензоэлектрических вакуумных конденсатов на основе соединений  $A_2^V B_3^{VI}$ »** проведен обзор литератур по физико-химическим свойствам твердых растворов на основе висмут-сурма-теллур, особенности технологии получения поликристаллических структур на их основе и их кинетических свойствах.

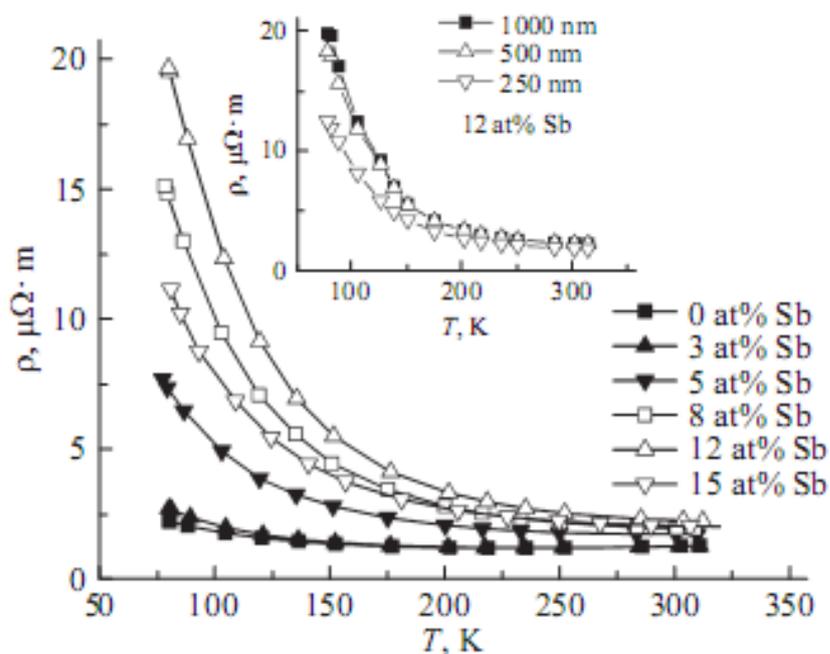
Полупроводниковые соединения этой группы по степени изученности видимо уже приближается к «классическим», германию и кремнию. Особенно это относится к  $(Bi_2Te_3)$  и  $(Sb_2Te_3)$  и некоторым составам на основе их твердых растворов. Полупроводниковые соединения  $Bi_2Te_3$  и  $Sb_2Te_3$  образует непрерывные изоморфные твердые растворы. Теллурид висмута - сурьмы относится к узкозонным соединениям: ширина запрещенной зоны в соединении вблизи состава с  $x \approx 1.5$  при 300K  $E_g \approx 0.14-0.16$  эВ. Особенности кинетических коэффициентов в пленках теллурида висмута –сурьмы во многом определяются спецификой их зонной структуры. Исследование проведенные с использованием монокристаллических пленок, показали, что в теллурите висмута –сурьмы валентная зона состоит из двух неэквивалентных подзон, экстремумы которых разделены и по энергии, и по импульсу.

В нескольких работах приводятся диаграмма состояний Bi-Te и Sb-Te. В них установлено, что стехиометрическому составу соединения  $Bi_2Te_3$  соответствует 40.065ат% Bi + 59.935ат% Te. Оптическая ширина запрещенной зоны  $E_g$  в зависимости от состава твердого раствора возрастает от  $Bi_2Te_3$  к  $Sb_2Te_3$  и для всех составов уменьшается с ростом температуры ( $dE_g/dT = -1.5 \cdot 10^{-4}$  эВ/град).

Важным показателем, определяющим свойства пленок, является их структура, которая также задается технологией препарирования. Для пленок размеры кристаллитов составляли 5–10 мкм на слюде и 1–2 мкм на полиимиде. Размеры кристаллитов уменьшаются при уменьшении толщины пленки, а также при увеличении содержания сурьмы в сплаве. Результаты исследования температурных зависимостей удельного сопротивления на примере пленок толщиной 1000 нм разного состава представлены на рис. 2. При понижении температур для пленок сплавов висмут–сурма наблюдается монотонное увеличение сопротивления во всем диапазоне исследованных температур. Увеличение содержания сурьмы в сплаве приводит к увеличению сопротивления пленок при температуре 77 °К, что согласуется с изменением сопротивления монокристаллов при росте концентрации сурьмы.

Максимальное удельное сопротивление при 77 °К наблюдается для пленок  $Bi_{0.88}Sb_{0.12}$  толщиной 1000 нм (вставка на рис.1). Для всех составов, за исключением  $Bi_{0.92}Sb_{0.08}$  и  $Bi_{0.88}Sb_{0.12}$ , удельное сопротивление увеличивается

при уменьшении толщины пленки.



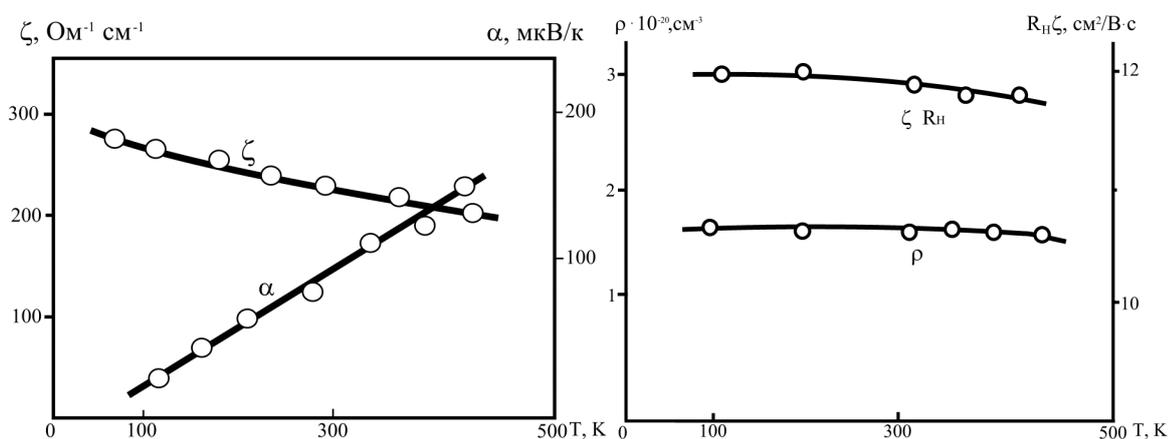
**Рис. 1. Удельное сопротивление пленок толщиной 1000 нм разного состава на слюде. На вставке — удельное сопротивление пленок  $\text{Bi}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}$  разных толщин.**

На вакуумные конденсаты  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$  слюда оказывает сильное эпитаксиальное влияние. На полиимиде при температурах конденсации около 360 °К, согласно расшифровкам электронограмм и рентгенографических исследований пленки  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$  поликристалличны с беспорядочной ориентацией кристаллитов плоскостями (110) и (200) в плоскости подложки. Эти плоскости перпендикулярны плоскости скола  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$  которая, совпадает с плоскостью (0001). В этой связи в пленках на полиимиде в результате релаксации внутренних механических напряжений, возникших из-за различия коэффициентов линейного расширения конденсата и подложки происходит растрескивание пленок по плоскостям скола и образуется сетка микротрещин.

Физические свойства материала обычно изучают применительно к монокристаллическим пленкам  $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ , методы получения которых достаточно просты. На основе исследований кинетических явлений и некоторые зонные параметры монокристаллических пленок  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$  (в основном в образцах с составом близки  $x \approx 1.5$ ) установлены, что основным механизмом рассеяния в  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$  при  $T > 150\text{K}$  является рассеяние на акустических колебаниях решетки. При более низких температурах основной механизм — примесное рассеяние, причем, однозначно судить какой тип примесного рассеяния (рассеяние на ионизированных или нейтральных центрах) преобладает весьма трудно, так как теллурид висмута-сурьмы

относится к соединениям с высокой статической диэлектрической проницаемостью и кулоновский потенциал заряженных центров экранируется на очень малых расстояниях. При сильном легировании или значительном отклонении состава соединения от стехиометрии, как отмечено авторами, примесное рассеяние может существенно проявляться и при  $T > 150\text{K}$ .

По определению влияние условий конденсации на параметры пленок и закономерности температурных зависимостей кинетических коэффициентов проведены большой объем исследовательских работ. Типичные температурные зависимости электропроводности  $\sigma$ , коэффициента термоэдс  $\alpha$ , концентрации дырок  $p_n$  и их холловской подвижности  $\mu_n$  в пленках  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$  сконденсированных на аморфную подложку и обладающих высокими коэффициентами тензочувствительности, представлены на рис.2. Здесь обращает на себя внимание слабая температурная зависимость холловской подвижности и электропроводности пленок.



**Рис.2. Температурные зависимости кинетических коэффициентов пленки теллурида висмута-сурьмы с высокой тензочувствительностью.**

Из рис.3. можно увидеть, что слабая температурная зависимость электропроводности в тензочувствительных пленках  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$  сохраняется вплоть до температур жидкого гелия. Величина холловской подвижности на один –два порядка, а в ряде случаев на три порядка, ниже, чем подвижность в массивных образцах и монокристаллических пленках. Так же, как и высокая тензочувствительность, столь низкие значения холловской подвижности и слабые зависимости  $\mu_n(T)$  и  $\sigma(T)$  связаны со спецификой дефектной структуры поликристаллических пленок  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$ , синтезированных на аморфных подложках, а именно, с образованием развитой сетки микротрещин возникающей вследствие релаксации внутренних механических напряжений в системе пленка- подложка. С микротрещинами связаны энергетические барьеры, которые преодолеваются носителями заряда туннелированием. Согласно оценкам толщина микротрещин, а следовательно и связанных с ними энергетических барьеров,  $\sim 20\text{\AA}$ . Энергетические барьеры существенно

ограничивают электропроводность между сплошными фрагментами и обуславливают специфику температурных зависимостей  $\mu_n$  и  $\sigma$ . На основе анализа литературных данных определены цель и задачи диссертационной работы.

**Вторая глава «Технология получения и методика измерения параметров тензочувствительных пленок  $(Bi_x Sb_{1-x})_2Te_3$ ».** Основным методом получения пленочных тензорезисторов является термическое напыление полупроводникового материала в вакууме через маску определенного размера на нейтральную диэлектрическую подложку. Так, получены пленочные тензочувствительные элементы из Ge, Si, Bi, Te, InSb, PbS, ZnGa,  $Bi_2Te_3$ ,  $Sb_2Te_3$  и других материалов. Нами для получения пленочных структур использована модернизированная однопостовая вакуумная установка ВΟΥ-1А. Рабочий объем – камера напыления состоит из нержавеющей стальной плиты и стеклянного колпака. В качестве токоподводов служат вмонтированные в плиту и изолированные латунные стержни диаметром 12-16мм. Держатель был изготовлен из двух прямоугольных медных (латунных) пластинок 60мм x 40мм и толщиной 3мм, между которыми под слюдяными прокладками располагался нагревательный элемент – плоская спираль из нихрома. Конструкция подложкодержателя позволяет закрепить подложек из различных материалов, поверхности которых после очистки протираются спиртом. В качестве держателя применяли два круглых бронзовых диска диаметром 80мм, толщиной 3мм. В качестве испарителя для испарения  $(Bi_xSb_{1-x})_2Te_3$  применяли танталовые лодочки\_прямоугольной формы.

Так как в процессе нагрева исходного испаряемого материала легколетучие компоненты и примеси испаряются в первое очередь и образует между подложкой и конденсатом промежуточный слой, для удаления этого слоя предусмотрен холостой ход системы испаритель - подложка, нами установлена заслонка. Когда заслонка закрыта летучие примеси конденсируются на нижней поверхности заслонки.

Для изучения влияния деформации на свойства пленок образцы приклеивались на стальные пластины. Деформацию пленки производили изгибом пластины. Схема нагружения образца показана на рис.3. Величина прогиба измерялась при помощи стрелочного индикатора. Относительную деформацию вычисляли из соотношения.

$$E = \frac{3\alpha x}{l^3} \Delta y, \quad (1)$$

где  $l$  – длина стальной пластины между опорой и точкой приложения силы,  $\alpha$  – расстояние от точки приложения силы до середины пленочного образца,  $\Delta y$  – прогиб свободного конца пластинки в точке приложения силы (рис.4).

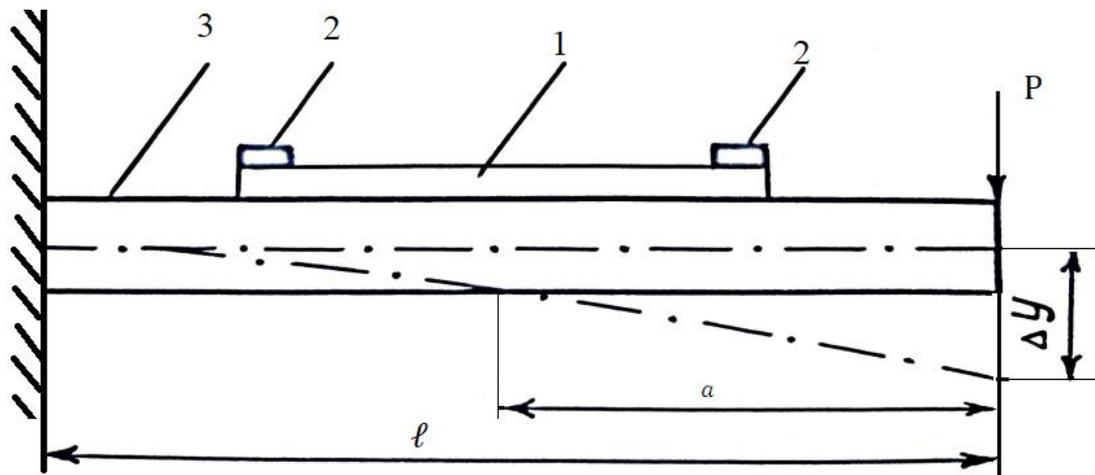


Рис. 3. Схематический вид приспособления для нагружения образцов; 1-пленки, 2-контакты,3- упругая пластинка.

Коэффициент тензочувствительности пленок вычисляли по выражению

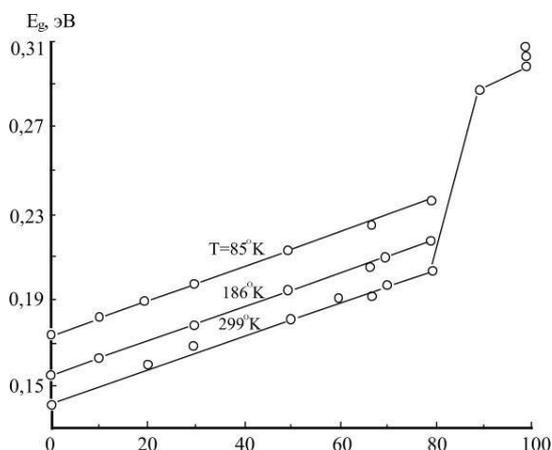
$$K = \frac{\Delta R}{R \cdot \varepsilon} \quad (2)$$

Погрешность при определении  $K$  складывалась в основном из погрешности определения относительных деформации и относительного изменения сопротивления  $\Delta R/R$ . Максимальная погрешность измерения не превышало  $2 \div 5\%$ . Во второй главе разработаны технологические аспекты получения тензочувствительных пленочных элементов испарением в вакууме, определялись основные требования к технологическому оборудованию. Определены методика измерения кинетических параметров тензочувствительных пленок и приготовления образцов для исследования состава, и структуры поликристаллических пленок.

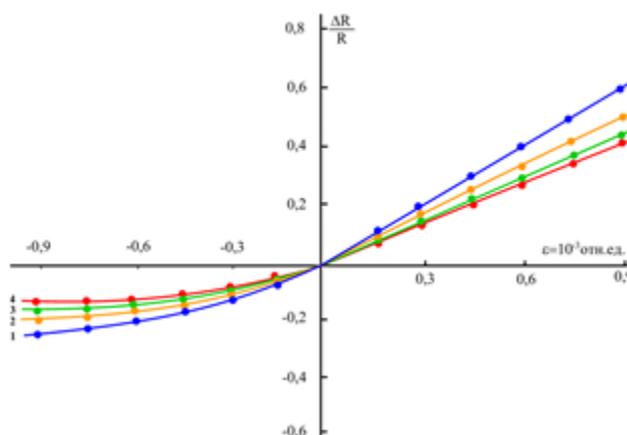
В третьей главе диссертации под названием “Влияние технологии получения пленок на свойства пленок  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$ ” приведены результаты исследований по выявлению технологических факторов, влияющих на электрофизические свойства и кинетические коэффициенты тензочувствительных пленок на основе  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$ . Электрофизические и тензорезистивные свойства пленок, полученных термическим испарением в вакууме твердых растворов  $(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_x(\text{Sb}_2\text{Te}_3)_{1-x}$ , очень сильно зависят от составов испаряемого и конденсируемого молекулярных пучков, типа и температуры  $T_{\text{п}}$  подложек, температуры испарения  $T_{\text{и}}$  и скорость напыления (роста)  $W$ , толщины пленок  $h$ , термообработки и т.п. макроскопических технологических параметров.

При заданном значении  $x$  для испаряемого сплава  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$  можно получить пленки с физическими свойствами, изменяющимися в очень широких пределах в зависимости от различных комбинаций значения других технологических параметров. С ростом  $x$  от 0 до 1 оптическая ширина запрещенной зоны сплава  $E_g$  уменьшается от 0.29 эВ ( $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ ), до 0.14эВ ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) при  $T=300^{\circ}\text{K}$  и для всех составов твердого раствора  $(\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x})_2\text{Te}_3$  она уменьшается с ростом температуры и гидростатического давления ( $dE_g/dT=-$

$1.5 \cdot 10^{-4}$  эВ/град,  $dE_g/dP = -2 \cdot 10^{-6}$  эВ/атм при  $P < 3 \cdot 10^4$  атм). Как видно из рис.4 в области значения  $x \approx (0.1-0.3)$  величина  $E_g$  испытывает резкое возрастание, что должно, по-видимому, проявиться в резкой зависимости электрофизических свойств поликристаллических пленок данного состава от технологии их получения и внешних воздействий. Именно этим и объясняется выбор исходного материала  $(\text{Bi}_{0.25}\text{Sb}_{0.75})_2\text{Te}_3$ .



**Рис.4. Зависимость оптической ширины, запрещенной зоны  $E_g$  от соотношения состава  $x$  для твердого раствора  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$  при температурах 85 °К, 186 °К, 299 °К.**



**Рис.5. Деформационная характеристика пленок  $(\text{Bi}_{0.25}\text{Sb}_{0.75})_2\text{Te}_3$  свежеприготовленной (1) и отожженных в вакууме  $5 \cdot 10^{-4}$  торр. При температуре  $T=125^\circ\text{C}$  в течение 2 ч. (2), 4ч. (3) и  $6 \div 10$ ч. (4).  $W=200 \text{ \AA}/\text{с}$ .**

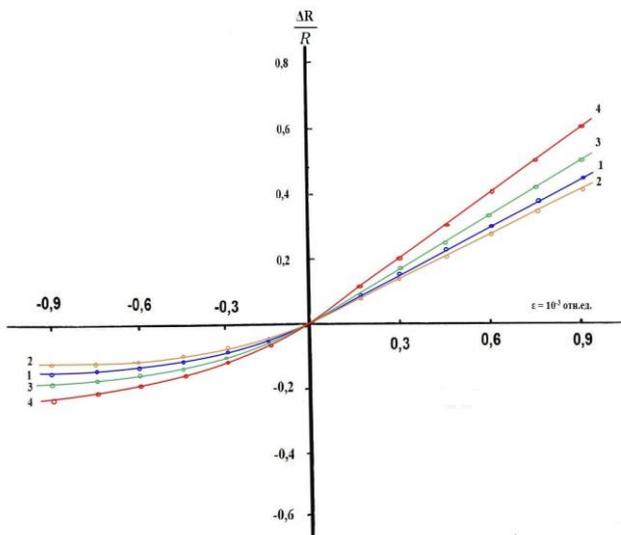
Наибольшее значения КТЧ, равное  $2 \cdot 10^4$  отн. ед., измерено нами у свежеприготовленной пленки  $(\text{Bi}_{0.25}\text{Sb}_{0.75})_2\text{Te}_3$  на полиамидной подложке. Однако, свойства таких пленок с аномально большими КТЧ нестабильны: изменяются удельное сопротивление  $\rho$ , коэффициент термоэдс  $\alpha$ , коэффициент тензочувствительности и другие характеристики с течением времени и при испытаниях.

На рис. 5-7 проиллюстрирована влияние отжига при температуре  $125^\circ\text{C}$  в различных газовых средах на деформационные характеристики пленок толщиной около 6 мкм на полиамидных подложках. Кривые 1 на всех рисунках соответствует свежеприготовленным пленкам.

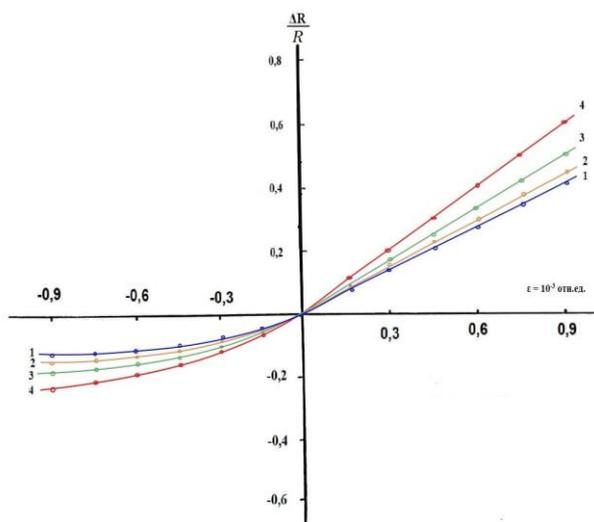
Из рис.5. следует, что отжиг в вакууме приводит к ухудшению деформационных характеристик пленок. Однако при отжиге в парах теллура (рис.6) и на воздухе (рис.7) происходит увеличение коэффициента тензочувствительности. Эксперименты показали, что отжиг в парах теллура или на воздухе приводит также к значительному улучшению стабильности пленок. Экспериментально установлено, что время оптимального стабилизирующего отжига пленок на воздухе составляет 6-8 часов, что на 4

часа меньше времени аналогичного отжига в парах теллура при температуре 125<sup>0</sup>С.

К сожалению, вопрос взаимодействия пленок твердых растворов на основе  $(Bi_xSb_{1-x})_2Te_3$  с внешней средой мало изучена. Известно лишь, что кислород в этих соединениях ведет себя как аналог теллура, т.е. является донорной примесью. Изменение свойств пленок в результате термической обработки выше 200<sup>0</sup>С в вакууме и в среде инертного газа авторы ряд работ связывают не взаимодействием пленок с кислородом, а приближением при длительном отжиге концентрации носителей к равновесной.



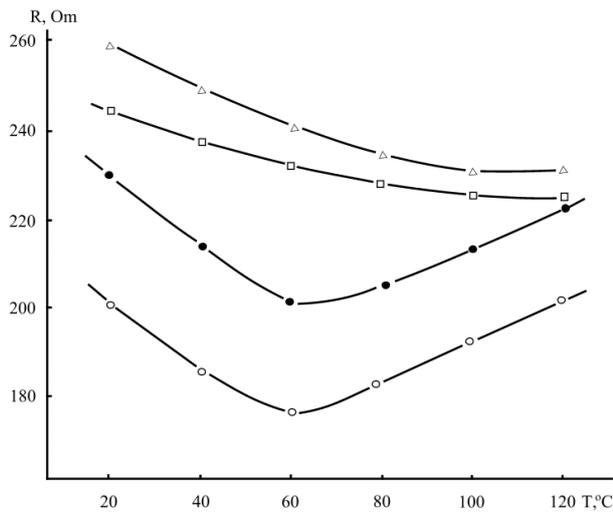
**Рис.6.** Деформационная характеристика свежеприготовленной пленки  $(Bi_{0.25}Sb_{0.75})_2Te_3$  (1) и отожженных в вакууме  $5 \cdot 10^{-4}$  торр. под действием паров теллура при температуре  $T=125^0C$  в течение 2 ч. (2), 4ч. (3) и 6÷10ч.(4).  $W=200 \text{ \AA}/c$   $T_{II}=90^0C$ .



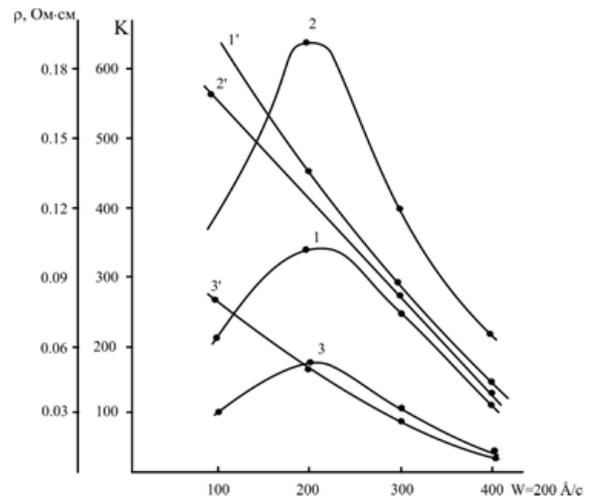
**Рис.7.** Деформационная характеристика пленок  $(Bi_{0.25}Sb_{0.75})_2Te_3$ , свежеприготовленной (1) и отожженных на атмосферном воздухе при температуре  $T=125^0C$  в течение 2 ч. (2), 4ч. (3) и 6÷10ч. (4)

На рис.8. приведены температурные зависимости сопротивления четырех типов пленок  $(Bi_xSb_{1-x})_2Te_3$ . Для свежеприготовленных (1) и отожженных в вакууме пленок (кривые 1 и 3, соответственно), температурная зависимость  $R(T)$  имеют характерный минимум при 60<sup>0</sup>С. Стабилизирующий отжиг приводит к увеличению сопротивления пленок во всем интервале температур и к монотонному уменьшению сопротивления с ростом температуры. Наличие характерного минимума при температуре около 60<sup>0</sup>С на кривой  $R(T)$  является экспериментальным критерием отбраковки пленок. Наилучшей тензочувствительностью обладают пленки с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления в интервале температур 20 ÷ 120<sup>0</sup>С. Таким образом, вакуумный отжиг пленок в парах теллура (4) или на воздухе (2) позволяет значительно улучшить стабильности тензочувствительности

пленок. При этом температурная зависимость сопротивления является характеристикой для оценки качества слоев.



**Рис. 8.** Температурная зависимость сопротивления пленок  $(\text{Bi}_{0.25}\text{Sb}_{0.75})_2\text{Te}_3$  на полиамидной подложке ( $T_{\text{п}}=90^\circ\text{C}$ ,  $W=200\text{\AA}/\text{с}$ ,  $h=6\text{мкм}$ ). Свежеприготовленной (1), термо-обработанных на воздухе (2), в вакууме (3), в присутствие теллура (4), соответственно при температуре  $125^\circ$  в течении 6 часов.

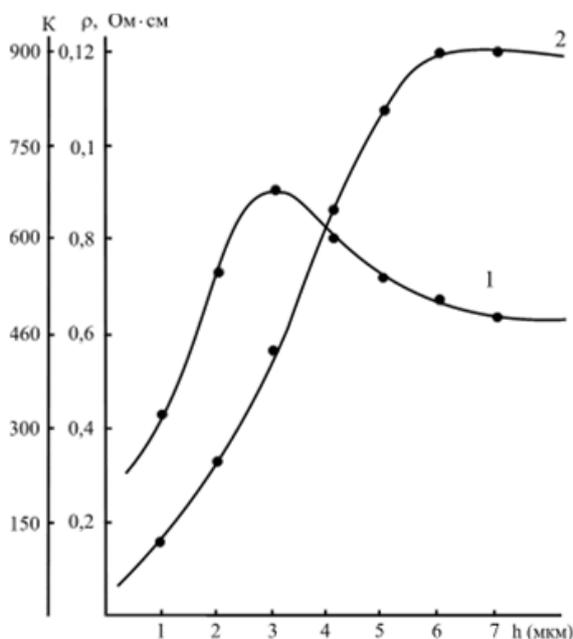


**Рис.9.** Зависимость удельного сопротивления (кривые  $1^1, 2^1, 3^1$ ) и коэффициента тензочувствительности (кривые 1, 2, 3) пленок  $(\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x})_2\text{Te}_3$  на полиамидной подложке при температурах:  $T_{\text{п}}=50^\circ\text{C}$  ( $1.1^1$ ),  $90^\circ\text{C}$  ( $2.2^1$ ),  $150^\circ\text{C}$  ( $3.3^1$ ).

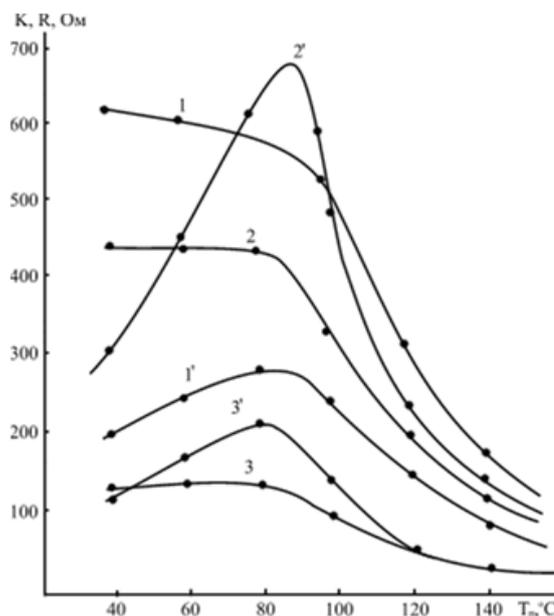
На рис.9 приведены результаты исследований по влиянию скорости напыления  $W$  на величину  $\rho$  и  $K$  пленок, конденсированных на полиамидной подложке ПМ-1. Эти зависимости показывают, что с увеличением скорости напыления от  $100\text{\AA}/\text{с}$  до  $400\text{\AA}/\text{с}$  величина удельного сопротивления  $\rho$  пленок уменьшается (кривые  $1^1, 2^1, 3^1$ ), а величина коэффициента тензочувствительности  $K$  (кривые 1, 2, 3) проходит через максимум при  $W=200\text{\AA}/\text{с}$ , амплитуда, которого определяется температурой испарения (в данном случае скорость напыления изменяли, меняя температуры испарения). Отметим, что изменение массы исходной навески, температуры подложки и расстояния между испарителем и подложкой при одной и той же температуре испарения приводила к изменению  $W$ , что и оказывало влияние на величины  $\rho$  и  $K$ .

Рис.10 иллюстрирует изменение электрофизических характеристик пленки в зависимости от толщины. Видно, что при малых толщинах величены

$\rho$  и  $K$  имеют примерно такие же значения, как и для пленок, полученных при напылении только теллура (для них  $\rho=0.05\text{ Ом}\cdot\text{см}$  и  $K=40$ ). Кроме того, надо отметить, что с ростом толщины пленки величины  $\rho$  растет, достигая максимальных значений при толщинах  $h=3\text{ мкм}$ , и затем начинает уменьшаться с увеличением  $h$ . В данном случае пленки различных толщин были получены при одинаковых  $T_{\text{п}}$  и  $T_{\text{п}}$  напылением при различных временах осаждения. Причем, во всех экспериментах использовались навеска массой 500мг, которая испарялась неполностью.



**Рис.10.** Зависимость удельного сопротивления (1) и коэффициента тензочувствительности (2) пленок  $(\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x})_2\text{Te}_3$  от толщины пленки.  $W=200\text{ \AA}/\text{с}$ ,  $T_{\text{п}}=90\text{ }^\circ\text{C}$ .



**Рис. 11.** Зависимость сопротивления ( $1^1-3^1$ ) и коэффициента тензочувствительности (1-3) пленок  $(\text{Bi}_{0.25}\text{Sb}_{0.75})_2\text{Te}_3$  от  $T_{\text{п}}$ .  $W=100$  (1.1<sup>1</sup>), 200 (2.2<sup>1</sup>) и 400 (3.3<sup>1</sup>).

На рис.11. приведены зависимости сопротивления  $R$  и тензочувствительности  $K$  пленок толщиной 6 мкм от  $T_{\text{п}}$ . Видно что при одной и той же толщине пленки сопротивление резко уменьшается при  $T_{\text{п}}>90^\circ\text{C}$ . Это уменьшение сопровождается появлением максимума при  $T_{\text{п}}=90 \div 100\text{ }^\circ\text{C}$  в зависимости  $K(T_{\text{п}})$ . Изложенные результаты показывают, что удельное сопротивление и коэффициент тензочувствительности пленок, полученных из соединения  $(\text{Bi}_{0.25}\text{Sb}_{0.75})_2\text{Te}_3$ , зависят от толщины пленки, температуры подложки при напылении и скорости роста слоя. Путем отжига пленок после

осаждения можно значительно улучшить их тензометрические свойства и стабильности параметров.

Установлено, что кинетические параметры пленок существенно зависят от скорости напыления, температуры и материала подложки, режима их термообработки. Максимальному коэффициенту тензочувствительности соответствует  $T_{\text{п}}=90^{\circ}\text{C}$  и  $W=200^{\circ}\text{A/c}$ . Удельное сопротивление пленок падает с ростом  $T_{\text{п}}$  и  $W$ .

Определены оптимальные режимы получения тензочувствительных пленок на основе  $(\text{V}_{0,5}\text{Sb}_{1,5})\text{Te}_3$ . Проведено комплексное изучение химического, фазового состава и структуры пленок методами рентгеноспектрального анализа и электронографии, электронной микроскопии. Показано, что химический и фазовый состав изменяется по толщине пленки и зависит от скорости конденсации и температуры подложки. Изменение химического и фазового составов пленок по толщине приводит к появлению в пленках микротрещин, которые разделяют пленку на отдельные проводящие блоки.

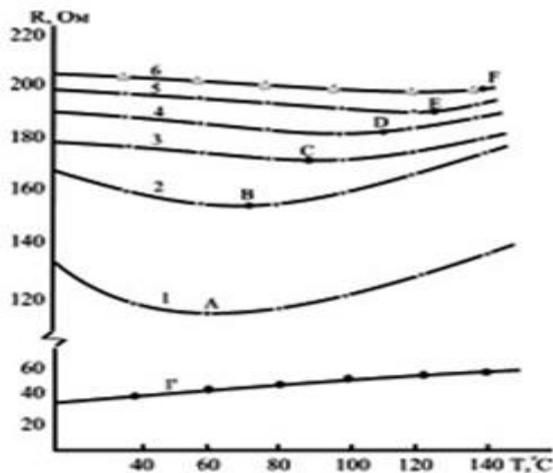
**Четвертая глава называется «Влияние внешних воздействий на кинетические явления в поликристаллических пленках  $\text{V}_{1-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$ ».** В отличие от монокристаллов в поликристаллах способы управления темпы или другими свойствами более разнообразны как в технологическом аспекте, так и внешним воздействием.

Проведены измерения эффекта Холла и коэффициента термоэдс для пленок  $\text{V}_{1-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$ , конденсированных на полиамид и имевших высокую тензочувствительность в интервале  $77\div 500^{\circ}\text{K}$ . Сильное отклонение температурной зависимости  $\sigma(T)$  от зависимости  $\sigma \sim T^{-3/2}$ , соответствующих рассеянию на колебаниях решетки, свидетельствует, что кроме рассеяния на барьерах границ кристаллитов в пленках, существует более сильный фактор ограничивающий ток носителей заряда. Особенности поведения  $\sigma(T)$  позволяют заключить, что в пленках имеются достаточно высокие барьеры ( $W \gg \varphi_0$ ), которые носители заряда преодолевают туннелированием.

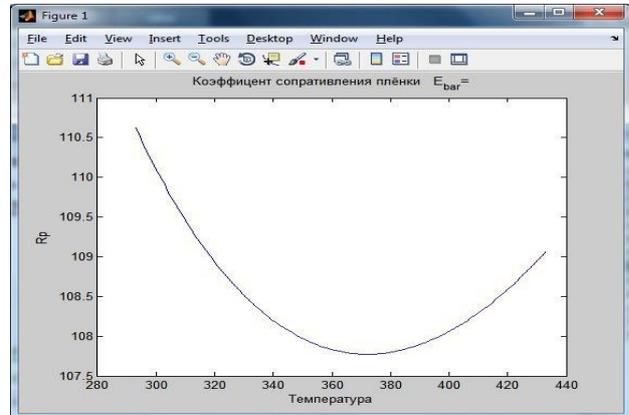
При исследовании зависимости сопротивления пленочных элементов, имеющей коэффициент тензочувствительности  $K > 1000$ , в интервале температур  $20\div 140^{\circ}\text{C}$  обнаружено, что в приведенном интервале температур имеется участок с минимальным значением сопротивления (рис.12). С увеличением числа циклических деформаций этот “участок” смещается в область более высоких температур. Например, “участку”, имеющему минимальное значение сопротивления, до воздействия циклических деформаций соответствовала температура  $T=60^{\circ}\text{C}$ . После воздействия  $1 \cdot 10^5$  циклических деформаций этот “участок” сместился вправо, и соответствующее значение температуры стало равным  $\sim 75^{\circ}\text{C}$ , после воздействия  $2 \cdot 10^5$  циклов  $\sim 90^{\circ}\text{C}$ , а после  $5 \cdot 10^5$  кратной циклической деформации этому “участку” стало соответствовать температура  $T = 135^{\circ}\text{C}$ .

Проведенные электронно - микроскопические исследования пленок  $(\text{V}_{0,5}\text{Sb}_{1,5})\text{Te}_3$  показали, что кроме наличия в них дислокационных стенок,

также имеются наличие большого количества пустых каналов и пор. При пропускании тока через пленку по ее длине, любая линия тока не разрываясь, хотя бы раз пересекает пустой канал, либо туннелированием, либо активацией. При этом высота туннельного барьера задается работой выхода материала пленки, а толщина – шириной канала. Пленки с туннельным механизмом переноса носителей имеют наибольшую тензочувствительность, так как при одноосной деформации пустоты и каналы, являясь концентраторами механических напряжений, существенно изменяют туннельный барьер.



**Рис.12.** Температурная зависимость сопротивления пленок из  $(\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5})\text{Te}_3$ , полученных на полиамидных подложках при температурах  $T_{\text{п}} \approx 140^\circ\text{C}$  (кривая  $\Gamma^1$ ) и  $T_{\text{п}} = 90^\circ\text{C}$  (I-6), до (кривая I) и после воздействия циклических деформации: для кривых 2-6,  $N \cdot 10^{-5} = 1; 2; 3; 4;$  и 5 соответственно



**Рис. 13.** Расчетное изменение сопротивления пленки от температуры согласно формуле.

Установлено, что тензочувствительность пленок  $(\text{Bi}, \text{Sb})_2\text{Te}_3$  определяется деформационной модуляцией неоднородностей, пленки с туннельным механизмом переноса носителей имеют наибольшую тензочувствительность, так как при одноосной деформации пустоты и каналы, являясь концентраторами механических напряжений, существенно изменяют туннельный барьер. В тонких пленках, кислород адсорбируясь на ненасыщенные связи дислокаций на границах кристаллитов, дает новый уровень в запрещенной зоне, характеризующийся энергией  $E_{62}$ , отличной от энергии дислокационного уровня  $E_{61}$ , возникшего вследствие упругой деформации вблизи границ кристаллитов. Это приводит к распределению связанных на границах кристаллитов электронов по двум состояниям. Сначала, так как  $E_{61} > E_{62}$  электропроводность определяется изменением

энергии дислокационного уровня  $E_{61}$ , которая с изменением температуры почти не изменяется и соответственно сопротивление пленок уменьшается. Далее ( $T > 100$  °C) увеличивается вклад  $E_{62}$ , которое увеличивается с повышением температуры и происходит повышение барьера, что соответствует результатам рис.12.

Разработана физическая модель пленки, заключающиеся электропроводность отдельного кристаллита отлична от электропроводности межкристаллитных прослоек (они считаются более высокоомными) и полагается изотропной. В рамках модели любая область прослойки характеризуется одними и теми же значениями электропроводности, а проводимость всей модельной сетки зависит лишь от соотношений электропроводностей кристаллитов и прослоек и их геометрических размеров.

Согласно предложенной модели электропроводности пленок, температурную зависимость сопротивления пленки можно записать как

$$R_{пл} = R_x^0 [1 + \alpha_k(T - T_0)] + R_n^0 \exp \frac{E_5}{kT}. \quad (3)$$

На основе предложенной модели разработали алгоритм и математическое моделирование процесса, результаты которой представлены на рис.13.

На основе полученных результатов по смещению участка с минимальным значением сопротивления на температурной зависимости от количества знакопеременных деформаций предложена способ применения пленочных элементов в качестве датчика усталости деталей и по различию значений разрешения по относительному удлинению в качестве датчиков изменения объема при низких температурах.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы состоят в следующем:

1. разработаны физико-химические аспекты и технология получения высокочувствительных поликристаллических пленочных элементов на основе  $Bi_{2-x}Sb_xTe_3$ ;  
определены оптимальные режимы получения тензочувствительных пленок на основе  $(B_{0.5}Sb_{1.5})Te_3$ . установлено, что максимальной коэффициент тензочувствительности наблюдается при  $T_n = 90$  °C и  $W = 200$  Å/с. Удельное сопротивление пленок падает с ростом  $T_n$  и  $W$ .
1. установлено, что время оптимального стабилизирующего отжига пленок на воздухе составляет 6-8 часов, что на 4 часа меньше времени аналогичного отжига в парах теллура при температуре 125 °C.
2. разработан метод изучения кинетики изменения электрофизических параметров пленок под действием температуры и деформации в виде компьютерного программного продукта MATLAB.
3. разработан новый способ регистрации изменения объема пленки при низких температурах (20÷40°C) путем применения пленочных элементов на основе  $Bi_{2-x}Sb_xTe_3$  в качестве тензодатчиков;

4. создана математическая модель кинетических процессов в пленках на основе  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$ ;
5. установлен механизм формирования поликристаллических пленок  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$  и показано что средней размер кристаллитов в пленках увеличивается при повышении температуры подложки  $50 \div 150$  °C от  $100\text{\AA}$  до  $500\text{\AA}$ .

**SCIENTIFIC COUNCIL AWARDING ACADEMIC OF THE DEGREES  
No. DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 ON AT THE SCIENTIFIC RESEARCH  
INSTITUTE OF SEMICONDUCTOR PHYSICS AND  
MICROELECTRONICS UNDER  
THE NATIONAL UNIVERSITY OF UZBEKISTAN**

---

**FERGHANA STATE UNIVERSITY**

**ONARKULOV MAKSADJON KARIMBERDIEVICH**

**Control of the technology of obtaining strain-sensitive films  $(\text{BiSb})_2\text{Te}_3$  by  
mathematical modeling of kinetic processes**

**01.04.10-Physics of semiconductors**

**DISSERTATION ABSTRACT FOR THE DOCTOR OF PHILOSOPHY (PhD)  
ON TECHNICAL SCIENCES**

**Tashkent-2021**

The theme of the doctoral dissertation (PhD) was registered by the Supreme Attestation Commission under the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under No.B2020.4.PhD/FM484

Dissertation has been prepared at Ferghana State University.

The abstract of the dissertation is posted in three (uzbek, russian, english (resume)) languages on the website (tdtu.uz) and the "Ziyonet" Information and educational portal at ([www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)).

**Scientific supervisor:** **Daliev Hojakbar Sultanovich**  
Doctor of Physical and Mathematical sciences, Professor

**Official opponents:** **Rahmatov Ahmadjon Zaynitdinovich**  
Doctor of Technical Sciences, Professor

**Zikrillayev Nurilla Fathullaevich**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

**Leading organization:** **Nukus State Pedagogical Institute**

The defense of the doctoral dissertation will be held on "25" / 12 2021, at 10<sup>00</sup> at the meeting of the Scientific Council No. DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 at the Scientific Research Institute of Physics of Semiconductors and Microelectronics of the National University of Uzbekistan (Address: 20 Yangi Olmazor str., 100057 Tashkent city, Uzbekistan. Tel. (+99871) 248-79-94, fax: (+99871) 248-79-92, e-mail: [info@ispm.uz](mailto:info@ispm.uz), Conference Hall of the SRIPSM under the NUU).

The doctoral dissertation can be looked through in the ICT Implementation Unit (registered under No. 31). Address: 20 Yangi Olmazor str., 100057 Tashkent city, Uzbekistan. Tel.: (+99871) 248-79-92, e-mail: [info@ispm.uz](mailto:info@ispm.uz).

The abstract of the dissertation was distributed on "18" / 12 2021.

(Registry record No. 31 dated 18 / 12 2021)



**Sh.B. Utamuradova**  
Chairman of the Scientific Council  
on Award of scientific Degrees,  
Doctor of Physical and Mathematical  
Sciences, Professor

**J.J. Khamdamov**  
Scientific secretary of the Scientific Council  
on Award of Scientific Degrees, Doctor of  
philosophy (PhD)

**Kh.K. Aripov**  
Chairman of the Scientific Seminar of the  
Scientific Council on Award of Scientific  
Degrees, Doctor of Physical and Mathematical  
Sciences, Professor

## INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

**The aim of the research** Development of a mathematical model of kinetic processes in order to control the technology of obtaining highly efficient polycrystalline film elements based on bismuth and antimony chalcogenides.

**The object of investigation** are film structures based on  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$ , obtained by thermal evaporation of components in vacuum.

**The scientific novelty of the research** consists of the following:

physicochemical aspects and technology for obtaining highly sensitive polycrystalline film elements based on  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$  have been developed;

the optimal modes of obtaining strain-sensitive films based on  $(\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5})\text{Te}_3$  have been determined. it was found that the maximum tensosensitivity coefficient is observed at  $T_{\text{H}} = 90 \text{ }^\circ\text{C}$  and  $W = 200 \text{ \AA} / \text{s}$ . The resistivity of the films decreases with an increase in  $T_{\text{H}}$  and  $W$ ;

it was found that the time of optimal stabilizing annealing of films in air is 6-8 hours, which is 4 hours less than the time of similar annealing in tellurium vapor at a temperature of  $125 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

developed a method for studying the kinetics of changes in the electrophysical parameters of films under the influence of temperature and deformation in the form of a computer software product MATLAB;

a new method of recording changes in the volume of a film at low temperatures ( $20 \div 40 \text{ }^\circ\text{C}$ ) has been developed by using film elements based on  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$  as strain gauges;

a mathematical model of kinetic processes in films based on  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$  was created;

the mechanism of formation of polycrystalline films  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$  is established and it is shown that the average size of crystallites in the films increases with an increase in the substrate temperature from  $50 \div 150 \text{ }^\circ\text{C}$  from  $100 \text{ \AA}$  to  $500 \text{ \AA}$ ;

### **Implementation of research results.**

Based on the results of studying the mechanisms of formation of the composition and structure of polycrystalline  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$  films and, on this basis, clarifying the nature of the kinetics of carrier transfer phenomena, their mathematical modeling and comparison with the experiment were used in the fundamental project "Increasing the efficiency of emitters, photocells and other types of optoelectronic devices based on the study of polar, bipolar phenomena and phenomena of amplification in expansions in quantum point hetero and nanostructures "F2-OT-O-15494 at Namangan State University in 2012-2016 (reference No. 89-03-3616 of the Ministry of Higher and Secondary Education dated October 2, 2020). The use of the results of scientific research has made it possible to increase the efficiency of optoelectronic emitters.

The results of studies to determine the change in the temperature coefficient of resistance and the coefficient of tensosensitivity were used when carrying out work under the grant No. 17-32-50161 of the Russian Foundation for Basic Research on the topic "Experimental study of optical activity and magnetically induced spatial dispersion in semiconductor quantum wells" ... AV Rzhанov of the Siberian Branch

of the Russian Academy of Sciences. (Reference No. 15307-26-2433 of IPP SB RAS dated 01.10.2020). The use of the results of the technological process control proposed in the thesis based on mathematical modeling of kinetic processes in semiconductor structures made it possible to obtain highly efficient polycrystalline sensitive elements and create fatigue damage sensors.

**Publication of the research results.** The main results of the dissertation work were reported and discussed at 7 international and 4 republican scientific and practical conferences.

**The structure and volume of the dissertation.** The dissertation work consists of an introduction, four chapters, a conclusion, a list of published works, an appendix and contains 30 figures, 6 tables, a list of used literature of 108 titles and is presented on 112 pages.

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

**I бўлим (I часть, part I)**

1. Далиев Х.С., Онаркулов М. К., Азимов Т.М. Влияние легирующих примесей на механические и термоэлектрические свойства охлаждающих термоэлементов на основе холькогенидов висмута сурьмы. // Физика полупроводников и микроэлектроника. Ташкент. 2020. Т.2.№1. с. 9-16. (01.00.00; №16)
2. Далиев Х.С., Онаркулов М.К., Отажонов С.М. Устройства для изучения тензочувствительности в фоточувствительных полупроводниковых пленках. // Физика полупроводников и микроэлектроника. Ташкент. 2021 Т.1.№1. с. 31-35. (01.00.00; №16)
3. Онаркулов М.К., Насриддинов С.С., Юлдашев Ш.А. Структура тонких пленок  $(\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5})_2\text{Te}_3$ , полученных термическим испарением в вакууме. // Сборник международной научной рецензируемой онлайн конференции на тему "Современные тенденции развития физики полупроводников: достижения, проблемы и перспективы". Ташкент.2020.май. с.136-140
4. Далиев Х.С., Онаркулов М.К. Influence of structure and composition on the strain sensitivity of films based on Bi-Sb-Te.// Science and world. International scientific journal. Volgograd. 2021. №8(96). pp. 12-17. (№5 GIF, IF=0.325)
5. Далиев Х.С. Ахмедов М.М., Онаркулов М.К. Influence of the temperature and cyclic deformations of  $(\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x})_2\text{Te}_3$  films on their resistance.// Инженерно-физический журнал. Беларусь. 2021. Т.94. №5. с.1403-1407. (01.00.00; №28)

**II бўлим (II часть, part II)**

6. Ахмедов М.М., Далиев Х.С., Онаркулов М.К. Электронографический анализ поликристаллических тензочувствительных пленок  $(\text{Bi}_x\text{Sb}_{1-x})_2\text{Te}_3$ . // Научный вестник ФерГУ. 2019. №6. с. 109-111.
7. Юсупова Д.А., Онаркулов М.К., Таджибаева Х. Механизмы высокой тензочувствительности в гетерогенных поликристаллических пленках на основе теллурида-висмута сурьмы. / Материалы Республиканской конференции «Современные проблемы физики полупроводников» СПФП-2019, г.Нукус, 20 ноября 2019 г., с.257-260.
8. Юсупова Д.А., Онаркулов М.К., Фозилова М. Обоснование физического подхода к описанию явлений переноса в поликристаллических пленках полупроводников. / Материалы Республиканской конференции «Современные проблемы физики полупроводников» СПФП-2019, г.Нукус, 20 ноября 2019 г., с.250-253.
9. Ахмедов М.М., Гойназарова К.И., Кадыров К.С., Онаркулов М.К. О химическом составе тензочувствительных пленок на основе системы Bi-Sb-Te. //Universum: Технические науки: электрон.научн.журн.2020. №2 (71). с.39-42.  
[URL:http://7universum.com/ru/tech/archive/item/8824](http://7universum.com/ru/tech/archive/item/8824).

10. Онаркулов М.К., Отажонов С.М., Ботиров К.А., Юнусов Н., Мамаджонов У. М., Каххорова Б.А. Устройство для изучения тензочувствительности в фоточувствительных полупроводниковых пленках. // Universum: Технические науки: электрон. научн. журн. 2020. № 2(71). с.56-58 URL: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/8805>
11. Онаркулов М.К. Программа по изучению влияния температуры на электропроводность тонких поликристаллических пленок, полученных из полупроводников. Гувохнома № DGU 08642. 20.07.2020 г. Агентство по интеллектуальной собственности при Министерстве юстиции Республики Узбекистан.
12. Онаркулов К.Э., Азимов Т.М, Гайназарова К. И., Онаркулов М.К. Влияние контактов термоэлементов на эффективность термобатареи. // “Муқобил энергия манбаларини татбиқ этишда замонавий инновацион технологияларнинг жорий этиш омилари” Республика онлайн илмий амалий конференцияси. Наманган. Апрель. 2020. с.71-72.
13. Онаркулов К.Э., Азимов Т.М., Онаркулов М.К. Термоэлементы на основе  $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$  легированных никелем и их свойства в интервале температур 300-500К. // V Международная научная конференция “Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниковых микро-и наноструктурах”. Фергана. 2020. Ноябрь. с.332-334.
14. Онаркулов М. К., Рахмонкулов М. Х., Тохтасинов О. А., Юлдашев А. А. Влияние термообработки на спектре инфракрасного отражения тензочувствительных пленок PbSe. // V Международная конференция по “Оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро- и наноструктурах”. Фергана 2020 г. Ноябрь. с.328-329.
15. Далиев Х. С., Онаркулов М. К., Юсупова Ф. К. влияние состава и структуры на электрофизические свойства поликристаллических пленок  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$ . // V Международная конференция по “Оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро- и наноструктурах”. Фергана 2020 г. Ноябрь. с.379-380.
16. Онаркулов М.К. Математическое моделирование кинетики изменения сопротивления от температуры поликристаллических тензочувствительных пленок  $(\text{BiSb})_2\text{Te}_3$ . // Ҳалқаро миқёсда илмий-амалий онлайн анжуман “Инновацион ва замонавий аҳборот технологияларини таълим, фан ва бошқарув соҳаларида қўллаш истиқболлари”. Самарқанд. 2020 г. 14-май с. 163-166.
17. Онаркулов М. К., Юлдашев Ш. А., Юлдашев А. А. Влияние предварительной деформации подложек на тензорезистивные параметры пленок  $(\text{BiSb})_2\text{Te}_3$ . // Материалы международной научной конференции. “Тенденции развития физики конденсированных сред”. Фергана 2021 г. Май. с. 150-154.





Автореферат “Тил ва адабиёт таълими” журнали тахририятида тахрирдан  
ўтказилди ва ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги матнларини мослиги  
текширилди (11.10.2021 йил)

Бичим 60x841/16.Рақамли босма усули. Times гарнитураси.

Шартли босма табағи:3,25. Адади 70. Буюртма №26.

Гувоҳнома reestr № 10-4434

Яримўтказгичлар физикаси ва микроэлектроника илмий-тадқиқот институти  
босмаҳонасида чоп этилган.

Босмаҳона манзили: 100057, Тошкент ш., Янги Олмазор кўчаси, 20-уй.

