

**NAMANGAN MUHANDISLIK-TEXNOLOGIYA INSTITUTI
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

FARG‘ONA DAVLAT UNIVERSITETI

AZIMOV TULANBOY MA'RUFJONOVICH

**Bi-Sb-(Te, Se) ASOSIDAGI TERMOELEKTRIK QOTISHMALARNING
KOMMUTATSION MATERIALLAR BILAN KONTAKTIDAGI FIZIK-
KIMYOVIY O‘ZARO TA’SIRLASHUVINING XOSLIKLARI**

01.04.10 – Yarimo‘tkazgichlar fizikasi

**FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

Namangan-2025

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

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

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

Azimov Tulanboy Ma'rufjonovich

Bi-Sb-(Te, Se) asosidagi termoelektrik qotishmalarning kommutatsion materiallar bilan kontaktidagi fizik-kimyoviy o'zaro tasirlashuvining xosliklari 3

Азимов Туланбой Маъруфжонович

Особенности физико-химического взаимодействия термоэлектрических сплавов на основе Bi-Sb-(Te, Se) в контакте с коммутационными материалами 23

Azimov Tulanboy Ma'rufjonovich

Features of physic-chemical interaction of thermoelectric alloys based on Bi-Sb-(Te, Se) in contact with switching materials 45

E'lon qilingan ishlar ro'uxati

Список опубликованных работ
List of published works..... 49

**NAMANGAN MUHANDISLIK-TEXNOLOGIYA INSTITUTI
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

FARG‘ONA DAVLAT UNIVERSITETI

AZIMOV TULANBOY MA'RUFJONOVICH

**Bi-Sb-(Te, Se) ASOSIDAGI TERMOELEKTRIK QOTISHMALARNING
KOMMUTATSION MATERIALLAR BILAN KONTAKTIDAGI FIZIK-
KIMYOVIY O‘ZARO TA’SIRLASHUVINING XOSLIKLARI**

01.04.10 – Yarimo‘tkazgichlar fizikasi

**FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

Namangan-2025

Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalari vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2023.1.PhD/FM850 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya Farg'ona davlat universitetida hajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezюме)) ilmiy kengash veb-sahifasiga (www.fargohu.uz) va Ziyonet Axborot-ta'lim portalida (www.ziynet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar:

Onarkulov Karimberdi Egamberdiyevich
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Rasmiy opponentlar:

Zaynabidinov Sirojiddin Zaynabidinovich
fizika-matematika fanlari doktori, professor,
O'zR FA akademigi

Ayupov Kutub Saurovich
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Yetakchi tashkilot:

Buxoro davlat universiteti

Dissertatsiya himoyasi Namangan muhandislik-texnologiya instituti huzuridagi ilmiy darajalar beruvchi PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 raqamli ilmiy kengashning 2025 yil "19" aprel soat 10⁰⁰ daqi majlisida bo'lib o'tadi. (Manzil: 160115, Namangan shahri, Kosonsoy ko'chasi, 7-uy. Tel./faks: (99869) 225-10-07; (99869) 225-76-75, e-mail: niqi_info@eda.uz, Namangan muhandislik-texnologiya instituti 3-bino, 2-qavat, ilmiy kengash xonasi).

Dissertatsiya bilan Namangan muhandislik-texnologiya institutiining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin. (374 raqam bilan ro'yxatga olingan.) Manzil: 160115, Namangan shahri, Kosonsoy ko'chasi, 7-uy. Tel: (99869) 225-10-07.

Dissertatsiya avtoreferati 2025 yil "03" "04" da tarqatildi.
(2025 yil "03" "04" daqi № 22 raqamli reestr bayonnomasi.)



U.I. Erkaboyev
Ilmiy darajalar beruvchi
ilmiy kengash raisi, f.-m.f.d., professor

A.A. Abdukarimov
Ilmiy darajalar beruvchi
ilmiy kengash ilmiy kotibi, PhD, dotsent

N.Yu. Sharibayev
Ilmiy darajalar beruvchi
ilmiy kengash qoshidagi ilmiy seminar raisi,
f.-m.f.d., professor

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahonda, qayta tiklanuvchi energiya manbalari ichida istiqboli bilan mashhur bo'lgan issiqlik energiyasini elektr energiyasiga aylantiruvchi vismut-surma xalkogenidlariga asoslangan termoelektrik yarimo'tkazgichli materiallarini olish texnologiyasining rivojlanishi sezilarli darajada ortmoqda. Bu sohalardagi so'nggi yutuqlardan foydalangan holda infraqizil va optik nurlanishlar manbalari va qayd qilgichlari, termoelektrik energiya o'zgartirgichlari uchun aktiv yarimo'tkazgichli termoelementlar yaratish hamda undan samarali foydalanishga katta e'tibor qaratilmoqda. Bu borada, jumladan Bi-Sb-(Te, Se) asosidagi yarimo'tkazgichli termoelektrik materiallarni ishlab chiqish, nikel bilan legirlangan termoelektrik materiallarni samaradorligini baholash va modellashtirish asosida energiya samaradorligini oshirishga alohida e'tibor berilmoqda.

Jahonda past haroratli termo'zgartirgichlar va sovutuvchi termoelektrik batareyalar uchun istiqbolli ishchi materiallar sifatida vismut va surma xalkogenidlari asosidagi yarimo'tkazgichlar bo'yicha ilmiy tadqiqotlar olib borilmoqda. Bu jarayonda Bi va Sb xalkogenidlari asosidagi yarimo'tkazgichlarning xususiyatlari o'rganilib, ular asosida termo'zgartirgichlar yaratish va yarimo'tkazgichli asboblarni ishlab chiqarish texnologiyasini takomillashtirishga alohida e'tibor qaratilmoqda. Shu bilan birga, BiSb va PbSb yarimo'tkazgichlar yordamida termoelektrik materiallar bilan kommutatsiya kontaktlari sohasidagi diffuziya jarayonlarini aniqlash, termoelektrik materiallarning kontaktlashuvchi yuzalarini nikel bilan metallashtirish orqali diffuziya koeffitsiyentlarini kamaytirish imkoniyatlarini tahlil qilish va termoelementlarning energiya samaradorligini aniqlash dolzarb vazifalardan hisoblanmoqda.

Respublikamizda qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan keng foydalanish va samaradorligini oshirishga yordam beradigan yangi texnologiyalarni yaratish bo'yicha tadqiqotlar o'tkazish hamda ularni amalda qo'llash bo'yicha keng ko'lamli chora-tadbirlar amalga oshirilmoqda. 2022–2026-yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasida, jumladan, "Iqtisodiyotni elektr energiyasi bilan uzluksiz ta'minlash hamda "Yashil iqtisodiyot" texnologiyalarini barcha sohalarga faol joriy etish, iqtisodiyotning energiya samaradorligini 20 foizga oshirish" bo'yicha vazifalar belgilangan. Ushbu vazifalarni amalga oshirishda, xususan, qayta tiklanuvchi energiya manbalari asosida yangi ishlab chiqarish quvvatlarini qurish va mavjudlarini modernizatsiya qilish muhim ahamiyat kasb etadi. O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-son "2022–2026-yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to'g'risida"gi Farmoni, 2019-yil 22-avgustdagi PQ-4422-son "Iqtisodiyot tarmoqlari va ijtimoiy sohaning energiya samaradorligini oshirish, energiya tejoychi texnologiyalarni joriy etish va qayta tiklanuvchi energiya manbalarini rivojlantirishning tezkor chora-tadbirlari to'g'risida", 2020-yil 10-iyuldagi PQ-4779-son "Iqtisodiyotning energiya samaradorligini oshirish va mavjud resurslarni jalb etish orqali iqtisodiyot tarmoqlarining yoqilg'i-energetika mahsulotlariga

qaramligini kamaytirishga doir qo‘shimcha chora-tadbirlar to‘g‘risida¹gi Qarorlari hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa me‘yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiya tadqiqoti muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo‘nalishlariga mosligi. Dissertatsiya ishi O‘zbekiston Respublikasi fan va texnologiyalar taraqqiyoti ustuvor yo‘nalishlarining III. “Energiya, energiya resurslarini tejash, transport, mashinasozlik va asbobsozlik; zamonaviy elektronika, mikroelektronika, fotonika, elektron asbobsozlikni rivojlantirish” ustuvor yo‘nalishiga mos keladi.

Muammoning o‘rganilganlik darajasi. Dunyodagi nufuzli ilmiy markazlar va universitetlar yuqori ishchi parametrlarga ega bo‘lgan yarimo‘tkazgichli termoelektrik generatorlar yaratish sohasida fundamental va amaliy tadqiqotlar bilan shug‘ullanmoqda. Misol uchun, Maks Plank nomidagi kimyoviy energiya muammolari va Materialshunoslik institutlarida (Dennis Groeneveld, Jan D.Koenig, Jürgen Wöllenstein Michael Poschmann - Germaniya) vismut va surma tellurididan n- va p-tipli yarimo‘tkazgichli termoelektrik materiallar olish va ularning strukturasi o‘rganish bo‘yicha tadqiqotlar olib borilmoqda, Nagoya texnologiya instituti, Ilg‘or texnologiyalar va sanoat fanlari milliy institutlarida (Takuya Fujimoto, Masashi Mikami, Hidetoshi Miyazaki, Yoichi Nishino - Yaponiya) yarimo‘tkazgichli termoelektrik materiallarga turli atomlar diffuziyasi, Davell Shadds universiteti, Kolorado Yer boyliklari institutida (Zheng Ju, Susan M.Kauzlarich, Caitlin Crawford, Jesse Adamczyk, Eric S.Toberer - AQSh), $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Sb}_2\text{Te}_3$ geteroo‘tishli nanostrukturalarning termoelektrik xususiyatlarini o‘rganish, Shanxay mikrostruktura va informasion texnologiyalar instituti va Materialshunoslik va optoelektronika Markazlarida (Weixiong Huang, Ting Li, Yi Zou, Chaoqun Qi, Guangce Zheng, Haoyu Wang, Minfan Fu, Qun Lin, Shucheng Yang, Bicong Weng, Jie Ren, Heyuan Li, Haoyu Wang, Junrui Liang, Minfan Fu - Xitoy) Sb-Te asosida materiallar sintez qilish va ularga nodir yer elementlarini kiritish orqali elektron xotira elementlarini yaratish, Moskva po‘lat va qotishmalari institutida (MISIS) (Vadim S.Zolotorevsky, Nikolai A.Belov, Michael V.Glazoff - Rossiya) yangi materiallar va texnologiyalarni ishlab chiqish, xossalarini va qo‘llanilishini tadqiq qilish, Ozarbayjon neft va sanoat davlat universitetida (Ziya S Aliev, Mahammad B.Babanly, Imamaddin R.Amiraslanov, G.R.Gurbanov, M.B.Adygezalova - Ozarbayjon) $\text{GeSb}_2\text{Te}_4\text{-SnSb}_2\text{Te}_4$ tipidagi yarimo‘tkazgich qattiq qotishmalar olish va strukturaviy, elektrofizik xususiyatlarini tadqiq qilishgan ba 6.

Qator mualliflar, jumladan o‘zbek olimlaridan akademiklar R.A.Mo‘munov, S.Zaynalobiddinov, A.T.Mamadolimovlar (yarim o‘tkazgichlarda diffuziya jarayonlari), professorlar G.Abduraxmanov (o‘tish guruhi metallari oksidlari bilan legirlangan silikat va ligaturalarning tarkibi va strukturasi asosiy termoelektrik xossalariga ta‘sirini eksperimental va nazariy o‘rganishlar), S.H.Shomirzaey, A.B.Karimov (vismut va surma telluridining presslangan va polikristall

¹ O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2020 yil 10 iyuldagi PQ-4779-son qarori

tuzilmalarida termo va tenzoelektrik effektlarni o'rganish), R.Ya.Rasulov (termoelementlarning nomuvozanatli sovutish jarayonlarining kontakt sohasidagi haroratli noturg'unligini nazariy tahlillari), A.M.Kasimaxunova (yarimo'tkazgichli termoelektrik materiallar asosida termoelementlar tayyorlash va ularni qo'llanishi), K.E.Onarkulov (turli kirishmalarning yarimo'tkazgichli termoelektrik materiallar xossalari ta'sirini o'rganish), M.B.Nabiyev (termoelektrik materiallardan TEG yaratish va qo'llash), Ya.U.Usmanov (yarimo'tkazgich qotishmalar olish texnologiyasini takomillashtirish) va boshqalar yuqori samarali termoelektrik generatorlarni yaratish uchun kimyoviy bir jinsli va termoelektrik samaradorligi yuqori bo'lgan yarimo'tkazgich qotishmalar olishning prinsipial imkoniyatlarini ko'rsatmoqdalar.

Mazkur tadqiqotlar natijasida Bi va Sb xalkogenidlari asosidagi yarimo'tkazgich materiallari asosida termoo'zgartirgichlar yaratish bo'yicha erishilgan bo'lsada, ushbu materiallarning optimal parametrlarini asoslash va yanada samarali hamda mustahkam tarkibli yangi kontakt materiallarni izlash, ularning uzoq muddatli barqarorligini ta'minlash bo'yicha tadqiqotlar yetarlicha o'tkazilmagan.

Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan oliy ta'lim yoki ilmiy-tadqiqot muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog'liqligi. Dissertatsiya tadqiqoti Farg'ona davlat universitetining ilmiy tadqiqot ishlari rejasi doirasida, jumladan 2012-2014 yillardagi ITD-12-56 «Yarimo'tkazgichlardan termoelektrik materiallar tayyorlash» ilmiy loyihasi doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi vismut va surma xalkogenidlari asosida termoelektrik materiallarning samaradorligini oshirish, kontakt sohasidagi diffuziya jarayonlarini o'rganish orqali samarali kommutatsiya o'tishlarini yaratish hamda yarimo'tkazgichli termoelementlar olish texnologiyasini takomillashtirishdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

Bi-Sb-(Te, Se) asosidagi yarimo'tkazgichli termoelektrik materiallarni olish texnologiyasini takomillashtirish;

nikel bilan legirlangan termoelektrik materiallarni elektrofizik xususiyatlaridan kelib chiqib termoelektrik samaradorligini baholash;

termoelektrik materiallarning kontaktlashuvchi yuzalarini nikel bilan metallashtirish orqali diffuziya koeffitsiyentlarini kamaytirish imkoniyatlarini tahlil qilish;

PbSb evtetikasi bilan kommutatsiyalangan va Ni kirishmasi bilan legirlangan termoelektrik materiallarning mexanik, hamda elektr xossalari tadqiqot natijalari asosida samarali ishlaydigan termoelektrik batareyalarni yaratish imkoniyatlarini tadqiq qilish.

Tadqiqotning obyekti sifatida yarimo'tkazgichli Bi-Sb-(Te,Se) yarimo'tkazgich materiallari, pripoy va Bi-Sb va Pb-Sb asosidagi evtetiklar tanlangan.

Tadqiqotning predmeti BiSb-(Te,Se) asosidagi yarimo'tkazgichli materiallarning termoelektrik va mexanik xossalari, Bi – Sb va Pb- Sb evtetiklar va

pripoyning yarimo'tkazgichli termoelektrik materiallar va kommutatsiya shinalari bilan o'zaro ta'sirlashuvi va ular asosida tajriba namunalarini yaratish hisoblanadi.

Tadqiqotning usullari. Tadqiqotlar jarayonida BiSb-(Te,Se) asosida yarimo'tkazgichli termoelektrik materiallar olish metodi, termoelektrik parametrlarni o'lchash uchun jamlanma va solishtirma qarshilikni o'lchashda to'rt zond metodi va standart o'lchov asboblardan foydalanilgan.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

ilk bor, Bi-Sb-(Te,Se) asosidagi yarimo'tkazgichli termoelektrik materiallarni Ni bilan ligirlash orqali yangi elektrofizik xususiyatlarga ega bo'lgan termoelement materiallarni yaratish texnologiyasi takomillashtirilgan;

BiSb va PbSb evtektiklari va pripoy yordamida termoelektrik materiallar bilan kommutatsiya kontaktlaridagi diffuziya jarayonlari kamaytirish va samaradorlikni oshirishini aniqlovchi model ishlab chiqilgan;

termoelektrik materiallarning diffuziya koeffitsiyentlarini kamaytirish va kontaktlashuvchi yuzalarini metallashtirish orqali termoelementlarning elektrofizik samaradorligini oshishi aniqlangan;

kommutatsiya kontaktlaridagi diffuziya jarayonlarini kamaytirish hamda kontaktlashuvchi yuzalarini metallashtirish orqali yuqori samaradorlikka ega bo'lgan yangi termoelektrik batareyalarning ishlab chiqarish texnologiyasi takomillashtirilgan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

ixcham termoo'zgartirgichlarni tayyorlashda yarimo'tkazgich materiallarning nisbiy sarfini kamaytirish va nosozlari foizlarini pasaytirish imkoniyatlari aniqlangan;

past temperaturali termoo'zgartirgichlarda PbSb evtektik materiali orqali kommutatsiya o'tishlarini ta'minlash imkoniyatlari ko'rsatilgan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi zamonaviy yuqori aniqlikdagi qurilma va uskunalardan, zamonaviy va ilmiy tasdiqlangan tadqiqot usullaridan, o'lchash va ma'lumotlarni qayta ishlashning me'yoriy, tasdiqlangan kompleks usullaridan foydalanilganligi, shuningdek, olingan natijalarning yarimo'tkazgichlar fizikasi va texnikasining zamonaviy tushunchalari va nazariy asoslari bilan mos kelishi bilan ta'minlangan.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati nikel bilan legirlangan $Bi_2Te_{2,88}Se_{0,12}$ va $Bi_{0,5}Sb_{1,5}Te_3$ yarimo'tkazgichli materiallarining termoelektrik va mexanik xossalarni xosliklarini, $77 \div 300$ K haroratlar oralig'ida $p - Bi_2Te_3 + Ni$ namunalari uchun zaryad tashuvchilar sochilish mexanizmini, Bi-Sb, PbSb evtektiklarini termoelektrik materiallar va kommutatsiya shinalari bilan o'zaro ta'sirlashuvini o'rnatishdan iborat.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati shundan iboratki, ishlab chiqilgan yarimo'tkazgichli materialdan ixcham termoo'zgartirgichlar tayyorlashda foydalanish va ularni keyingi turli rejimlarda ekspluatatsiya qilishda nosozlari foizlarini pasaytirish va natijada yarimo'tkazgich materiallarning nisbiy sarfini kamaytirish imkoniyati beradi, kimyoviy usul bilan o'tqazilgan antidiffuzion qoplamali $Pb - Sb$ evtektikdan kommutatsiya o'tishlarini ta'minlashdan sovituvchi

qurilmalar, shuningdek 423 K haroratda ishlaydigan past haroratli termoo'zgartirgichlarda ham foydalanish mumkin. Bunda termoelementlarning kontakt sohalarida kimyoviy o'zaro ta'sirlashuv yo'qotiladi, issiqlik va elektr yo'qotishlari kam, mexanik jihatdan mustahkam kontakt bo'lishi ta'minlanadi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. BiSb-(Te, Se) asosidagi termoelektrik qotishmalarning kommutatsiya materiallari bilan kontaktidagi fizik-kimyoviy o'zaro ta'sirlari xosliklarini tadqiq qilish bo'yicha olingan ilmiy–amaliy natijalar asosida:

p-tipdagi $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Sb}_2\text{Te}_3$ asosga ochiq tigelda kirishmalar kiritilganda uning termoelektrik xususiyatlarining barqarorligini ta'minlab, yarimo'tkazgich materiallarining termoelektrik xususiyatlarini takror hosil qilish imkonini berishi ko'rsatilgan. (O'zbekiston respublikasi intellektual mulk agentligining 2019 yil 6 avgustdagi № IAP 05968 raqamli patenti). Natijada, materialning barqarorligi, iqtisodiy energiya samaradorligi oshirilgan.

$\text{Bi}_2\text{Te}_{2,88}\text{Se}_{0,12}$ va $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$ asosida nikel bilan legirlangan termoelektrik samaradorlik qiymatlarini saqlagan, mustahkamlik darajasi yuqori bo'lgan termoelektrik materiallar olingani; kontaktlashish yuzalariga nikelning kimyoviy usulda qoplanishi *BiSb* va *PbSb* evtetiklari bilan ishonchli aralashuvchanlikni ta'minlashi; *PbSb* va *BiSb* optimal qorishma evtetiklarining termoelektrik materiallar bilan kontaktlashish diffuziya koeffitsiyentlari va energiya aktivasiyalari aniqlangan. (Andijon davlat universitetining 2024 yil 11 dekabrda №04-2791 sonli ma'lumotnomasi). Natijada bir jinsli strukturali kirishma-nuqsonli kristallar olish imkonini oshirgan.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Dissertatsiya ishining asosiy natijalari 9 ta xalqaro va 6 ta Respublika miqyosidagi ilmiy konferensiyalarda ma'ruza qilingan va muhokamadan o'tkazilgan.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi.

Dissertatsiya mavzusi bo'yicha jami 26 ta ilmiy ish e'lon qilingan, ulardan 5 tasi dissertatsiya ishlarining asosiy ilmiy natijalarini nashr etish uchun O'zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasi tomonidan tavsiya etilgan ilmiy jurnallarda, shu jumladan 2 ta maqola xorijiy xalqaro scopus bazasidagi konferensiyalarda chop etilgan. p-tipdagi yarimo'tkazgichli termoelektrik materiallar olish usulga 1 ta patent olingan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya kirish, to'rtta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati va ilovalardan iborat. Dissertatsiya ishining hajmi 34 ta rasm, 11 ta jadvalni o'z ichiga olgan holda 110 betni tashkil etadi.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Dissertatsiyaning kirish qismida mavzuning dolzarbligi va zaruriyati ifodalangan, maqsad va vazifalari shakllantirilgan, tadqiqot obyekti, predmeti va tadqiqot usullari aniqlangan, tadqiqotning O'zbekiston Respublikasi fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga muvofiqligi aniqlangan, tadqiqotning ilmiy yangiligi, olingan natijalarning ishonchliligi asoslangan, ilmiy va

amaliy ahamiyati ochib berilgan, ish natijalarining qo‘llanilganligi haqida, hamda dissertatsiya ishining tuzilishi bo‘yicha qisqacha ma‘lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiyaning «**Bi-Sb-(Te, Se) asosidagi materiallarning yarimo‘tkazgich xossalari, ularni kommutatsiya qilish usullari va kommutatsiya materiallari**» nomli birinchi bobida dissertatsiya mavzusiga oid adabiyotlarning sharhi keltirilgan.

Termoelektrik sovitgichlar an‘anaviy sovutish tizimlariga nisbatan juda ko‘p afzalliklarga ega. Termoelektrik qurilmalar energiya ishlab chiqarishning muhim manbai sifatida ham ishlatilishi mumkin, bunda isrof bo‘layotgan issiqlik energiyasi foydali elektr energiyasiga aylantirilishi mumkin. Ushbu xususiyatlari va keng ko‘lamli qo‘llanilishiga qaramasdan, termoelektrik qurilmalardan foydalanish cheklangan. Tan olinmayotganligining asosiy sababi shundaki, biz haligacha hozirgi avlod elektronikasi uchun zarur bo‘lgan sovutish samaradorligi va solishtirma quvvatga erisha olmayapmiz.

Yarimo‘tkazgichli materiallar ichida Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 va ular asosidagi qattiq qotishmalar 200÷600 K oralig‘ida eng yaxshi termoelektrik xossalarga ega.

n-tipli materiallar orasida tarkibi 4÷10 mol % miqdorida galogenidlar bilan legirlangan $Bi_2Te_3 - Bi_2Se_3$ asosidagi qattiq qotishmalar eng yuqori samaradorlikka ega. Bu materiallarda xona haroratsida eng yuqori termoelektrik samaradorlik ta‘minlanadi va $(2,9 \div 3,0) 10^{-3} 1/K$ ni tashkil etadi.

Adabiyotlarda keltirilgan ma‘lumotlarni tahlil qilish asosida dissertatsiyaning maqsadi va vazifalari shakllantirilib, yangi kommutatsiya materiallarini yaratish bo‘yicha tadqiqot yo‘nalishlari hamda vismut va surma xalkogenidlari asosida sovutish termoelementlarini kommutatsiya variantlari tanlangan.

Dissertatsiyaning “**Tajriba namunalarini olish texnologiyasi va ularni tadqiqot usullari**” nomli ikkinchi bobida vismut va surma xalkogenidlari asosida termoelektrik materiallarni olish, kommutatsion priпой va evtektiklar, tajriba namunalarini tayyorlash va asosiy parametrlarni o‘lchash usullari va qurilmalari tavsiflangan.

n – va p – tipli materiallarning mustahkamlik xususiyatlariga Ni qo‘shilishining ta‘sirini o‘rganish uchun tajriba namunalarini tayyorlandi. n – tipli $Bi_2Te_{2,88}Se_{0,12}$ kompozision materialga legirlovchi sifatida Ni (0,01÷0,06) massa % va $SbCl_3$ (0,04 ÷ 0,07) massa % ishlatilgan. p – tipdagi $Sb_{1,5}Bi_{0,5}Te_3$ tarkibiga ega termoelektrik materialga +3 massa % Te, (0,01÷0,06) massa % Ni kiritilgan .

Kontaktga yaqin sohalarda kechadigan jarayonlarni o‘rganish uchun kavsharlash usulida tajriba namunalarini tayyorlangan. Yarimo‘tkazgichli materiallar elektriskrali kesish stanokida 6 ÷ 7 mm li quymalardan 7 mm balandlikdagi silindrlarga kesilgan. Mis shinalar ham diamerti 6 ÷ 7 mm va balandligi 3 mm bo‘lgan shaklga ega edi.

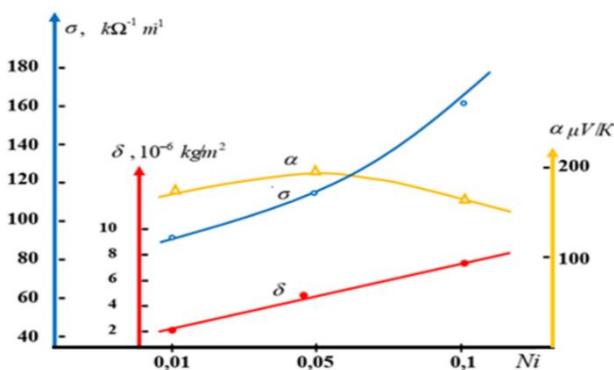
$Bi_2Te_3 - Bi_2Se_3$ va $Sb_2Te_3 - Bi_2Te_3$ qattiq qotishmalar asosida termoelektrik materiallarning elektr o‘tkazuvchanligi, termoeuyuk va issiqlik o‘tkazuvchanligi haroratga bog‘liqligini o‘rganishda prinsipial sxemasi 1-rasmda keltirilgan qurilma ishlatilgan.

Bitta isitgich yordamida namunada harorat gradiyenti yuzaga kelishida zondlar orasidagi potentsiallar farqini o‘lchashga asoslanib $\alpha = \frac{E}{\Delta T_4}$ bo‘yicha termoeuyuk

koeffitsiyenti hisoblangan, bu yerda $\Delta T_4 = T_4 - T_5$ - zondlar orasidagi harorat farqi, E-ular o'rtasidagi EYUK. Namunadan elektr toki o'tkazilganda, elektr o'tkazuvchanligi $\sigma = \frac{I l}{U \cdot S}$ formulasi yordamida shtiftlar orasidagi kuchlanish pasayishidan hisoblab topilgan.

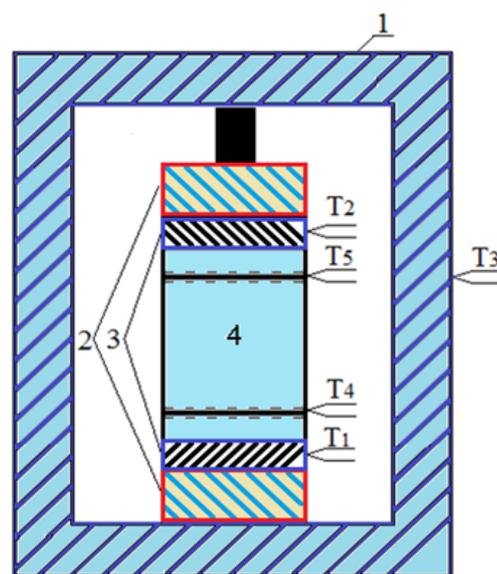
Mavjud universal sinov mashinalari odatda ma'lum profil va o'lchamlardagi qirralari qalinlashgan namunalardan foydalanadilar. Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 turdagi birikmalar juda mo'rt va namunalarga kesish elektruchqunli usulda amalga oshirilganligi sababli, murakkab konfiguratsiyaga ega bo'lgan namunalarni deyarli tayyorlab bo'lmaydi. Shu sababli, to'g'ri burchakli kesimga ega namunalarni siqish va cho'zish sinovlarini o'tkazish imkonini beruvchi uskuna ishlab chiqilgan va yasalgan.

Dissertatsiyaning **“Yarimo'tkazgichli materiallarning termoelektrik xossalarini tadqiq etish va kommutatsion materiallar bilan kontaktdagi fizik-kimyoviy o'zaro ta'sirlashuvini o'rganish”** nomli uchinchi bobida mis va nikel bilan legirlangan $Bi_2Te_{2,88}Se_{0,12}$ va $Bi_{0,5}Sb_{1,5}Te_3$ qattiq qotishmalar asosidagi termoelektrik, mexanik va galvanomagnit xossalari, kontaktda yaqin sohalarda ro'y beradigan kommutatsiya materiallari va diffuziya jarayonlarining xossalari va termoelementlarning kommutatsiya imkoniyatlari o'rganilgan.



2-rasm. $Bi_2Te_{2,88}Se_{0,12}$ materialining siqilishida termoeuyuk, elektr o'tkazuvchanlik va materialning mustahkamlik chegarasining Ni kirishmaga bog'liqliklari (\circ - σ , Δ - α , \bullet - δ).

Ni tarkibi ortgan sari materialning termo EYUKning pasayishi kuzatiladi. Bunda termoeuyuk qiymati $170 \div 180 \cdot 10^{-6}$ V bo'lgan namunalar siqilganda mexanik



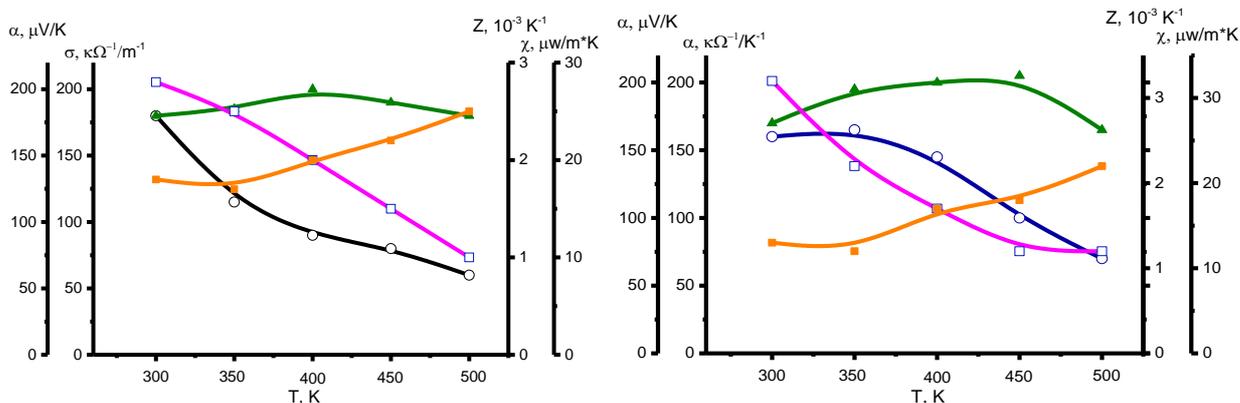
1-rasm. $300 \div 900$ K temperatura α, σ, χ ni o'lchash qurilmasining prinsipial sxemasi. 1 – tekislovchi ekran; 2 – steatit prokladkalar; 3 – yuqori va pastki pechkalar; 4 – tadqiq etilayotgan namuna; T_1, T_2, T_3, T_4, T_5 – termoparalar va zondlar.

$Bi_2Te_{2,88}Se_{0,12}$ va $Bi_{0,5}Sb_{1,5}Te_3$ qattiq qotishmalarni nikel bilan legirlashda, ular mustahkomlovchi ta'sirga ega ekanligi, ammo misdan farqli ravishda akseptorli ekanligi o'rnatilgan. Kompensatsiyalovchi donor kiritmalarining miqdorini mos ravishda orttirmasdan, faqat Ni tarkibining ortishi qotishma mustahkamligining yanada ortishiga olib keladi, ammo, bunda termoeuyuk keskin kamayadi (2-rasm).

Massasi 0,5 % kiritma kiritilganda materialning maksimal termo EYUK koeffitsiyentiga erishiladi. Mexanik regeneratsiyaning ortishi bilan birgalikda

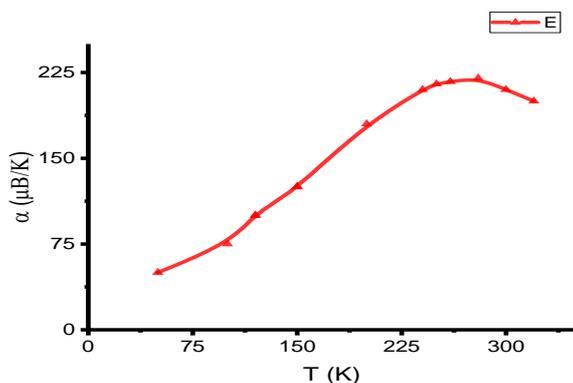
mustahkamlik chegarasi δ 3,4 dan 4,2 kG/mm² gacha o'zgaradi, bu esa mos ravishda δ Bi₂Te_{2,88}Se_{0,12} ga nisbatan 1,5 ÷ 2 marotaba yuqoridir.

3.a-rasmda nikel bilan legirlanmagan Sb_{1,5}Bi_{0,5}Te₃+3 massa % Te 3.b-rasmda 0,05 % Ni bilan legirlangan Sb_{1,5}Bi_{0,5}Te₃+3 massa % Te qattiq qotishmaning, haroratga bog'liqligi keltirilgan. Rasmdan ko'rinib turibdiki, nikel bilan legirlanganda p –tipli materialning termoelektrik xossalari sezilarli o'zgarishlar ro'y bermaydi.



3-rasm. Sb_{1,5}Bi_{0,5}Te₃ + 3 massa % Te (a), Sb_{1,5}Bi_{0,5}Te₃ + 3%Te, 0,5% Ni (b) tarkibdagi qattiq qotishmalarning haroratga bog'liqligi (○ – σ , Δ – α , □ – χ , ■ – Z)

Zaryad tashuvchilarining sochilishi va Bi₂Te₃ + 0,04 massa % Ni qotishmaning zonali strukturasi modelini sifatli o'rnatilishini aniqlash maqsadida 77 ÷ 300 K harorat oralig'idagi termoelektrik doimiy magnit maydonidagi o'zgarishlari tadqiq etilgan (4-rasm).



4-rasm. Bi₂Te₃+0,04 Ni massa% qotishma uchun termoelektrik koeffitsiyentining temperaturaga bog'liqligi.

uchun sochilish parametri.

T > 180 K haroratlarda α qiymatlarining tezroq o'sishi kuzatiladi, (1) formuladan ko'rinib turibdiki bu jarayon T = 250 ÷ 260 K gacha davom etadi, bundan so'ng to'yinish sodir bo'ladi va so'ngra α qiymati pasayadi. α ning bu hatti-harakati tadqiq etilayotgan qotishmada Bi₂Te₃ ga xos bo'lgan murakkab valent zonaning mavjudligi bilan talqin etiladi. T < 200 K past haroratlarda

4-rasmdan ko'rinib turibdiki, T < 180 K haroratlarda termoelektrik (α) haroratga proporsional o'zgaradi, bu esa elektron gazning aynigan holatiga mos keladi va quyidagi formula bilan ifodalanadi:

$$\alpha = \frac{2\pi^3 k_0^2 m^* T}{3^3 e \hbar^2 p^3} \left(r + \frac{3}{2} \right) \quad (1)$$

bu yerda k_0 - Bolsman doimiysi, m^* - holatlar zichligining samarali massasi, e - elektron zaryadi, \hbar - Plank doimiysi, p - zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi, $(r + 3/2)$ - akustik sochilish mexanizmi

o'tkazuvchanlik jarayonlarida asosan birinchi zona osti, ya'ni holatlar zichligining samarali massasi kamroq va Xoll harakatchanligi R_x yuqoriroq bo'lgan "yengil" kovaklar zona ostlari ishtirok etadi. Harorat ortishi bilan ba'zi "yengil" kovaklar ikkinchi zona ostiga, holatlar zichligining samarali massasi yuqori va harakatchanligi kichik bo'lgan zonaga o'tadi. Bunda umumiy termoeuyuk quyidagicha aniqlanadi:

$$\alpha_u = \frac{\alpha_1 \sigma_1 - \alpha_2 \sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2} \quad (2)$$

bu yerda $\alpha_1 = \frac{2\pi^{2/3} k_0^2 m^* T}{3^{5/3} e h^2 p^{2/3}} (r + 3/2)$ (3)

$$\alpha_2 = \frac{k_0}{e} \left[r + 5/2 + \ln \frac{2(2\pi m^* K_0 T)^{3/2}}{h^3 p} \right] \quad (4)$$

$$\sigma_1 = 2e \left(\frac{2\pi m_0 k_0 T}{h^2} \right)^{3/2} F_0(\mu^*) U_1 \left(\frac{m_1^*}{m_0} \right)^{3/2} \quad (5)$$

$$\sigma_2 = 2e \left(\frac{2\pi m_0 k_0 T}{h^2} \right)^{3/2} F_0(\mu^* - \Delta\varepsilon) U_2 \left(\frac{m_2^*}{m_0} \right)^{3/2} \quad (6)$$

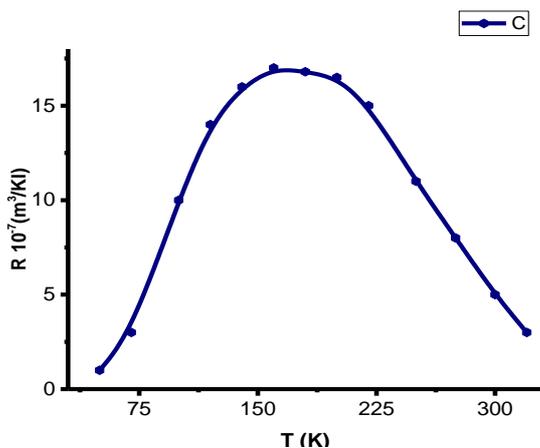
bu yerda $\alpha_1, \alpha_2, \sigma_1, \sigma_2$, mos ravishda birinchi va ikkinchi zona ostilarning termoeuyuk va elektr o'tkazuvchanliklari, μ^* - keltirilgan Fermi sathi, $\Delta\varepsilon$ - energetik tirqish kattaligi, $F_0 = \int_0^\infty x^r \frac{1}{e^{x+1}} dx$.

O'tkazuvchanlik jarayonlarida ikkinchi zona ostining "og'ir" kovaklarining ishtiroki ma'lum haroratlarda birinchi zona osti α zaryad tashuvchilariga nisbatan α_u umumiy temroeyuk qiymatining ortishiga olib keladi. Umumiy termoeuyukning bunday harakati ikkinchi belgining zaryad tashuvchilari, ya'ni elektronlar ishtirok etadigan haroratlarga erishguncha, ya'ni α_u qiymatiga ta'sir qila boshlaguncha davom etadi. Bunda umumiy termoeuyuk quyidagicha aniqlanadi:

$$\alpha_u = \frac{\sum \alpha_p \sigma_p - \alpha_n \sigma_n}{\sum (\sigma_p + \sigma_n)} \quad (7)$$

bu yerda α_n, σ_n mos ravishda o'tkazuvchanlik zonasi termo EYUK va elektronlarning elektr o'tkazuvchanliklari.

O'tkazuvchanlik jarayonida elektronlarning ishtirokining namoyon bo'lishi



5-rasm. $Bi_2Te_3 + 0,04$ massa % Ni qotishma uchun Xoll koeffitsiyentining haroratga bog'liqligi.

temroeyuk ortishining sekinlashishiga, keyin esa to'yinishga va harorat yanada ortishi bilan uning qiymatining pasayishiga olib keladi. Termoeuyuk qiymatining pasayishiga yana tadqiqot haroratsining hususiy o'tkazuvchanlik sohasiga yaqinlashishi ham sezirli ta'sir ko'rsatadi, bu esa temroeyuk qiymatining eksponensial pasayishiga olib keladi.

Shuningdek, zaryad tashuvchilarning Xoll harakatchanligi va Xoll koeffitsiyenti hisoblangan. Tadqiq etilayotgan materialning valent zona

tuzilishining nostandart tuzilishining tabiati Xoll koeffitsiyentining haroratga bog'liqligi bilan ham tasdiqlanadi (5-rasm).

Ma'lum-ki, $Bi_2Te_3, Sb_2Te_3, PbTe$ va x.z. murakkab zona tuzilmasiga ega bo'lgan moddalar uchun (bir xil belgiga ega ikki turdagi zaryad tashuvchilar mavjud bo'lganda) Xoll koeffitsiyenti sferik zonalar tahminida va kovaklarning bir xil sochilish mexanizmidagi quyidagicha aniqlanadi

$$R = \frac{A}{peCo} \frac{p_1\mu_1^2 + p_2\mu_2^2}{p_1\mu_1 + p_2\mu_2} \quad (8)$$

bu yerda A – kovaklarning sochilish mexanizmini aniqlovchi koeffitsiyent, $p_1\mu_1$ va $p_2\mu_2$ mos ravishda zona ostilardagi zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasi va harakatchanligi.

Past haroratda ($T < 100$ K) zona ostilardagi kovaklarning natijaviy konsentratsiyasini $p = p_1 + p_2$ deb hisoblash mumkin, u holda

$$R = R_0 \frac{(1+p_2/p_1)[1+(p_2/p_1)b^2]}{[1+(p_2/p_1)b]^2} \quad (9)$$

bu yerda $R_0 = \frac{A}{peCo} \cong \frac{A}{p_1eCo}$, $b = \frac{\mu_c}{\mu}$.

Yetarli darajadagi ishonch bilan biz "b"ning haroratga kuchsiz bog'liqligini taxmin qilishimiz mumkin va bunda

$$R \approx R_0(p_2/p_1) \quad (10)$$

ikkinchi zona ostida kovaklarning ortishi va birinчисida kamayishi natijasida haroratning ortishi R_x ning ham ortishiga olib keladi.

Zona ostilarning elektr o'tkazuvchanliklari teng bo'lganda σ_1, σ_2 Xoll koeffitsiyenti maksimal qiymatiga yetadi va bunda

$$R_{max} = R_0 \frac{(1+b^I)^2}{4b^I} \quad (11)$$

Maksimal qiymatiga yetgach, R_x kattalik boshqa kinetik koeffitsiyentlar kabi asosan ikkinchi zona osti zaryad tashuvchilari yordamida aniqlanadi va ularning konsentratsiyasining ortishi $R_x = \frac{A}{peC}$ ifodaga mos ravishda R_x qiymatining kamayishiga olib keladi.

Ta'kidlab o'tamiz, murakkab zonali tuzilishga ega bo'lgan yarimo'tkazgichli materiallar uchun maksimal R_x ga erishiladigan haroratda R_x va α_u , parametrlarning kombinatsiyasi bilan ba'zi zona parametrlarini aniqlash mumkin, masalan $\frac{\mu_n}{\mu_p}, \frac{p_n}{p_p}$ va ΔE .

Zaryad tashuvchilarning harakatchanligi uchun ikki zonali valent zona struktura modeli uchun nazariya quyidagi ifodani beradi:

$$\mu = \frac{\mu_1 p_1 + \mu_2 p_2}{p_1 + p_2} \quad (12)$$

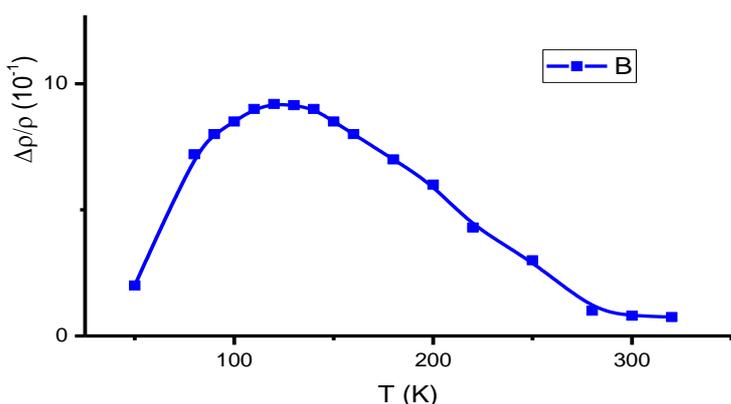
bu yerda μ_1, μ_2 - mos zona ostilardagi kovaklarning harakatchanligi, p_1, p_2 esa - konsentratsiya.

Ma'lumki, umumiy holda, zaryad tashuvchilarning harakatchanligi

$$\mu = \frac{\sqrt{\pi}}{2\Gamma(r+3/2)} \frac{\Gamma(r+3/2)}{\Gamma(3/2)} \mu_0 \quad (13)$$

$$\mu_0 = \frac{2e}{3m^*} \tau_0 (k_0 T)^2 \left(r + \frac{3}{2}\right) \quad (14)$$

bu yerda $\Gamma(s) = \int_0^{\infty} x^{s-1} e^{-x} dx$ - gamma-funksiya.



6-rasm. $Bi_2Te_3 + 0,04$ massa % Ni qotishma uchun magnit maydonidagi solishtirma qarshilikning o'zgarishining haroratga bog'liqligi.

harakatchanlikni to'g'ridan-to'g'ri hisoblash usullaridan biri magnit maydonidagi qarshilikni o'zgartirish ta'siridan foydalanishdir. O'zgarishning haroratga bog'liqligi 6-rasmda keltirilgan. Magnit maydonidagi solishtirma qarshilikning o'zgarishi harakatchanlik, magnit maydoni (kuchlanganlik) va zaryad tashuvchilarning aynigan darajasining funksiyasi hisoblanadi:

$$\rho_{(H)} = \rho_{(0)} \left[1 + \left(\frac{\mu H}{c} \right)^2 A \right] \quad (15)$$

bu yerda

$$A = \frac{(F_{3/2} \mu^*)^2}{F_{2+1}^4} \left[f_{r+1}(\mu^*) f_{3r+1}(\mu^*) - f_{2r+1/2}^2(\mu^*) \right] \quad (16)$$

bu yerda $f(H) = f(0)[i + z + i]$.

Degenerativ bo'lmagan yarimo'tkazgichlar uchun (ikkinchi zona osti uchun)

$$A = b_2 - a_r^2 \quad (17)$$

bu yerda

$$a_r = \frac{3\sqrt{\pi}}{4} - \frac{F_2(r+3/2)}{F^2(r+2)} \quad (18)$$

va

$$b = \frac{9}{16} \pi \frac{F_{(3r+1)}}{F_{(r+2)}^3} \quad (19)$$

Zaryad tashuvchilarning elektron spektrining degeneratsiyasi kuchli yoki kuchsiz bo'lsa (birinchi zona osti va ikkala zona ostilarning ta'siri doirasida)

$$A = \frac{\pi^2}{3} \left(\frac{1}{\mu} \right)^2 \left(r - \frac{1}{2} \right) \quad (20)$$

Agar tadqiq etilayotgan tarkib uchun past harorat sohasida zaryad tashuvchilarning tarqalishi akustik tebranishlarda sodir bo'ladi deb faraz qilsak (18-20) ifodalarda Bi_2Te_3 holatida $r=0$, zaryad tashuvchilarning degenratsiyalanmagan holati uchun $a = \frac{9}{10} \pi$, $b = \frac{\Gamma_* 1}{\Gamma^3 2} - \frac{9\pi^2}{64}$, kuchsiz va nisbatan kuchli degenyerativ holat uchun $A = \frac{\pi^2}{3} \frac{1}{4} \left(\frac{1}{\mu^*} \right)^2$. Birinchi zona osti uchun magnit maydondagi qarshiligini o'lchash

(14) ifodadan ko'rinib turibdi-ki, tok tashuvchilarning harakatchanligi elektron gazining aynigan darajasiga, holatlar zichligining samarali massasiga, sochilish mexanizmiga va haroratga bog'liq. Shuning uchun uni Xoll effekti, elektr o'tkazuvchanligi va termoeyuk o'lchovlari bo'yicha hisoblash $\frac{m_*}{m_0}$, r va x.z. aniqlash qiyinligiga sabab bo'ladi.

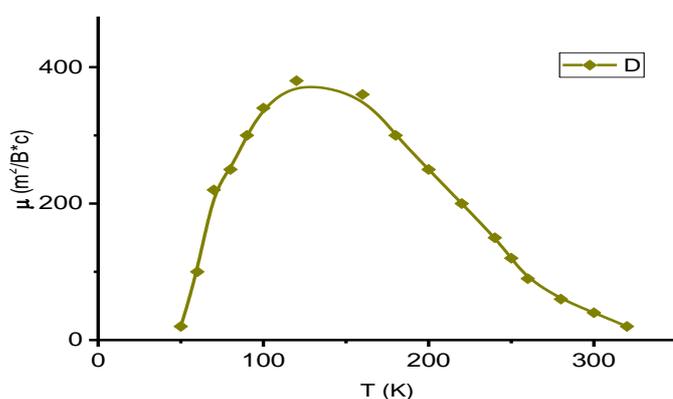
Yuqorida keltirilgan parametrlarni aniqlamasdan turib

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\mu H^2 \pi^2}{c} \frac{1}{12 \mu^{*2}} \quad (21)$$

va ikkinchi zona ostining ustunlik harakati uchun

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\mu H^2}{c} B \quad (22)$$

Shunday qilib, $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ uchun formuladan ko‘rinib turibdiki, qarshilikning o‘zgarishi zaryad tashuvchilarning harakatchanligining haroratga bog‘liqligi bilan aniqlanadi. Valent zonasi tuzilishining ikki zonali modelini hisobga olgan holda, $80 \div 150$ K harorat oralig‘ida $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ ning ortishiga ikkita sabab mavjud. Birinchidan, $T < \theta_D$ harorat oralig‘ida harakatchanlikning ortishi, ikkinchidan, birinchi zonadagi zaryad tashuvchilarning konsentatsiyasining kamayishi va mos ravishda umumiy harakatchanlikning kamayishi. $T > 150$ K harorat oralig‘ida $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ ning kamayishi holatlari zichligining samarali massasining ortishi tufayli ikkinchi zona osti tashuvchilarning harakatchanligining pasayishi, panjaraning akustik tebranishlari bilan tarqalishi tufayli harakatchanlikning pasayishi bilan bog‘liq.



7-rasm. $Bi_2Te_3 + 0,04$ massa % Ni qotishma uchun zaryad tashuvchilarning harorat bog‘liqligi.

$\frac{\Delta\rho}{\rho}$ ning o‘zgarishi Xoll effekti va elektr o‘tkazuvchanligining bir vaqtning o‘zida aniqlashda hisoblangan harakatchanlik ma’lumotlari bilan tasdiqlanadi (7-rasm).

7-rasmdan ko‘rinib turibdiki, haqiqatdan ham $T < 150$ K harorat oralig‘ida $(R_x \cdot \sigma)$ qiymatining ortishi kuzatiladi, $T > 150$ K dan yuqorida esa ular kamayadi. Bi_2Te_3 va uning

asosidagi qattiq qotishmalarning bunday o‘zgarishi $(R_x \cdot \sigma)$ adabiyotlarda r^* sochilish parametrining o‘zgarishi bilan izohlangan.

n va p -tipli termoelektrik materiallarning $Bi - Sb$ va $Pb - Sb$ qotishmalarining ho‘llash va kommutatsiya metallarining tadqiq etish shuni ko‘rsatdiki, evtetik $Pb - Sb$ qotishma eng yaxshisi bo‘lib chiqdi (1-jadval).

Ma’lumki, qo‘rg‘oshin misda eriydi va amalda nikelda erimaydi. Qo‘rg‘oshinning keng harorat oralig‘ida ($-200 \div +250$)°C yuqori eruvchanligi, yarimo‘ktazgichlar va metallarga nisbatan kam kimyoviy faolligi, nisbatan yuqori erish nuqtasi ($+327$ °C), arzonligi va boshqa ba’zi xususiyatlari uni unga asoslangan evtetiklarni yaratish uchun istiqbolli materialga aylantiradi.

Bi, Pb va $Bi - Sb$ evtetik komponentlarining termoelement shohchalari va oqim o‘tkazuvchi shinalar materiallari bilan kimyoviy o‘zaro ta’sirining tabiatini aniqlash uchun quyidagi sxemalar bo‘yicha tajriba namunalari tayyorlandi:

1. $Bi_{0,5}Sb_{1,5}Te_3 + Bi - Sb + Cu$;

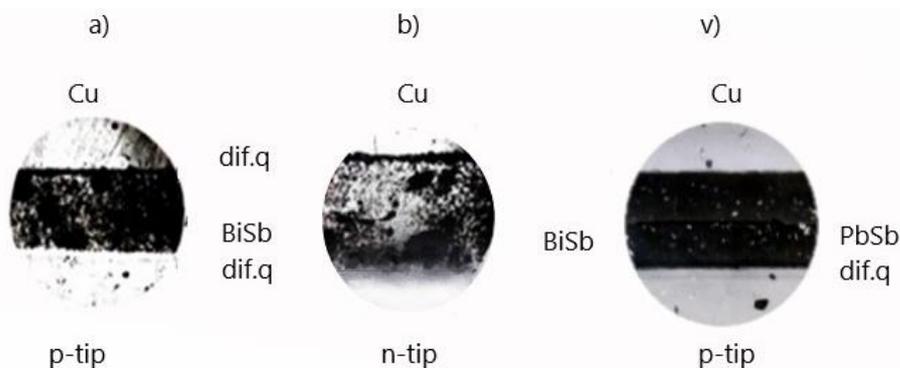
2. $Bi_2Te_{2,88}Se_{0,12} + Bi - Sb + Cu$;
3. $Bi_{0,5}Sb_{1,5}Te_3 + Pb - Sb + Cu$;
4. $Bi_2Te_{2,88}Se_{0,12} + Pb - Sb + Cu$.

1-jadval.

Bi, Pb va Bi – Sb, Pb – Sb evtektivlarning n va p-tipli termoelektrik materiallar hamda kommutatsion materiallar bilan o‘zaro ho‘llash burchaklari.

Asos materiali	Evtetik tarkibi, massa %		ho‘llash burchagi Θ , grad							
	Asosiy metall	Modifikator	280	300	320	350	280	300	320	360
n tip	100 – Pb	-	-	-	-	105	-	-	-	290
	100 – Bi	-	55	53	48	42	572	585	605	630
	96 – Bi	4 – Sb	56	54	40	38	580	585	618	635
	96 – Pb	4 – Sb	45	41	37	33	610	617	625	640
	89 – Pb	11 – Sb	32	29	28	25	715	717	725	732
p tip	100 – Pb	-	-	-	-	95	-	-	-	320
	100 – Bi	-	45	42	38	30	605	618	632	649
	96 – Bi	4 – Sb	43	41	38	32	608	620	643	650
	96 – Pb	4 – Sb	40	38	35	31	615	624	629	642
	89 – Pb	11 – Sb	31	28	25	29	722	743	750	780
Cu	96 – Bi	4 – Sb	38	35	30	30	957	1020	1080	1100
	96 – Pb	4 – Sb	38	32	29	25	950	980	1030	1091
	89 – Pb	11 – Sb	35	26	22	-	955	1010	-	-
Ni	96 – Bi	4 – Sb	37	31	26	25	930	890	1011	1040
	96 – Pb	4 – Sb	36	32	25	22	955	990	1030	1070
	89 – Pb	11 – Sb	29	26	21	17	965	1070	-	-

Metall-pripoy-yarimo‘ktazgich kontaktida diffuziya jarayonlarini faollashtirish uchun namunalar 100, 150, 500, 1000 soat davomida 200 °C haroratda izotermik sharoitda vakuumda toblandi. Tayyorlangan shliflarda mikrostrukturaviy tahlil o‘tkazildi va rentgenospektral tahlil yordamida elementlarning taqsimoti o‘rganildi va ularning zichligi bo‘yicha elektr qarshiligi o‘lchandi.



8-rasm. a) $Bi_{0,5}Sb_{1,5}Te_3 + BiSb + Cu$
b) $Bi_2Te_{2,88}Se_{0,12} + BiSb + Cu$
v) $Bi_{0,5}Sb_{1,5}Te_3 + PbSb + Cu$
(toblanishgacha)
(toblanishgacha)
(toblanish 200 °C, 150 soat)

Ushbu tadqiqot termoelektrik materiallarning mikrostrukturaviy o'zgarishlarni o'rganish uchun muhim bo'lib, o'tish sohasining shakllanishi va diffuziya qatlamlarining rivojlanishi materialning issiqlik va elektr uzatish xususiyatlariga sezilarli ta'sir ko'rsatadi (8 a-rasm). Mis tomonida yoriq kuzatildi, bu mis bilan aloqa qilishda qarshilikning keskin ortishi bilan tasdiqlanadi (8,b-rasm).

Ko'rinadiki $Cu + Bi - Sb$ evtetik, mis va shakllangan fazaning kengayishi ko'effitsiyentlarining farqi tufayli paydo bo'ladigan yangi faza hosil bo'lganda yuzaga keladigan yuqori darajadagi mexanik kuchlanishning natijasidir.

$Pb - Sb$ va $Bi - Sb$ evtetiklarning n - va p - tipli sovutish termoelementlari shohlarining yarimo'ktazgichli materiallar va oqim o'tkazuvchi shinaning metali bilan o'zaro ta'siri namunalarni 10^{-3} mm. simob ustunili vakuumda 150 soat davomida 100, 150, 180, 220 °C haroratda izotermik toblashdan so'ng amalga oshirildi (9-rasm). Kontaktlardagi diffuziya qatlamlarining chuqurligini aniqlash uchun optik mikroskopiya ishlatildi. Har bir haroratdagi diffuziya $D = x^2/2t$ formula yordamida baholandi, bu yerda x - diffuzion qatlam kengligi, t - toblash vaqti.

Turli haroratlarda diffuziya fazalarining o'rtacha qalinliklarini aniqlash va diffuziya ko'effitsiyenti qiymatini hisoblash bo'yicha tajriba natijalari 2-jadvalda keltirilgan.

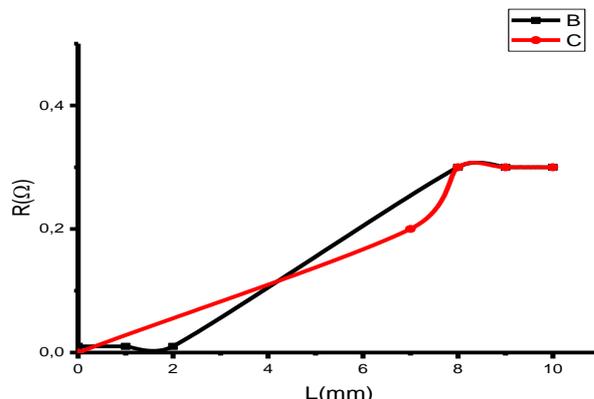
2-jadval.

Diffuziya uzunligi va diffuziya ko'effitsiyenti qiymatlarining haroratga bog'liqligi.

kontakt tarkibi	Toblash harorati, °C							
	100		150		180		220	
	$x, 10^{-6}$, m	$D, 10^{-16}$, m^2/c	$x, 10^{-6}$, m	$D, 10^{-16}$, m^2/c	$x, 10^{-6}$, m	$D, 10^{-16}$, m^2/c	$x, 10^{-6}$, m	$D, 10^{-16}$, m^2/c
$Cu + Pb - Sb$	4	0,15	21	4,1	32	9,48	67	41,6
"p" $Pb - Sb$	-	-	3	0,033	5,3	0,25	8,6	0,68
"n" $Pb - Sb$	-	-	-	-	2,4	0,05	4,1	0,15
$Cu + Bi - Sb$	K.R.	-	K.R.	-	K.R.	-	K.R.	-
"p" $Bi - Sb$	14	1,8	21	4,1	36	12	89	73,3
"n" $Bi - Sb$	22	4,48	43	17	17	20,8	K.R.	-

bu yerda- K.R. - aloqa buzilgan

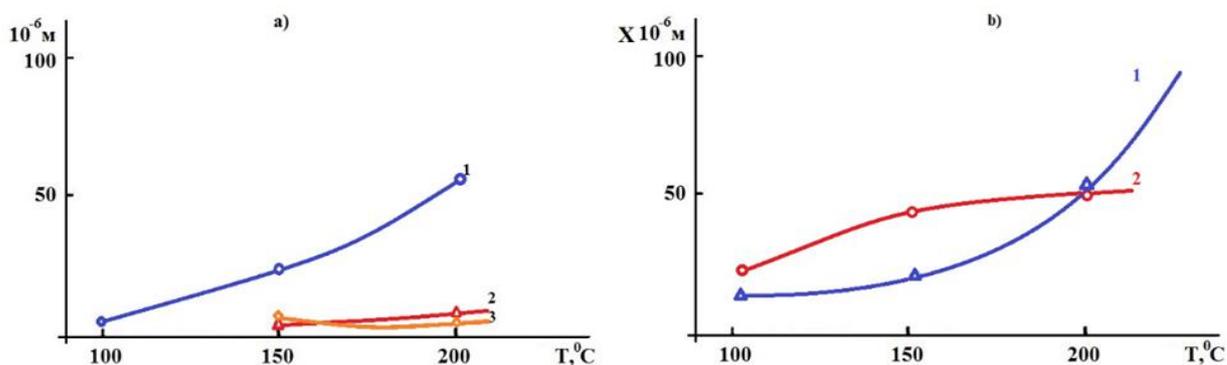
Jadvaldan ko'rinib turibdi-ki, 5 va 6 namunalarda kontaktlarda oraliq qatlamlarning hosil bo'lish tezligi 2 va 3 namunalardagi kontaktlarga qaraganda



9-rasm. $Bi_{0,5}Sb_{1,5}Te_3 + BiSb + Cu$ kontakt zonasidagi elementlarning elektr qarshiligining 150 soat davomida 200 °C da o'zgarishi toblangungacha (B) va toblangandan so'ng (C).

yuqori, bu diffuziya koeffitsiyentlarining qiymatlari bilan tasdiqlanadi, bu yerda birinchi holat ikkinchisiga nisbatan ikki baravar yuqori.

10 a, b-rasmlarda diffuziya chuqurligining haroratga bog‘liqliligi keltirilgan.



10-rasm. Kontaktidagi diffuziya chuqurligining toblash haroratsiga bog‘liqligi.

a) 1- $(Pb - Sb) + Cu$, 2- $(Pb - Sb)$ p –tip, 3- $(Pb - Sb)$ n –tip

b) 1- $(Bi - Sb)$ p –tip, 2- $(Bi - Sb)$ n –tip

Tadqiqot natijalari shuni ko‘rsatdiki, $n - Bi_2Te_{2,88}Se_{0,12}$ kontaktida, Pb-Sb priyoyli $p - Bi_{0,5}Sb_{1,5}Te_3$ kontaktida $Bi - Sb$ priyoyli kontaktidagi diffuziyaga nisbatan o‘zaro diffuziya faollashuv energiyasidan sezilarli darajada yuqori bo‘ladi. Bu shuni ko‘rsatadiki, vismut asosidagi priyoy qo‘rg‘oshinli priyoyga qaraganda termoelektrik materiallarning misga nisbatan sezilarli darajada yuqori reaktivlikka ega. Demak, yuqori haroratlarda ishlaydigan yoki issiqlik bilan ishlov beriladigan vismut va surma xalkogenidlari asosidagi sovituvchi termoelementlar qo‘rg‘oshin asosidagi priyoylar bilan bog‘lanishi kerak.

Dissertatsiyaning “**Kontaktlari yuzasi metallashtirilgan termoelementli va Pb-Sb evtetik qorishmasi kommutatsiyalangan yarimo‘tkazgichli termobataryalarni tayyorlash va sinovdan o‘tkazish**” nomli to‘rtinchi bobida kimyoviy cho‘ktirilgan nikelning diffuziyaga qarshi qatlamidan foydalangan holda $PbSb$ evtetik priyoy bilan kavsharlashning bir yadroli texnologiyasidan foydalanish hamda termobataryalarni ishlab chiqarish va sinovdan o‘tkazish bo‘yicha tadqiqotlar natijalari keltirilgan.

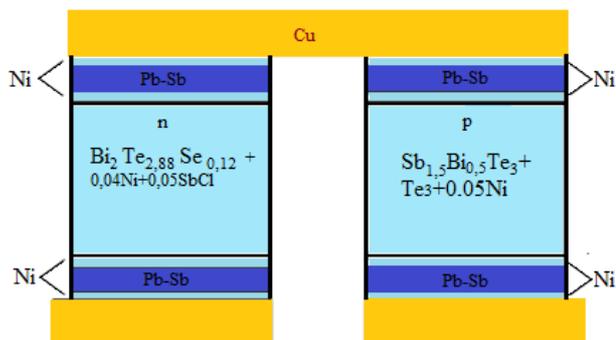
Ishlab chiqilgan termoelektrik materiallarning xususiyatlarini va kommutatsiya texnologiyasini tajribaja sinash uchun 25 va 95 termoelementlardan tashkil topgan termoelektrik modullarning prototip namunalari tayyorlandi. Termoelementlarning shohchalari zonaga yo‘naltirilgan kristallardan $Bi_2Te_{2,88}Se_{0,12} + 0,04$ massa % $Ni + 0,05$ % sifat koeffitsiyenti $2,7 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, $Sb_{1,5}Bi_{0,5}Te_3 + 3$ % $Te + 0,05$ % Ni sifat koeffitsiyenti $3 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

11-rasmda yagona termoelementda elementlarining joylashtirish sxemasi ko‘rsatilgan.

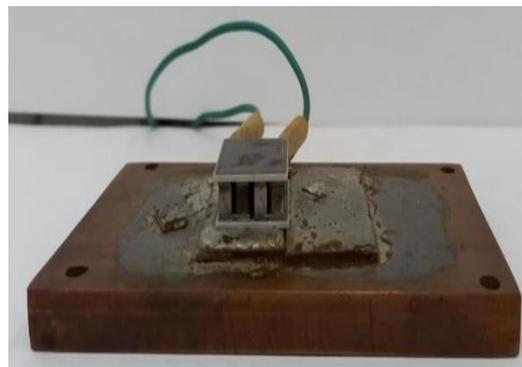
Alohida yarimelementlarda oldindan olingan natijalar sovituvchi TEBlarni tayyorlash va yuqori haroratlarda sinash yo‘li bilan tajriba sinovidan o‘tkazildi. Umumiy ish yuzasi 875 mm^2 bo‘lgan 24 ta termoelementdan tashkil topgan tajriba modulining tashqi ko‘rinishi 12-rasmda keltirilgan.

Maksimal harorat tushishiga erishish uchun termobataryalarning namuna prototiplarining sinovlari qaynoq kavsharlash haroratning 320 dan 495 K gacha

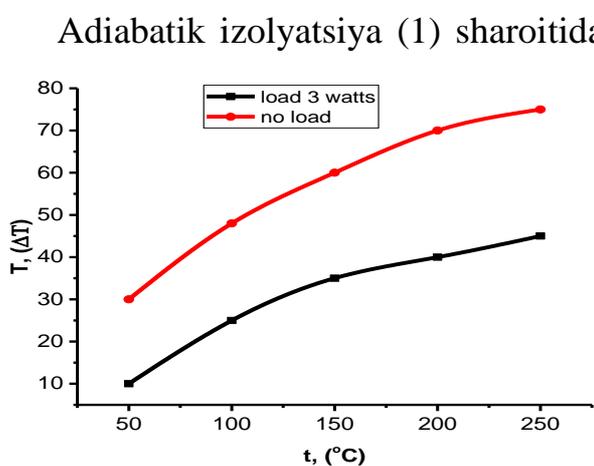
ko‘tarilishi bilan 10^{-3} Pa tartibli vakuumda o‘tkazildi. Sovutish suv oqimi yordamida amalga oshirildi, TEBning sovuq birikmasiga issiqlik yuklamasi elektr isitgichdan keldi.



11-rasm. Yagona termoelementda elementlarining joylashtirish sxemasi.



12-rasm. Tajriba modulining tashqi ko‘rinishi.



13-rasm. harorat farqi (ΔT) ning atrof-muhit harorati (T_s) ga bog‘liqligi. 1–yuklamasiz, 2–3 Vt yuklamada.

va sovuq o‘tish joyida (2) 3 Vt issiqlik yuklamasida ΔT ni o‘lchash natijalari 13-rasmda ko‘rsatilgan. grafikdan ko‘rinib turibdi-ki, sovuq o‘tish joyiga termal yuklama ΔT ning sezilarli pasayishiga olib keladi (40 gacha), TEBning qarshiligi esa 0,48 Om dan 69 Omgacha oshadi. Shu bilan birga, shuni ta’kidlash kerakki, ΔT_{max} ning sezilarli darajada pasayishi va termal yuklama ostida sovuq o‘tishga qarshilikning ortishi nafaqat kontakt qarshiligining ta’siri, balki prototiplarni ishlab chiqarish uchun texnologik jarayonning o‘ziga xos shartlari bilan ham izohlanishi mumkin.

TEBdaagi harorat gradiyenti nol bo‘lganda ($\Delta T=0$) maksimal sovitish samaradorligi Q aniqlandi. T_s qiymati T_{smin} dan $T_s=T_i$ gacha ko‘tarilishi TEBning qarshiligi $R=0,74$ Om ga teng va bir vaqtning o‘zida hisoblangan maksimal sovitish samaradorligi qiymati bu $Q=6,24$ Vt ga teng bo‘ladi.

Tajribada olingan ma’lumotlarning tahlili shuni ko‘rsatdiki, diffuziyaga qarshi nikel qatlamiga ega bo‘lgan evtetik bilan kommutatsiyalangan Pb-Sb optimal qorishmasining TEBdan haroratni nazorat qilish yoki (200÷473) K harorat oralig‘ida turli obyektlarni sovitish uchun samarali foydalanish mumkin.

Termoelementlarning harorat o‘zgarishining maksimal tushishi ΔT_{max} ni o‘lchashda, qoida tariqasida, optimal ish toki I_{opt} va maksimal kuchlanish pasayishi U_{max} da ham o‘lchanadi. Bunda qo‘shimcha o‘lchovlarsiz, termoelementning samaradorligiga ta’sir ko‘rsatuvchi omillardan biri bo‘lgan - kontakt qarshiligi r_k ni aniqlash mumkin.

Tashqi issiqlik yuklamasi bo‘lmaganda maksimal sovitish samaradorligi rejimida termoelementning optimal oqimi quyidagi formula yordamida aniqlanadi:

$$I_{\text{опт}} = \frac{\alpha T_s}{R + 2r_k} \quad (23)$$

bundan

$$r_k = \frac{\alpha T_s - IR}{2I} = \frac{\alpha T_i - \alpha \Delta T - IR}{2I} \quad (24)$$

Элементы оглавления не найдены. Bu yerda shoxachalar va kommutatsiyalovchi plastina orasidagi ikkita kontakt qarshiliklarining ta'siri hisobga olinadi. Termoelement oyoqlarining issiq tomonlarida yana ikkita kontakt qarshiliklarini hisobga olsak, quyidagini yozishimiz mumkin:

$$r_k = \frac{U - I\rho \frac{2l}{S}}{2I} \quad (26)$$

bu yerda U - termoelement shoxchasining omik qarshiligidagi kuchlanish pasayishi, V ; S , l - termoelement oyog'ining ko'ndalang kesimi maydoni va balandligi, sm^2 , sm ; ρ - materialning solishtirma elektr qarshiligi, $\text{Om}\cdot\text{sm}$.

Shunday qilib, (26) termoelementdagi kuchlanish pasayishini o'lchash natijasida, ish oqimining optimal qiymatida I_{opt} va $\Delta T = 0$ ($\Delta T = T_i - T_s$) da, ya'ni $T_i = T_s$ da kontakt qarshiligining qiymatini bilvosita hisoblash imkonini beradi.

Kontaktidagi Pb-Sb evtetik priпой bir vaqtning o'zida dempfer va kommutatsiya qiluvchi priпой vazifasini bajaradi.

Taklif etilayotgan texnologiya termobataryalarni yig'ish jarayonini sezilarli darajada soddalashtiradi, ikkinchisining samaradorligini oshiradi, shuningdek, termoelektr batareyalarni seriyali ishlab chiqarishda juda muhim bo'lgan termoelementga evtetik surtish jarayonini mexanizatsiyalash imkonini beradi.

XULOSA

1. Termoelektrik samaradorlik qiymatlarini mos holda $(2,7 \div 2,9) \cdot 10^{-3}$ 1/K, $(3,0 \div 3,1) \cdot 10^{-3}$ 1/K miqdorida saqlagan holda, siqilishga mustahkamlik darajasi $(2,9 \div 6,1)$ kG/mm² va $(6,1 \div 7,2)$ kG/mm² yuqori bo'lgan $\text{Bi}_2\text{Te}_{2,88}\text{Se}_{0,12}$ va $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$ asosida nikel bilan legirlangan termoelektrik materiallar ishlab chiqilgan.

2. Termoyuk, elektr o'tkazuvchanlik va Xoll koeffitsiyentini tadqiq etish asosida $\text{Bi}_2\text{Te}_3 + 0,04$ massa% Ni qotishmasi vismut telluridining p-tipiga xos bo'lgan zaryad tashuvchilarning energiya spektrini saqlab qolganligi aniqlangan. $80 \div 150$ K harorat oralig'idagi jarayonlarda holatlar zichligi masasasi samaradorligi kichik bo'lgan shunga mos ravishda zaryad tashuvchilarning harakatchanligi yuqori bo'lgan "yengil" kovaklarning zona osti ishtrok etadi. $T > 200$ K haroratlarda esa termoelektrik parametrlarning qiymatiga asosan "og'ir" kovaklar hissa qo'shadi.

3. Tadqiq etilayotgan barcha harorat oralig'ida zaryad tashuvchilarning sochilish mexanizmi o'rnatilgan. "Yengil" va "og'ir" kovaklarning tarqalishi asosan panjaraning akustik tebranishlarida sodir bo'lishi ko'rsatilgan. Termoelektrik parametrlardan zaryad tashuvchilarning sochilish mexanizmini aniqlash bo'yicha tadqiqotlar natijalari magnit maydondagi qarshilikning o'zgarishiga mos keladi.

4. Termoelementlarning kontakt yaqin joylarida diffuziyaga qarshi qatlamlarni hosil qilish uchun katodli purkash orqali sovutuvchi termoelement oyoqlari yuzasiga

yupqa Ni va Mo+Ni metall qoplamalarini qo'llashning optimal texnologik rejimlari ishlab chiqilgan.

5. Kontakt Pb-Sb evtetik bilan kommutatsiya qilinganda, pripoy diffuziyasining faollashuv energiyasi Bi-Sb evtetik qotishmasi bilan kommutatsiya qilishga qaraganda ko'proq (52500 j/mol) bo'lishi o'rnatilgan, bu Pb-Sb evtetik qotishmasi yuqori haroratlarda ishlaydigan termobatareyalarni sovutish va vakuumda ishlaydigan termoo'zgartirgichlar uchun istiqbolli kommutatsiya materiali ekanligi bilan tasdiqlanadi.

6. 525 K erish nuqtasiga ega bo'lgan Pb-Sb tizimning evtetik qotishmasidan vakuumda (200 ÷ 450) K harorat intervalida ishlaydigan termobatareyalarni bir qatlamli kommutatsiyalash uchun evtetik sifatida foydalanish imkoniyati ko'rsatilgan.

7. Past va yuqori haroratlarda ishlaydigan sovutish termoelementlarini almashtirishning samarali usuli sifatida ishlab chiqilgan kommutatsion o'tish

$$p_{tip}Ni + (Pb - Sb) + NiCu$$
$$n_{tip}Ni + (Pb - Sb) + Ni Cu$$

tavsiya etilgan

8. Kontaktlarning o'tish qarshiligini oddiy va qulay usul bilan aniqlash usuli taklif etiladi, u termoelementdagi kuchlanish pasayishini o'lchash asosida, ishning I_{opt} va $\Delta T = 0$ optimal qiymatida bilvosita kontakt qarshiligi qiymatini hisoblashdan iborat.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.03/30.11.2022.FM/Т.66.04
ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ НАМАНГАНСКОМ
ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ**

ФЕРГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

АЗИМОВ ТУЛАНБОЙ МАЪРУФЖОНОВИЧ

**ОСОБЕННОСТИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ BiSb-(Te, Se) В
КОНТАКТЕ С КОММУТАЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ**

01.04.10 – Физика полупроводников

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

Наманган– 2025

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № В2023.1.PhD/FM850.

Диссертация выполнена Ферганском государственном университете.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекском, русском, английском (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (www.nashinil.uz) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziyo.net).

Научный руководитель: **Онаркулов Каримберди Эгамбердиевич**
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Зайнобидинов Сирожиддин Зайнобидинович**
доктор физико-математических наук, профессор
академик АН РУз.

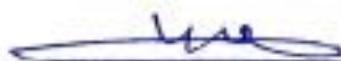
Аюпов Кутуп Саутович
доктор физико-математических наук, профессор

Ведущая организация: **Бухарский государственный университет.**

Защита диссертации состоится «19» 04 2025 года в 10⁰⁰ часов на заседании Научного совета PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 при Наманганском инженерно – технологическом институте по адресу: 160115, г. Наманган, ул. Касансайская 7, Административное здание Наманганского инженерно – технологического института, 3-здания, 2-этаж, малый зал совещаний, Тел./факс: (99869) 225-10-07; (99869) 225-76-75, e-mail: niei_info@edu.uz.

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Наманганского инженерно – технологического института (зарегистрирована за № 374) по адресу: 160115, г. Наманган, ул. Касансайская -7, Тел./факс: (99869) 225-10-07; (99869) 225-76-75.

Автореферат диссертации разослан «03» 04 2025 г.
(протокол рассылки № 22 от «03» 04 2025 г.)



У.Н. Эркабоев
Председатель Научного совета по
присуждению ученых степеней,
д.ф.-м.н., профессор

А.А.Абдукаримов
член секретарь Научного совета
по присуждению ученых степеней
(PhD), доцент

Н.Ю.Шарибаев
Председателем научного семинара при
научном совете по присуждению
ученых степеней д.м.н., профессор



Введение (Аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мире особое внимание уделяется развитию технологий получения термоэлектрических полупроводниковых материалов на основе висмут-сурьма халькогенидов, которые преобразуют тепловую энергию в электрическую и являются перспективными среди возобновляемых источников энергии. В развитых странах значительно возрастает интерес к использованию новейших достижений в данной области для создания и эффективного применения активных полупроводниковых термоэлементов в источниках и детекторах инфракрасного и оптического излучения, а также в термоэлектрических преобразователях энергии. В связи с этим особое внимание уделяется разработке термоэлектрических полупроводниковых материалов на основе Bi-Sb-(Te, Se) , а также оценке эффективности и моделированию термоэлектрических материалов, легированных никелем, с целью повышения их энергетической эффективности.

На сегодняшний день в мире ведутся научные исследования по разработке полупроводников на основе висмута и сурьмы халькогенидов, которые являются перспективными рабочими материалами для низкотемпературных термопреобразователей и охлаждающих термоэлектрических батарей. В этом направлении приоритет отдается изучению свойств полупроводников на основе Bi и Sb халькогенидов, созданию термопреобразователей на их основе и совершенствованию технологии производства полупроводниковых приборов. Вместе с тем, особое внимание уделяется исследованию диффузионных процессов в области коммутационных контактов термоэлектрических материалов на основе BiSb и PbSb , а также анализу возможностей снижения коэффициентов диффузии путем металлизации контактных поверхностей термоэлектрических материалов никелем. Кроме того, важной задачей является определение энергоэффективности термоэлементов, что является актуальной задачей. В нашей республике проводятся широкомасштабные мероприятия по исследованию и внедрению новых технологий, способствующих широкому использованию и повышению эффективности возобновляемых источников энергии.

В стратегии развития Нового Узбекистана на 2022–2026 годы, в частности, определены задачи по обеспечению экономики бесперебойным электроснабжением, активному внедрению технологий "зеленой экономики" во все сферы и увеличению энергоэффективности экономики на 20%. В реализации этих задач особое значение имеет строительство новых и модернизация существующих производственных мощностей на основе возобновляемых источников энергии. Президент Республики Узбекистан в своем Указе № PF-60 от 28 января 2022 года «О стратегии развития Нового Узбекистана на 2022–2026 годы», а также в постановлениях Кабинета Министров № PQ-4422 от 22 августа 2019 года и № PQ-4779 от 10 июля 2020 года определил приоритетные меры по повышению энергоэффективности

экономики, внедрению энергосберегающих технологий и развитию возобновляемых источников энергии¹. Представленное диссертационное исследование в определенной степени способствует реализации задач, предусмотренных указанными нормативно-правовыми актами, направленные на решение этих вопросов, являющиеся востребованными.

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: Фундаментальными и прикладными исследованиями в области создания полупроводниковых термоэлектрических генераторов с высокими рабочими параметрами занимаются ведущие научные центры и университеты всего мира. Например, в институте проблем химической энергии им. Макс Планка и институте материаловедения (Деннис Гроеневельд, Ян Кениг, Юрген Вёлленштайн, Михаэль Пошманн - Германия) ведутся исследование по получению полупроводниковых термоэлектрических материалов n- и p-типа из теллурид висмута и сурьмы и изучение их структуры, в институте технологий Нагоя, национальном институте передовых технологий и промышленных наук (Такуя Фудзимото, Масаси Миками, Хидэтоси Миядзаки, Ёичи Нишино - Япония) диффузия различных атомов в полупроводниковые термоэлектрические материалы, университете Давел Шиддс и Колорадском институте месторождений (Чжэн Цзюй, Сьюзен М. Козларич, Кэйтлин Кроуфорд, Джесси Адамчик, Эрик С. Тоберер - США) изучение термоэлектрических свойств наноструктур $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Sb}_2\text{Te}_3$ гетеропереходах, Шанхайском институте микроструктур и информационных технологий и Центре инженерии материаловедения и оптоэлектроники (Вэйсюн Хуан, Тин Ли, И Цзоу, Чаоцюнь Ци, Гуанце Чжэн, Хаоюй Ван, Минфань Фу, Цюнь Линь, Шученг Ян, Биконг Венг, Цзе Жэнь, Хэюань Ли, Хаоюй Ван, Цзюньруй Лян, Минфань Фу - Китай) синтез материалов на основе Sb-Te и создание элементов электронной памяти внедрением в них редкоземельных элементов, Московском институте стали и сплавов «МИСИС» (Золоторевский Вадим Сергеевич, Белов Николай Александрович, Глазов Михаил Владимирович - Россия) разработка новых материалов и технологий, исследование свойств и применение, Азербейджанском государственном университете нефти и промышленности (Зия С.Алиев, Магомед Б. Бабанлы, Имамаддин Р. Амирасланов, Г.Р. Гурбанов, М.Б. Адыгезалова - Азербайджан), получение и исследование структурных,

¹ Постановление Президента Республики Узбекистан PQ-4779 от 10 июля 2020 года

электрофизических свойств полупроводниковых твердых растворов типа $\text{GeSb}_2\text{Te}_4\text{-SnSb}_2\text{Te}_4$ и др.

Исследования ряд авторов, в том числе узбекских Академики Р.А. Муминов, С.З. Зайнабидинов, А.Т. Мамадолимов (диффузионные процессы в полупроводниках), профессора Г.Абдурахманова (экспериментальное и теоретическое изучение влияния состава и структуры силикатов и лигатур, легированных оксидами переходных металлов, на основные термоэлектрические свойства), С.Х.Шамирзаев, А.В.Каримов и Н.Х.Юлдашев (исследование термо и тензоэлектрических эффектов в прессованных и поликристаллических структурах теллурида висмута и сурьмы), Р.Я. Расулов (теоретический анализ температурной неустойчивости в области контактов на нестационарные процессы охлаждения полупроводниковых термоэлементов), А.М.Касымахунова (изготовление термоэлементов на основе полупроводниковых термоэлектрических материалов и их применение), К.Э. Онаркулов (изучение влияния различных примесей на свойства полупроводниковых термоэлектрических материалов), М.Б. Набиев (создание и применение термоэлектрических генераторов из термоэлектрических элементов), Я.У.Усманов (усовершенствование технологии получения полупроводниковых сплавов) и др., показывают принципиальную возможность получения полупроводниковых сплавов с высокой степенью химической однородности и термоэлектрической эффективности для создания высокоэффективных термоэлектрических генераторов.

Связь темы диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего учебного заведения, где выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнено в рамках научных исследований Ферганского государственного университета, в частности ИТД-12-56 «Изготовление термоэлектрических материалов из полупроводников» в 2012-2014 годы.

Целью исследования является: повышение эффективности термоэлектрических материалов на основе висмута и сурьма содержащих халькогенидов, создание эффективных коммутационных переходов путем изучения процессов диффузии в контактных областях, а также совершенствование технологии получения полупроводниковых термоэлементов.

Задачи исследования: совершенствование технологии получения полупроводниковых термоэлектрических материалов на основе Bi-Sb-(Te, Se) ; оценка термоэлектрической эффективности никелированного термоэлектрического материала на основе его электрофизических свойств; анализ возможностей снижения коэффициентов диффузии за счет металлизации контактирующих поверхностей термоэлектрических материалов никелем;

исследование возможностей создания эффективно работающих термоэлектрических батарей на основе изучения механических и

электрических свойств термоэлектрических материалов, коммутированных с эвтектикой PbSb и легированных примесью Ni.

Объектом исследования выбраны полупроводниковые материалы Bi-Sb-(Te, Se), припой и эвтектик на основе Bi-Sb и Pb-Sb.

Предметом исследования являются термоэлектрические и механические свойства полупроводниковых материалов на основе Bi-Sb-(Te, Se), характер взаимодействия припоев и эвтектик $Bi - Sb, Pb - Sb$ с полупроводниковыми термоэлектрическими материалами и коммутационными шинами и создание на их основе опытных образцов термобатарей.

Методы исследования. В процессах исследования использованы метод получения полупроводниковых материалов на основе Bi-Sb-(Se,Te), комплекс для измерения их термоэлектрических параметров, при измерении удельного сопротивления четырехзондный метод и стандартные приборы измерения.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

впервые усовершенствована технология создания термоэлектрических материалов с новыми электрофизическими свойствами путем легирования полупроводниковых термоэлектрических материалов на основе Bi-Sb-(Te, Se) никелем;

разработана модель, определяющая снижение диффузионных процессов в коммутационных контактах термоэлектрических материалов с использованием эвтектики BiSb и PbSb, а также припоя, что способствует повышению эффективности;

выявлено, что снижение коэффициентов диффузии термоэлектрических материалов и металлизация контактных поверхностей приводят к повышению их электрофизической эффективности;

усовершенствована технология производства новых термоэлектрических батарей с высокой эффективностью за счет уменьшения диффузионных процессов в коммутационных контактах и металлизации контактных поверхностей;

Практические результаты исследования заключается в следующем: определены возможности снижения удельных затрат полупроводниковых материалов и уменьшения процентов брака при изготовлении миниатюрных полупроводниковых термопреобразователей;

указаны возможности проведения коммутационных переходов посредством эвтектического материала PbSb в низкотемпературных термопреобразователях.

Достоверность результатов исследований обеспечивается применением, высокоточных приборов и оборудования, современных научных и апробированных методов исследования, стандартных, апробированных комплексных методик измерения и обработки данных, а также соответствием полученных данных современным понятиям физики и

техники полупроводников и соответствием экспериментальных результатов с теоритическими предпосылками.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов работы заключается в установлении особенностей термоэлектрических и механических свойств полупроводниковых материалов $\text{Bi}_2\text{Te}_{2,88}\text{Se}_{0,12}$ и $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$, легированных никелем, механизм рассеяния носителей заряда в интервале температур 77-300 К для образцов $p\text{-Bi}_2\text{Te}_3+\text{Ni}$, характер взаимодействия припоев и эвтектик Bi-Sb , Pb-Sb с термоэлектрическими материалами и коммутационными шинами.

Практическая значимость результатов исследований заключается в том, что использование разработанного материала при изготовлении миниатюрных полупроводниковых термопреобразователей и при их дальнейшем эксплуатации в различных режимах, позволит значительно уменьшить процент брака и, следовательно, снижение удельных затрат полупроводниковых материалов, проведение коммутационных переходов посредством эвтектического сплава PbSb с антидиффузионным покрытием из химически осажденного никеля могут быть использованы так в охлаждающих устройствах, так и в низкотемпературных термопреобразователях, работающих при 423 К. При этом в приконтактной области термоэлементов исключается химическое взаимодействие, обеспечивается механически прочный контакт с малыми тепловыми и электрическими потерями.

Внедрение результатов исследования. На основе научно-практических результатов по исследованию особенностей физико-химического взаимодействия полупроводниковых термоэлектрических сплавов на основе $\text{BiSb}-(\text{Te}, \text{Se})$ в контакте с коммутационными материалами:

Показано, что при введении примесей в открытую тигельную основу $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Sb}_2\text{Te}_3$ обеспечивается стабильность термоэлектрических свойств, что позволяет повторно воспроизводить термоэлектрические характеристики полупроводниковых материалов. (Патент Агентства интеллектуальной собственности Республики Узбекистан № IAP 05968 от 6 августа 2019 года). В результате повышается стабильность материала и экономическая энергоэффективность;

получение полупроводниковых термоэлектрических материалов на основе $\text{Bi}_2\text{Te}_{2,88}\text{Se}_{0,12}$ и $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$ легированные никелем с повышенным пределом прочности при сохранении значения термоэлектрической эффективности; влияние никеля на энергетический спектр и механизм рассеяния носителей заряда сплава; возможности использования сплава эвтектики PbSb в качестве припоя для осуществления однослойной коммутации термобатарей; нанесение никеля химическим путем на контактируемые поверхности обеспечивающий надежную смешиваемость припоями BiSb и PbSb ; определение коэффициенты диффузии и энергия активации припоев эвтектики PbSb и BiSb в контакте с термоэлектрическими материалами использованы в научном проекте OT-F-68 выполненный. (справка Андижанского государственного университета № 04-

2791 от 11.12.2024), что способствовало получение примесью-дефектных кристаллов с однородной структурой.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертации были представлены и обсуждены на 9 международных и 6 республиканских научных конференциях.

Публикации результатов исследований. По теме диссертации всего опубликованы 26 научных работ, из них 6 в научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных работ, в том числе 2 статьи опубликованы на зарубежных международных конференциях Scopus, получена патент на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Объем диссертационной работы, включая 34 рисунков и 11 таблицы составляет 110 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность и перспективность темы диссертации, соответствие проведенных научных исследований приоритетным направлениям развития науки и технологии в Республике Узбекистан, проведен обзор научных исследований по теме за рубежом и в Узбекистане, раскрыта степень изученности проблемы, сформулированы цели и задачи, приведены объекты, предметы и методы исследования, изложена научная новизна и практическая значимость исследования, приведены краткие сведения о внедрении результатов, апробации и публикации работы, а также об объеме и структуре диссертации.

В первой главе диссертационной работы под названием **«Полупроводниковые свойства материалов на основе Bi-Sb-(Te, Se), методы их коммутации и коммутационные материалы»** приведен обзор литературы по теме диссертации. Термоэлектрические охладители имеют множество преимуществ по сравнению с обычными системами охлаждения. Термоэлектрические устройства также могут использоваться в качестве важного источника выработки электроэнергии, где отработанное тепло может быть преобразовано в полезную электрическую энергию. Несмотря на эти особенности и широкий спектр применения, использование термоэлектрических устройств было ограничено. Основная причина непризнания заключается в том, что мы до сих пор не можем получить эффективность и удельную мощность охлаждения, необходимые для электроники нынешнего поколения.

Среди полупроводниковых материалов лучшими термоэлектрическими свойствами в интервале $200 \div 600$ К обладают соединения Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 и твердые растворы на их основе.

Среди материалов *n*- типа наиболее высокой эффективностью обладают сплавы на основе твердых растворов $Bi_2Te_3 - Bi_2Se_3$ содержащие Bi_2Se_3 в количестве 4÷10 мол %, легированные галогенидами. Максимальная термоэлектрическая эффективность у этих материалов достигается при комнатной температуре и составляет $(2,9 \div 3,0) 10^{-3} 1/K$.

На основе анализа литературных данных выбраны направления исследований в области разработки новых коммутационных материалов и вариантов коммутации для охлаждающих термоэлементов на основе халькогенидов висмута и сурьмы.

Во второй главе «Технология получения экспериментальных образцов и методы их исследования» изложены методы и установки для получения термоэлектрических материалов на основе халькогенидов висмута и сурьмы, коммутационных припоев, изготовление экспериментальных образцов и измерения основных параметров. Для исследования влияния добавления *Ni* на прочностные свойства материалов *n* – и *p* – типа были приготовлены экспериментальные образцы. Материал *n* – типа имел состав $Bi_2Te_{2,88}Se_{0,12}$. В качестве легирующей добавки использовались *Ni* (0,01 ÷ 0,06) вес% и $SbCl_3$ (0,04 ÷ 0,07) вес %. Термоэлектрический материал *p* – типа имел состав $Sb_{1,5}Bi_{0,5}Te_3 + 3$ вес % *Te*, примесью *Ni* (0,01 ÷ 0,06) вес%.

Экспериментальные образцы для изучения процессов, протекающих в приконтактных областях, готовились методом пайки. Полупроводниковые материалы нарезались на цилиндры высотой 7 мм из слитков 6 ÷ 7 мм на станке электроискровой резки. Медные шины также имели форму цилиндра диаметром 6 ÷ 7 мм и высотой 3 мм.

Исследование температурной зависимости электропроводности, термоэдс и теплопроводности термоэлектрических материалов на основе твердых растворов $Bi_2Te_3 - Bi_2Se_3$ и $Sb_2Te_3 - Bi_2Te_3$ использовалась установка, принципиальная схема которой приведена на рис 1.

На основании замера разности потенциалов, возникающей между штифтами при создании на образце градиента температуры одним нагревателем, проводился расчет коэффициента термоэдс по $\alpha = \frac{E}{\Delta T_4}$, где $\Delta T_4 = T_4 - T_5$ разность температур между штифтами, а *E*- эдс между ними.

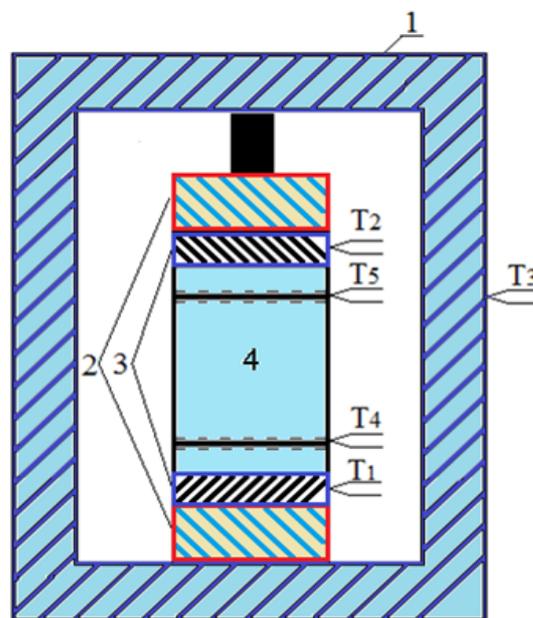


Рис. 1. Принципиальная схема установки для измерения α, σ, χ в интервале температур 300 ÷ 900 К. 1 – выравнивающий экран; 2 – стеатитовые прокладки; 3 – нижняя и верхняя печи; 4 – исследуемый образец; T_1, T_2, T_3, T_4, T_5 – термопары и штифты.

При пропускании через образец электрического тока по падению напряжения между штифтами рассчитывалась электропроводность по формуле $\sigma = \frac{I \cdot e}{U \cdot s}$.

Существующие универсальные испытательные машины на растяжение обычно используют образцы с утолщенными краями определенного профиля и размеров. Так как соединения типа Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 очень хрупкие и резка образцов осуществляется электроискровым способом, изготовление образцов сложной конфигурации является практически невозможным. В связи с этим разработана и изготовлена установка, позволяющую проводить испытания на сжатие и на растяжение образцов прямоугольного сечения.

В третьей главе диссертации, под названием «Исследование термоэлектрических свойств полупроводниковых материалов и физико-химическое взаимодействие в контакте с коммутационными материалами» изучена термоэлектрические, механические и гальваномагнитные свойства термоэлементов на основе твердых растворов $Bi_2Te_{2,88}Se_{0,12}$ и $Bi_{0,5}Sb_{1,5}Te_3$ легированных медью и никелем, характеристики коммутационных материалов, диффузионных процессов, проходящих в приконтактной области и возможности коммутации термоэлементов.

При легировании твердых растворов $Bi_2Te_{2,88}Se_{0,12}$ и $Sb_{1,5}Bi_{0,5}Te_3$ никелем было установлено, что последний в них оказывает упрочняющее действие, но в отличие от меди является акцепторным. Увеличение содержания только Ni , без соответствующего увеличение количества вводимой компенсирующей донорной примеси, приводят к еще большему упрочнению сплава, однако при этом термоэдс резко уменьшается (рис.2).

Максимальный коэффициент термоэдс материала получается при введении 0,05 вес%. С увеличением содержания Ni , наряду с ростом механической прочности, наблюдается снижение термоэдс материала. При этом у образцов со значением термоэдс $170 \div 180 \cdot 10^{-6}$ предел механической прочности при сжатии (δ) изменяется от 3,4 до 4,2 кГ/мм², что соответственно 1,5 ÷ 2 раза выше δ $Bi_2Te_{2,88}Se_{0,12}$.

На рис. 3(а) приведена температурная зависимость σ , α , χ и Z и твердого раствора $Sb_{1,5}Bi_{0,5}Te_3 + 3$ вес % Te , легированного 0,05 вес% Ni , а на рис.3(б) температурная зависимость этих же параметров твердого раствора $Sb_{1,5}Bi_{0,5}Te_3 + 3$ вес % Te , не легированного никелем. Из рисунков видно, что существенного изменения термоэлектрических свойств материала р - типа при легировании никелем не происходит.

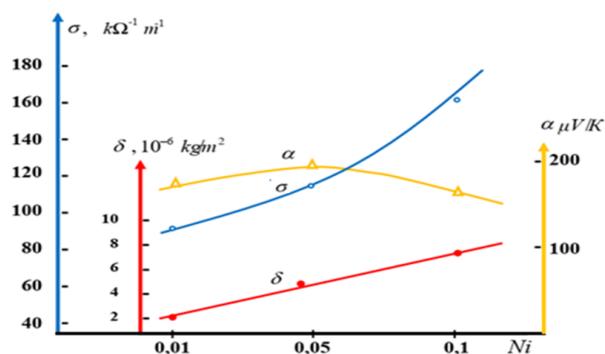


Рис 2. Зависимости коэффициента термоэдс, электропроводности и предела прочности при сжатии материала $Bi_2Te_{2,88}Se_{0,12}$ от примеси Ni . (○ – σ , Δ – α , ● – $\sigma_{сж}$).

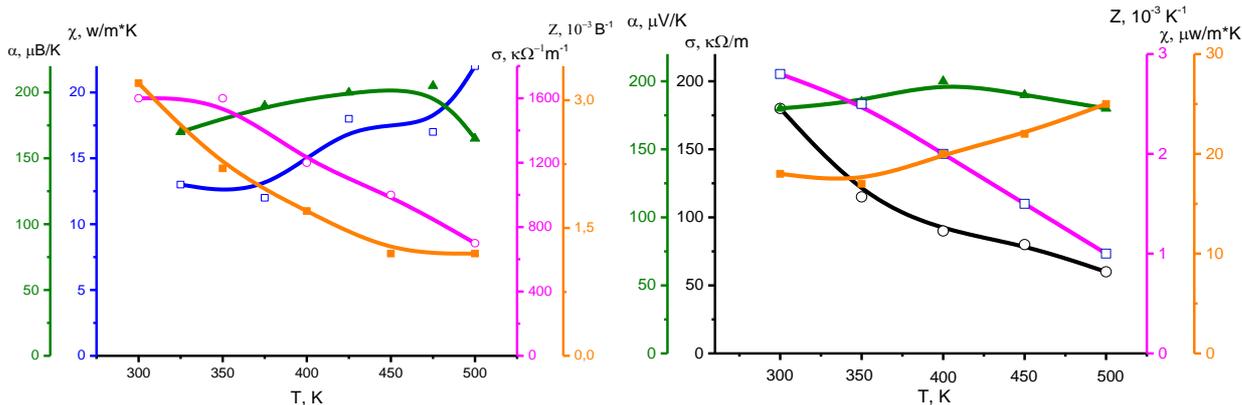


Рис. 3. Температурные зависимости ($\circ - \sigma$, $\Delta - \alpha$, $\square - \chi$, $\blacksquare - Z$) твердого раствора состава $Sb_{1,5}Bi_{0,5}Te_3 + 3 \text{ вес\% Te, } 0,05 \text{ вес\% Ni}$ (а), состава $Sb_{1,5}Bi_{0,5}Te_3 + 3 \text{ вес\% Te}$ (б).

С целью выявления механизмов рассеяния носителей заряда и качественного установления модели зонной структуры сплава $Bi_2Te_3 + 0,04 \text{ вес\% Ni}$ были исследованы термоэдс, электропроводность в интервале температур $77 \div 300 \text{ K}$ и их изменения в постоянном магнитном поле в той же интервале температур.

Как видно из рис.4 при температурах $T < 180 \text{ K}$ термоэдс (α) изменяется пропорционально температуре, что соответствует вырожденному состоянию электронного газа и описывается формулой

$$\alpha = \frac{2\pi^3 k_0^2 m^* T}{3^3 e \hbar^2 p^3} \left(r + \frac{3}{2} \right) \quad (1)$$

где k_0 - постоянная Больцмана, m^* - эффективная масса плотности состояний, e - заряд электрона, \hbar - постоянная Планка, p - концентрации носителей заряда, $(r + 3/2)$ - параметр рассеяния для акустического механизма рассеяния.

При температурах $T > 180 \text{ K}$ наблюдается более быстрый рост значений

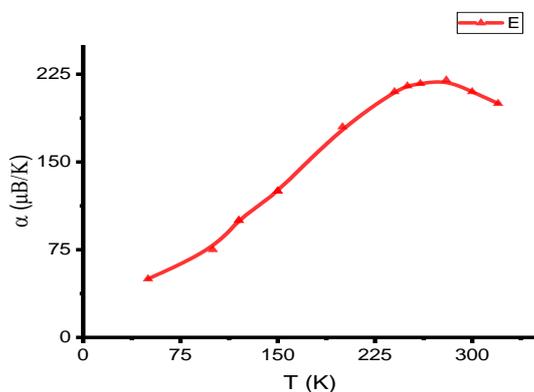


Рис.4. Зависимость коэффициента термоэдс от температуры для сплава $Bi_2Te_3 + 0,04 \text{ Ni}$ вес %

α , что следует из формулы (1), продолжающийся до величин $T = 250 \div 260 \text{ K}$, по достижении которых наступает насыщение и затем уменьшение α . Такое поведение α нами интерпретируется наличием сложной валентной зоны, характерной для Bi_2Te_3 и на исследуемом сплаве. При низких температурах $T < 200 \text{ K}$ в процессах проводимости участвует преимущественно первая подзона, т.е. подзона “легких” дырок с меньшей эффективной массой плотности состояний и с большей холловской подвижностью R_x . С увеличением

температуры часть "легких" дырок переходит во вторую подзону, в подзону тяжелых дырок с большей эффективной массой плотности состояний и меньшей подвижностью с невырожденным состоянием носителей. Общая термоэдс при этом определяется как:

$$\alpha_{\text{общ}} = \frac{\alpha_1 \sigma_1 + \alpha_2 \sigma_2}{\alpha_1 + \sigma_2} \quad (2)$$

где
$$\alpha_1 = \frac{2\pi^{2/3} K_0^2 m^* T}{3^{5/3} e \hbar^2 p^{2/3}} \left(r + \frac{3}{2} \right) \quad (3)$$

$$\alpha_2 = \frac{K_0}{e} \left[r + \frac{5}{2} + \ln \frac{2(2\pi m^* K_0 T)^{3/2}}{\hbar^3 p} \right] \quad (4)$$

$$\sigma_1 = 2e \left(\frac{2\pi m_0 K_0 T}{\hbar^2} \right)^{3/2} F_0(\mu^*) U_1 \left(\frac{m_1^*}{m_0} \right)^{3/2} \quad (5)$$

$$\sigma_2 = 2e \left(\frac{2\pi m_0 K_0 T}{\hbar^2} \right)^{3/2} F_0(\mu^* - \Delta\varepsilon) U_2 \left(\frac{m_2^*}{m_0} \right)^{3/2} \quad (6)$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \sigma_1, \sigma_2$, термоэдс и электропроводности первой и второй подзоны соответственно, μ^* - приведенный уровень Ферми, $\Delta\varepsilon$ - величина энергетического зазора, $F_0 = \int_0^\infty x \frac{1}{e^{x+1}} dx$.

Участие "тяжелых" дырок второй подзоны в процессах проводимости приводит к росту значений общей термоэдс $\alpha_{\text{общ}}$, относительно α носителей заряда первой подзоны при определенных температурах. Такое поведение общей термоэдс продолжается до достижения температур, при которых участие носителей заряда второго знака, т.е. электронов начинает сказываться на величине $\alpha_{\text{общ}}$. В этом случае общая термоэдс определяется как

$$\alpha_{\text{общ}} = \frac{\sum \alpha \sigma_p - \alpha_n \sigma_n}{\sum (\sigma_p + \sigma_n)} \quad (7)$$

где α_n, σ_n соответственно термоэдс и электропроводность электронов зоны проводимости.

Проявление участия электронов в процессе проводимости приводит к замедлению роста термоэдс, затем насыщению и падению ее значений с дальнейшим ростом температуры. На снижение значений термоэдс

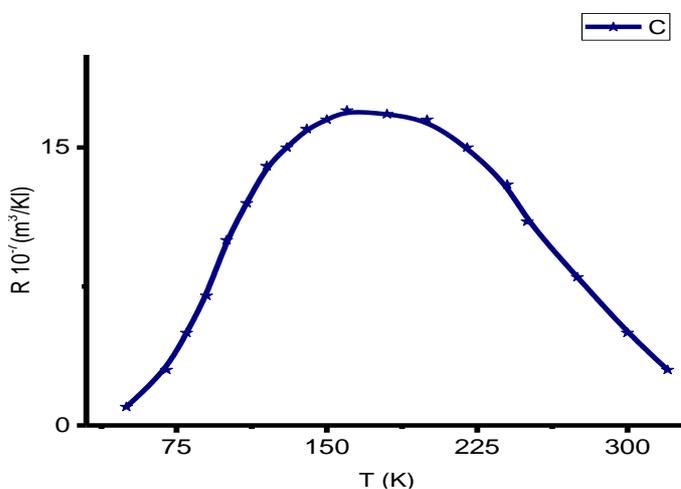


Рис.5. Зависимость коэффициента Холла от температуры для сплава $Bi_2Te_3 + 0,04$ вес % Ni .

значительное влияние может оказывать также и приближение температуры исследований к области собственной проводимости, что вызывает экспоненциальное падение величины термоэдс.

Также, вычислены холловская подвижность носителей заряда и коэффициент Холла. Характер нестандартного строения валентной зоны для исследуемого материала

подтверждается также зависимостью коэффициента Холла от температуры (рис.5).

Как известно для веществ со сложной зонной структурой, таких как Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3 , $PbTe$ и т.д. (наличие носителей заряда двух сортов одного знака) коэффициент Холла определяется в предположении сферических зон и одинакового механизма рассеяния дырок как

$$R = \frac{A}{peC_0} \frac{p_1\mu_1^2 + p_2\mu_2^2}{p_1\mu_1 + p_2\mu_2} \quad (8)$$

где A – коэффициент определяющий механизм рассеяния дырок, $p_1\mu_1$ и $p_2\mu_2$ соответственно концентрация и подвижность носителей в подзонах.

В области низких температур ($T < 100$ К) можно считать, что суммарная концентрация дырок в подзонах $p = p_1 + p_2$ и тогда

$$R = R_0 \frac{(1+p_2/p_1)[1+(p_2/p_1)b^2]}{[1+(p_2/p_1)b]^2} \quad (9)$$

$$\text{где } R_0 = \frac{A}{p_2eC_0} \cong \frac{A}{p_1eC_0}, \quad b = \frac{\mu_c}{\mu}.$$

С достаточной степенью достоверности можно предположить о незначительной зависимости “ b ” от температуры и тогда

$$R \approx R_0(p_1/p_2) \quad (10)$$

что приводит к росту R_x с повышением температуры, вследствие увеличения дырок во второй подзоне и уменьшения в первой.

Максимальные значения коэффициента Холла достигаются при равенстве значений электропроводностей σ_1, σ_2 подзон и при этом

$$R_{max} = R_0 \frac{(1+b^I)^2}{4b^I} \quad (11)$$

После достижения максимального значения, величина R_x , определяется как и остальные кинетические коэффициенты, преимущественно носителями второй подзоны и увеличение их концентрации приводит к снижению значений R_x согласно выражению $R_x = \frac{A}{peC}$.

Отметим, что для полупроводниковых материалов со сложной зонной структурой при температуре, в которой достигается максимум R_x , комбинацией параметров R_x и $\alpha_{общ}$, можно определить некоторые зонные параметры, такие как $\frac{\mu_l}{\mu_t}$, $\frac{p_l}{p_t}$ и ΔE .

Теория для двухзонной модели строения валентной зоны для подвижности носителей заряда дает следующее выражение:

$$\mu = \frac{\mu_1 p_1 + \mu_2 p_2}{p} \quad (12)$$

где μ_1, μ_2 - подвижности дырок в соответствующих подзонах, а p_1, p_2 - концентрация.

Как известно, в общем случае подвижность носителей заряда

$$\mu = \frac{\sqrt{\pi}}{\Gamma(r+3/2)} \frac{F_2+1/2(\mu^*)}{F_2+1/2(\mu^*)} \mu_0. \quad (13)$$

$$\mu_0 = \frac{2e}{3m^*} \tau_0 (k_0 T)^2 \left(r + \frac{3}{2}\right) \frac{\Gamma(r+3/2)}{\Gamma(3/2)} \quad (14)$$

где $\Gamma = \int_0^{\infty} x^{s-1} e^{-x} dx$ - гамма-функция.

Из выражения (14) видно, что подвижность носителей тока зависит от степени вырождения электронного газа, эффективной массы плотности состояний, механизма рассеяния и температуры. Поэтому ее расчет из измерений эффекта Холла, электропроводности и термоэдс затруднен в связи с трудностью определения $\frac{m^*}{m_0}$, r и т.п.

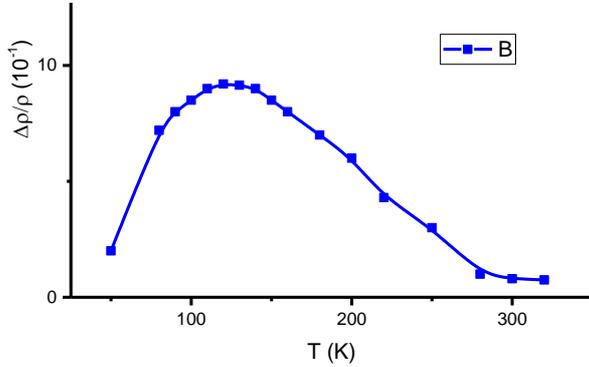


Рис.6. Зависимость изменения удельного сопротивления в магнитном поле от температуры для сплава $Bi_2Te_3 + 0,04$ вес % Ni

Одним из способов непосредственного вычисления подвижности, без определения вышеперечисленных параметров, является использование эффекта изменения сопротивления в магнитном поле. Температурная зависимость изменения приведен на рис. 6. Изменение удельного сопротивления в магнитном поле является функцией подвижности, напряженности (индукции) магнитного поля и степени вырождения носителей заряда;

$$\rho(H) = \rho(0) \left[1 + \left(\frac{\mu H}{c} \right)^2 A \right] \quad (15)$$

$$\text{где } A = \frac{(F_{3/2} \mu^*)^2}{F_{2+1}^4} \left[f_{r+1}(\mu^*) f_{3r+1}(\mu^*) - f_{2r+1/2}^2(\mu^*) \right] \quad (16)$$

здесь $f(H) = f(0)[i + z + i]$. Для невырожденных полупроводников (для второй подзоны)

$$A = b_2 - a_2^r \quad (17)$$

$$\text{где } a_r = \frac{3\sqrt{\pi}}{4} - \frac{F_{2r+3/2}}{F^2(r+2)} \quad (18)$$

$$\text{и } b = \frac{9}{16} \pi \frac{F_{(3r+1)}}{F_{(r+2)}^3} \quad (19)$$

В случае сильного или слабого вырождения электронного спектра носителей (для первой подзоны и в области действия обеих подзон)

$$A = \frac{\pi^2}{3} \left(\frac{1}{\mu^*} \right)^2 \left(r - \frac{1}{2} \right) \quad (20)$$

Если принять, что для исследуемого состава рассеяние носителей заряда в области низких температур происходит на акустических колебаниях, (в случае Bi_2Te_3 в выражениях (18-20) $r=0$), для невырожденного состояния носителей заряда $a = \frac{9}{10} \pi$, $b = \frac{\Gamma_1}{\Gamma^2} - \frac{9\pi^2}{64}$, для слабо и относительно сильно вырожденного состояния $A = \pi^2 / 3 \frac{1}{4} \left(\frac{1}{\mu^*} \right)^2$. Измерение удельного сопротивления в магнитном поле для области действия первой подзоны

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\mu H^2 \pi^2}{c} \frac{1}{12 \mu^{*2}} \quad (21)$$

и для преимущественного действия второй подзоны

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\mu H^2}{c} b \quad (22)$$

Таким образом, как видно из формул для $\frac{\Delta\rho}{\rho}$, изменение сопротивления определяется температурной зависимостью подвижности носителей заряда. С учетом двухзонной модели строения валентной зоны, рост $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ в области температур $80 \div 150$ К вызывается двумя причинами. Во-первых, увеличением подвижности в области температур $T < \theta_D$, во-вторых, уменьшением концентрации носителей первой зоны и соответствующим уменьшением общей подвижности.

В области температур $T > 150$ К уменьшение значений $\frac{\Delta\rho}{\rho}$, вызвано уменьшением подвижности носителей заряда второй подзоны вследствие увеличения эффективной массы плотности состояний, падением подвижности в силу рассеяния на акустических колебаниях решетки.

Изменение $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ подтверждаются данными по определению подвижности, рассчитанной из одновременного определения по эффекту Холла и электропроводности (рис.7). Из рис.7 видно, что действительно в области температур $T < 150$ К наблюдается рост значений $(R_H \cdot \sigma)$, а выше $T > 150$ К их падение. Такое поведение $(R_H \cdot \sigma)$ для Bi_2Te_3 и твердых растворов на его основе объясняется в литературе изменением параметра рассеяния r^* .

Исследование смачивания и работы адгезии сплавов $BiSb$ и $PbSb$ термоэлектрических материалов n и p -типа и коммутационных металлов показали, что лучшим оказался эвтектический сплав $Pb - Sb$ (табл.2.).

Известно, что свинец растворяется в меди и практически не растворяется в никеле. Высокая пластичность свинца в широком интервале температур ($-200 \div +250$)°С, малая химическая активность к полупроводникам и металлам, относительно высокая температура плавления ($+327$ °С), низкая стоимость и некоторые другие характеристики делают перспективным материалом для создания на его основе припоев.

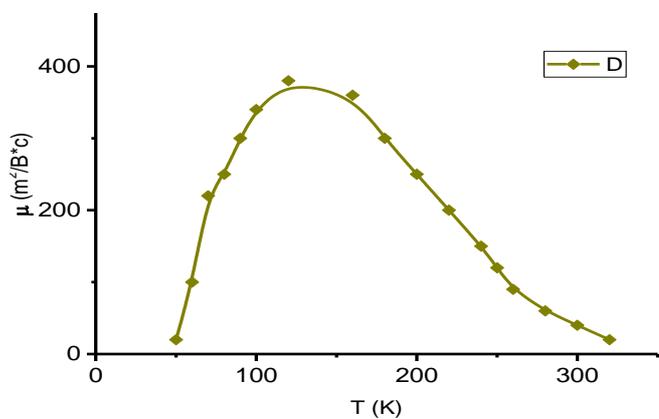


Рис.7. Температурная зависимость подвижности носителей заряда для сплава $Bi_2Te_3 + 0,04$ вес % Ni .

Таблица 2.

Кравые углы смачивания и работы адгезии Bi , Pb и сплавов $Bi - Sb$, $Pb - Sb$ на термоэлектрических материалах n - и p - типов, а также с коммутационными материалами.

Материал подложки	Состав припоя, вес %		Краевой угол смачивания Θ , град							
	Основной металл	Модификатор	280	300	320	350	280	300	320	380
n тип	100- Pb	-	-	-	-	105	-	-	-	290
	100- Bi	-	55	53	48	42	572	585	605	630
	96- Bi	4- Sb	56	54	40	38	580	585	618	635
	96- Pb	4- Sb	45	41	37	33	610	617	625	640
	89- Pb	11- Sb	32	29	28	25	715	717	725	732
p тип	100- Pb	-	-	-	-	95	-	-	-	320
	100- Bi	-	45	42	38	30	605	618	632	649
	96- Bi	4- Sb	43	41	38	32	608	620	643	650
	96- Pb	4- Sb	40	38	35	31	615	624	629	642
	89- Pb	11- Sb	31	28	25	29	722	743	750	780
Cu	96- Bi	4- Sb	38	35	30	30	957	1020	1080	1100
	96- Pb	4- Sb	38	32	29	25	950	980	1030	1091
	89- Pb	11- Sb	35	26	22	-	955	1010	-	-
Ni	96- Bi	4- Sb	37	31	26	25	930	890	1011	1040
	96- Pb	4- Sb	36	32	25	22	955	990	1030	1070
	89- Pb	11- Sb	29	26	21	17	965	1070	-	-

С целью выяснения характера химического взаимодействия компонентов припоя $Bi - Sb$ и $Pb - Sb$ с материалами ветвей термоэлемента и токоведущих шин были изготовлены экспериментальные образцы по следующим схемам:

1. $Bi_{0,5}Sb_{1,5}Te_3 + Bi - Sb + Cu$;
2. $Bi_2Te_{2,88}Se_{0,12} + Bi - Sb + Cu$;
3. $Bi_{0,5}Sb_{1,5}Te_3Pb - Sb + Cu$;
4. $Bi_2Te_{2,88}Se_{0,12} + Pb - Sb + Cu$.

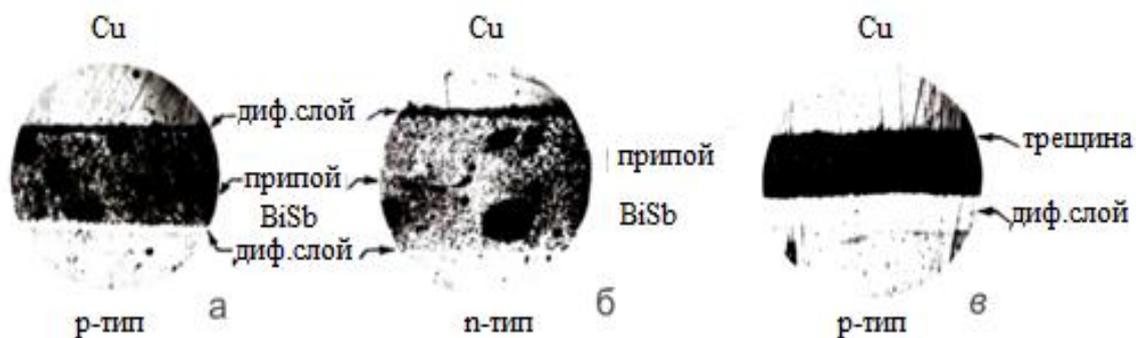


Рис.8. а) $Bi_{0,5}Sb_{1,5}Te_3 + BiSb + Cu$ (до отжига);
 б) $Bi_2Te_{2,88}Se_{0,12} + BiSb + Cu$ (до отжига);
 в) $Bi_{0,5}Sb_{1,5}Te_3 + PbSb + Cu$ (отжиг 200 °С, 150 ч)

Для активации процессов диффузии на контакте металл-припой-полупроводник, образцы подвергались изотермическому отжигу в вакууме при температуре 200 °С в течение 100, 150, 500, 1000 часов. На приготовленных шлифах проводился микроструктурный анализ и

исследовалось распределение элементов с помощью локального рентгеноспектрального анализа, а также измерялось электрическое сопротивление по их длине. Измерение электросопротивления вдоль длины этих образцов не выявило наличие областей с высокими переходными сопротивлениями (рис.8а). Со стороны меди наблюдается трещина, что подтверждается скачкообразным ростом сопротивления на контакте с медью (рис.8 б). Видимо, это следствие высокого уровня механических напряжений на контакте Cu + Bi – Sb, возникающих в процессе образования новой фазы, которое возникает из-за разницы в коэффициентах объемного расширения припоя, меди и образовавшейся фазы.

Изучение взаимодействия припоев Pb – Sb и Bi – Sb с полупроводниковыми материалами ветвей охлаждающих термоэлементов *n* – и *p*- типа и металлом токоведущей шины проводилась после изотермического отжига образцов в вакууме 10^{-3} мм. рт. ст. при температурах 100, 150, 180, 220°C в течение 150 часов (рис.9). Методом оптической микроскопии определялась глубина диффузионных слоев на контактах. Коэффициенты диффузии при каждой температуре оценивались по формуле $D = x^2/2t$, где *x*- ширина диффузионного слоя, *t* - время отжига.

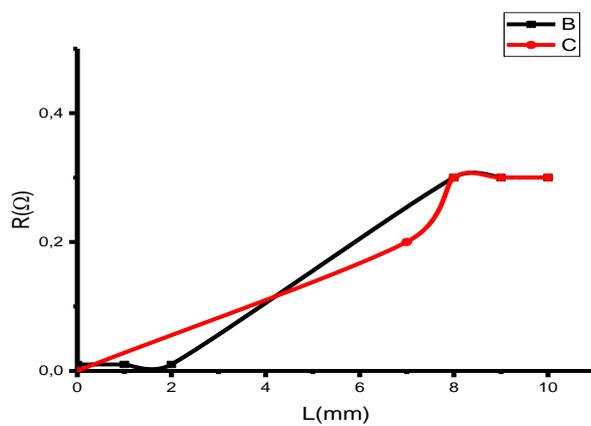


Рис.9. Изменение электросопротивления элементов в зоне контакта $Bi_{0,5}Sb_{1,5}Te_3 + BiSb + Cu$, до отжига (B) и после отжига (C) при 200 °C в течение 150 ч.

Экспериментальные результаты определения средних толщин диффузионных фаз при разных температурах и вычисление значения коэффициента диффузии представлены в таблице 3.

Таблица 3.

Значения диффузионной длины и коэффициента диффузии в зависимости от температуры.

№ и состав контакта	Температура отжига, °C							
	100		150		180		220	
	<i>x</i> , 10^{-6} , м	<i>D</i> , 10^{-16} , м ² /с	<i>x</i> , 10^{-6} , м	<i>D</i> , 10^{-16} , м ² /с	<i>x</i> , 10^{-6} , м	<i>D</i> , 10^{-16} , м ² /с	<i>x</i> , 10^{-6} , м	<i>D</i> , 10^{-16} , м ² /с
1. <i>Cu + Pb – Sb</i>	4	0,15	21	4,1	32	9,48	67	41,6
2. "p" <i>Pb – Sb</i>	-	-	3	0,033	5,3	0,25	8,6	0,68
3. "n" <i>Pb – Sb</i>	-	-	-	-	2,4	0,05	4,1	0,15
4. <i>Cu + Bi – Sb</i>	К.Р.	-	К.Р.	-	К.Р.	-	К.Р.	-
5. "p" <i>Bi – Sb</i>	14	1,8	21	4,1	36	12	89	73,3
6. "n" <i>Bi – Sb</i>	22	4,48	43	17	17	20,8	К.Р.	-

где - к.р. - контакт разрушен.

Как видно из таблицы скорость образования промежуточных слоев на контактах в образцах 5 и 6 выше, чем на контактах образцов 2 и 3, о чем свидетельствуют значения коэффициентов диффузии, которые в первом случае на два порядка выше, чем во втором.

На рис.10 а,б представлены зависимости глубины диффузии от температуры.

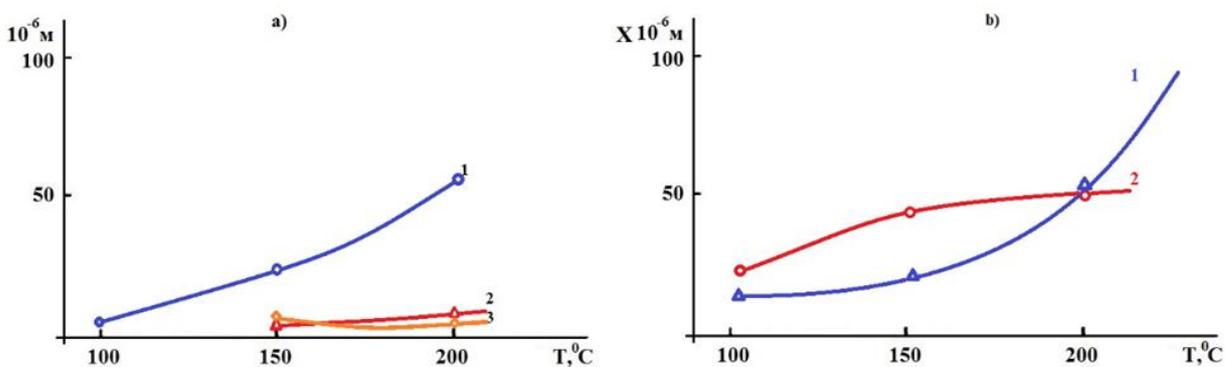


Рис.10. Зависимость глубина диффузии на контактах от температуры отжига.

а) 1- (Pb – Sb) + Cu, **2-** (Pb – Sb) p – типа, **3-** (Pb – Sb) n – типа

б) 1- (Bi – Sb) p – типа, **2-** (Bi – Sb) n – типа

Результаты исследования показали, что как в контакте n – $Bi_2Te_{2,88}Se_{0,12}$, так и в контакте p – $Bi_{0,5}Sb_{1,5}Te_3$ с припоем PbSb, взаимная диффузия связана со значительно большей энергией активации, нежели диффузия в контакте припоем Bi – Sb. Это показывает, что припой на основе висмута обладает значительно большей химической активностью по отношению термоэлектрическим материалам к меди, чем припой на основе свинца. Следовательно, охлаждающие термоэлементы на основе халькогенидов висмута и сурьмы эксплуатируемые или проходящие термообработку при повышенных температурах, должны быть скоммутированы припоями на основе свинца.

В четвертой главе под названием «Изготовление и испытание термобатарей, с металлизированной поверхностью контактов термоэлемента и скоммутированных эвтектическим сплавом PbSb» приведены результаты исследований по использованию одноплудной технологии пайки эвтектическим припоем Pb – Sb с применением антидиффузионного слоя из химически осажденного никеля и по изготовлению и испытанию термобатарей.

Для экспериментальной проверки свойств разработанных термоэлектрических материалов и технологии коммутирования, были изготовлены опытные образцы термоэлектрических модулей, состоящих из 24 и 95 термоэлементов. Ветви термоэлементов изготавливались из зоннонаправленных кристаллов $Bi_2Te_{2,88}Se_{0,12} + 0,04$ вес % Ni + 0,05 вес % с добротностью $2,7 \cdot 10^{-3} K^{-1}$, $Sb_{1,5}Bi_{0,5}Te_3 + 3$ вес % Te + 0,05 Вес % Ni с добротностью $3 \cdot 10^{-3} K^{-1}$.

На рис.11 показана схема расположения элементов единичного термоэлемента.

Была проведена экспериментальная проверка предварительно полученных результатов на отдельных полуэлементах, с изготовлением и испытанием охлаждающих ТЭБ при повышенных температурах. Внешний вид экспериментального модуля, состоящий из 24 термоэлементов с общей рабочей поверхностью 875 мм² показана на рис.12.

Испытания опытных образцов термобатарей на достижение максимального перепада температур производились в вакууме порядка 10⁻³ Па при повышении температуры горячего спаю от 320 до 495 К. Охлаждение осуществлялось проточной водой, тепловой нагрузка к холодному спаю ТЭБ поступало от электронагревателя.

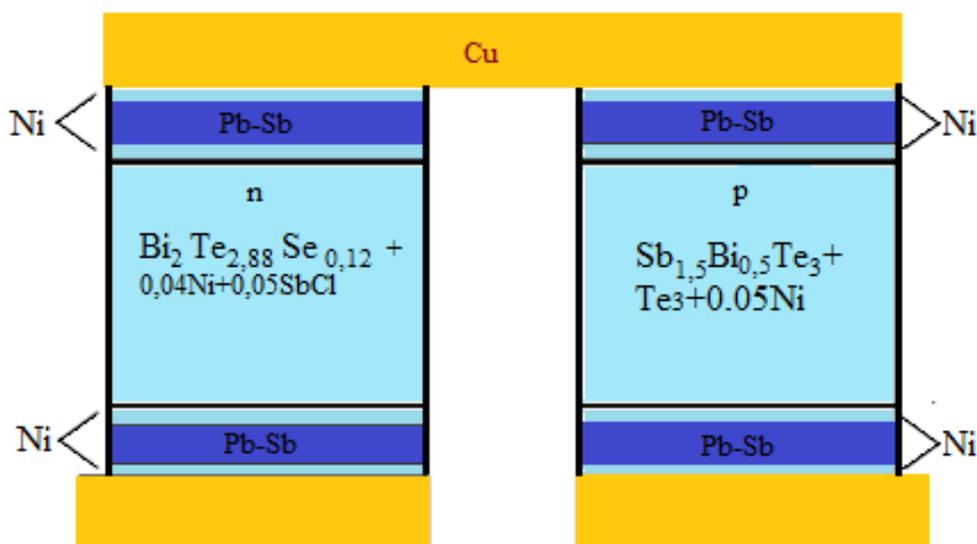


Рис.11. Схема расположения элементов единичного термоэлемента.

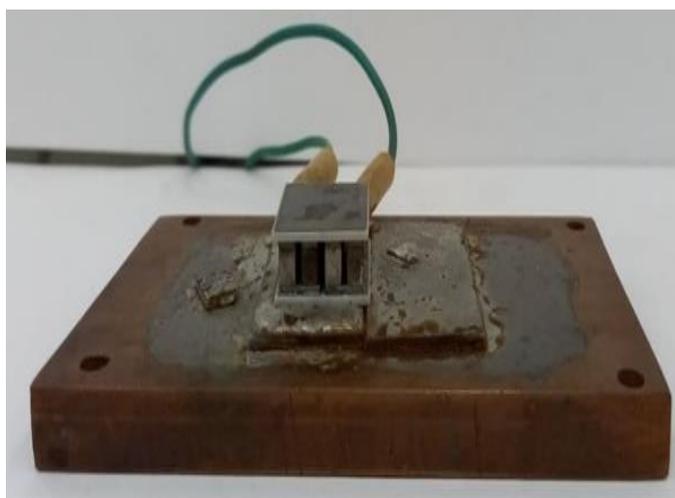


Рис.12. Внешний вид экспериментального модуля.

Результаты проведенных измерений ΔT в условиях адиабатической изоляции (1) и в тепловой нагрузке 3 Вт к холодному спаю (2), представлены на рис.13. Из рис.13 видно, что тепловая нагрузка к холодному спаю приводит к значительному снижению ΔT (до 40), при этом сопротивление ТЭБ

повышался от 0,48 Ом до 69 Ом. Однако, следует отметить, что довольно значительное понижение ΔT_{\max} и повышение сопротивления при тепловой нагрузке холодному спаю можно объяснить не только влиянием контактных сопротивлений, но и конкретными условиями проведения технологического процесса изготовления опытных образцов.

При нулевом градиенте ($\Delta T=0$) температуры в термобатарее определена максимальная холодопроизводительность Q . Увеличение T_x от $T_{x\min}$ до $T_x=T_\Gamma$ сопротивление ТЭБ равнялось на $R=0,74$ Ом и рассчитанные при этой значении максимальной холодопроизводительности $Q=6,24$ Вт.

Анализ экспериментальных данных показывает, что ТЭБ скоммутированных припоем эвтектики $Pb-Sb$ с антидиффузионной прослойкой никеля, можно эффективно использовать для термостатирования или охлаждения различных объектов в интервале температур ($200 \div 473$) К.

При измерении максимального перепада температуры ΔT_{\max} термоэлементов, как правило, измеряются также оптимальный рабочий ток $I_{\text{опт}}$ и максимальное падение напряжения U_{\max} . При этом без дополнительных измерений, можно определить один из влияющих факторов на эффективность термоэлемента - контактное сопротивление r_k .

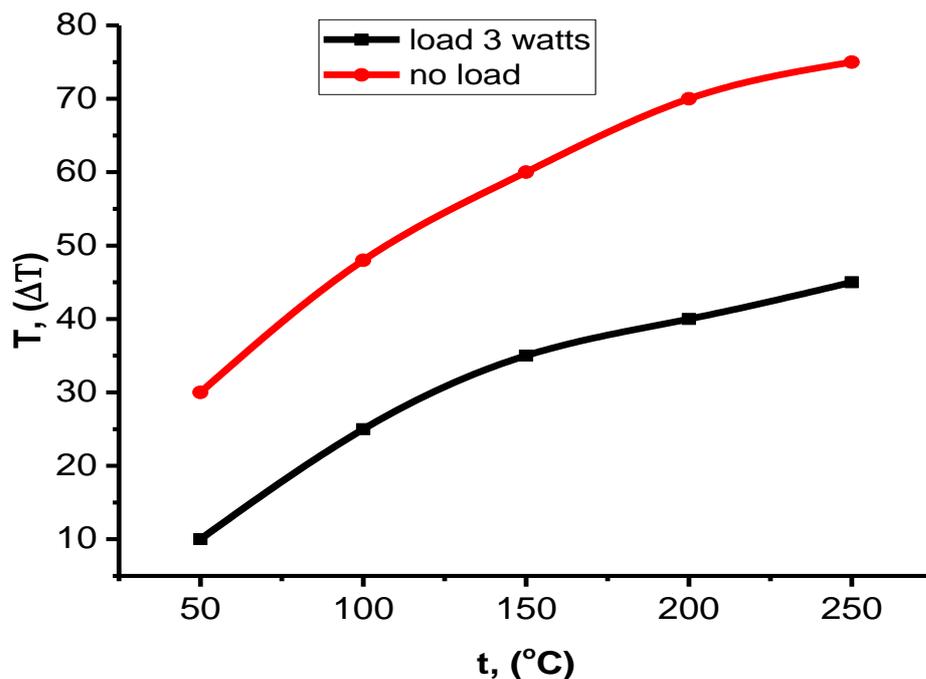


Рис.13. Зависимость перепада температур (ΔT) от температуры окружающей среды (T_c). 1 – без нагрузки 2 – в нагрузке 3 Вт.

В режиме максимальной холодопроизводительности при отсутствии внешней тепловой нагрузки, оптимальный ток термоэлемента определяется по формуле

$$I_{\text{опт}} = \frac{\alpha T_x}{R + 2r_k} \quad (23),$$

Отсюда
$$r_k = \frac{\alpha T_x - IR}{2I} = \frac{\alpha T_\Gamma - \alpha \Delta T - IR}{2I} \quad (24)$$

Здесь учитывается влияние двух контактных сопротивлений между ветвями и коммутационной пластиной. Учитывая еще два контактных сопротивления по горячим сторонам ветви термоэлемента можно написать,

$$r_k = \frac{U - I\rho \frac{2l}{S}}{2I} \quad (26)$$

где U - падение напряжения на омическом сопротивлении ветви термоэлемента, В; S , l - площадь сечения и высота ветви термоэлемента, см², см; ρ - удельное электросопротивление материала, Ом·см.

Таким образом (26) позволяет вычислить величину контактного сопротивления косвенным способом, исходя из измерений падения напряжения на термоэлементе, при оптимальном значении рабочего тока $I_{\text{опт}}$ и $\Delta T = 0$ ($\Delta T = T_r - T_x$), т.е. при $T_r = T_x$.

Эвтектический припой $Pb - Sb$ в контакте выполняет одновременно роль демпфера и коммутирующего припоя.

Предлагаемая технология значительно упрощает процесс сборки термобатарей, повышает эффективность последней, а также позволяет механизировать процесс нанесения припоя на термоэлемент, что очень важно в серийном изготовлении термоэлектрических батарей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны термоэлектрические материалы на основе $n - Bi_2Te_{2,88}Se_{0,12}$ и $p - Bi_{0,5}Sb_{1,5}Te_3$, легированные никелем с повышенным пределом прочности на сжатие ($2,9 \div 6,1$) кг/мм² и ($6,1 \div 7,2$) кг/мм², соответственно, при сохранении значения термоэлектрической эффективности в пределах $(2,7 \div 3,1) \cdot 10^{-3}$ 1/К.

2. На основании исследований термоэдс, электропроводности и коэффициента Холла установлено, что сплав $Bi_2Te_3 + 0,04$ вес% Ni сохранял энергетический спектр носителей заряда присущий p - типу полупроводника теллурида висмута. В области температур $80 \div 150$ К в процессах участвует преимущественно подзона “легких” дырок с меньшей эффективной массой плотности состояний и соответственно большей подвижностью носителей. А при температурах $T > 200$ К основной вклад в величину термоэлектрических параметров вносят “тяжелые” дырки.

3. Установлен механизм рассеяния носителей заряда во всем исследуемом интервале температур. Показано, что рассеяние как “легких”, так и “тяжелых” дырок происходит преимущественно на акустических колебаниях решетки. Результаты исследований по определению механизма рассеяния носителей заряда из термоэлектрических параметров хорошо согласуются с данными по изменению сопротивления в магнитном поле.

4. Разработаны оптимальные технологические режимы нанесения тонких металлических покрытий Ni и $Mo + Ni$ на поверхность ветвей охлаждающих термоэлементов методом катодного распыления, с целью создания в приконтактных областях термоэлементов антидиффузионных слоев.

5. Установлено, что в случае коммутации контакта эвтектическим

сплавом Pb – Sb энергия активации диффузии припоя больше (52500 Дж/моль), нежели коммутации припоем Bi – Sb, чем подтверждается что эвтектический сплав Pb – Sb является перспективным коммутационным материалом для охлаждающих термобатарей, работающих при повышенных температурах и для термопреобразователей работающих в вакууме.

6. Показана возможность использования эвтектического сплава системы Pb – Sb, имеющего температуру плавления 525 К в качестве припоя для осуществления однослойной коммутации термобатарей, работающих в интервале температур (200 ÷ 450) К в вакууме.

7. Рекомендовано разработанный коммутационный переход $p_{\text{тип}} \text{Ni} + (\text{Pb} - \text{Sb}) + \text{Ni Cu}$, $n_{\text{тип}} \text{Ni} + (\text{Pb} - \text{Sb}) + \text{Ni Cu}$ в качестве эффективного способа коммутации охлаждающих термоэлементов, работающих как при низких, так и при повышенных температурах.

8. Предложена метод определения переходного сопротивления контактов простым и доступным методом, заключающиеся вычисления величину контактного сопротивления косвенным способом, исходя из измерений падения напряжения на термоэлементе, при оптимальном значении рабочего тока $I_{\text{опт}}$ и $\Delta T = 0$.

**SCIENTIFIC COUNCIL PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 ON
AWARDING SCIENTIFIC DEGREES AT THE NAMANGAN INSTITUTE
OF ENGINEERING AND TECHNOLOGY**

FERGANA STATE UNIVERSITY

AZIMOV TOLANBOY MARUFJONOVICH

**FEATURES OF THE PHYSICO-CHEMICAL INTERACTION OF
THERMOELECTRIC ALLOYS BASED ON BiSb-(Te, Se) IN CONTACT
WITH CONNECTION MATERIALS**

01.04.10 – Physics of semiconductors

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

Namangan – 2025

The topic of the dissertation Doctor of Philosophy (PhD) in physical and mathematical sciences is registered by the Higher Attestation Commission under the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan under No. B2023.1.PhD/FM850.

The dissertation was completed at the Fergana State University.

The abstract of the dissertation is available in three languages (Uzbek, Russian, English (summary)) is posted on the website Of the Scientific Council (www.namnti.uz) and on the Information and Educational portal "ZiyoNet" (www.ziyo.net).

Scientific supervisor: **Onarkulov Karimberdi Egamberdievich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Official opponents: **Zainabiddinov Sirojiddin Zainabiddinovich**
Academician of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

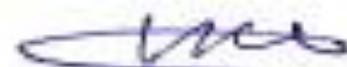
Aynov Kutub Santovich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Leading organization: **Bukhara State University**

The defense of the dissertation will be held at 10⁰⁰ on "19" 04 2025 at the meeting of Scientific Council PhD 03/30.11.2022.FM/T.66.04 at the Namangan Institute of Engineering and Technology. (Address: 160115, Namangan city, Kasarsay Str. 7, administrative building, small conference hall, tel. (+99869)228-76-68, 225-10-07, Fax: (+99869) 228-76-75, e-mail: nici_info@edu.uz)

You can get acquainted with the dissertation work at the Information Resource Center of the Namangan Institute of Engineering and Technology (registration number No. 374) Address: 160115, Namangan city, Kasarsay Str.7, tel. (+99869) 228-76-68; Fax: (+99869) 228-76-75, e-mail: nici_info@edu.uz

The abstract of the dissertation was sent on "03" 04 2025,
(mailing protocol No. 22 on "03" 04 2025)



U. Erkaboev
Chairman of Scientific Council
on award of Scientific Degrees,
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

A. Abdukarimov
Scientific Secretary of Scientific Council
on award of Scientific Degrees,
Doctor of Philosophy(PhD), Associate Professor

N.Sharibayev
Chairman of the Scientific Seminar at the
Scientific Council on award of Scientific Degrees,
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor



INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

The aim of research work is improving the efficiency of thermoelectric materials based on bismuth- and antimony-containing chalcogenides, creating effective commutation junctions by studying diffusion processes in contact areas, as well as enhancing the technology for producing semiconductor thermoelements..

The object of research work is the semiconductor materials BiSb-(Te, Se).

The scientific novelty of the research work are as follows:

for the first time a technology for producing improved semiconductor thermoelectric materials based on BiSb-(Te, Se) has been developed;

a technology for producing the first improved semiconductor thermoelectric materials based on Bi-Sb-(Te,Se) has been developed, which made it possible to create materials with new properties that had not been used before;

a mathematical model has been developed that reflects the reduction and increase in the efficiency of diffusion processes in switching contacts with thermoelectric materials using BiSb and PbSb eutectics and solders;

long-term stable operation of thermoelectric materials in order to increase their efficiency is based on reducing the diffusion coefficients by metallizing their contacting surfaces;

the interaction of PbSb and BiSb eutectics with thermoelectric materials, as well as the physicochemical properties of diffusion layers, has been studied in detail, and a mathematical model of electrical and thermal conductivity has been developed.

based on the research results, a technology has been developed for producing new thermoelectric batteries with high efficiency, based on reducing diffusion processes in switching contacts and metallizing the contacting surfaces.

Implementation of the research results. Based on scientific and practical results on the study of the features of the physicochemical interaction of thermoelectric alloys based on BiSb-(Te, Se) in contact with switching materials:

It has been shown that the introduction of impurities into the open crucible-based $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Sb}_2\text{Te}_3$ ensures the stability of thermoelectric properties, allowing for the reproducibility of the thermoelectric characteristics of semiconductor materials. (Patent of the Intellectual Property Agency of the Republic of Uzbekistan No. IAP 05968 dated August 6, 2019). As a result, the stability of the material and economic energy efficiency are improved.

Obtaining thermoelectric materials based on $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.88}\text{Se}_{0.12}$ and $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ doped with nickel with increased tensile strength while maintaining the thermoelectric figure of merit; the influence of nickel on the energy spectrum and the mechanism of scattering of charge carriers of the alloy; the possibility of using the PbSb eutectic alloy as solder for single-layer switching of thermopiles; deposition of nickel chemically on the contact surfaces, providing reliable miscibility with BiSb and PbSb solders; determination of the diffusion coefficient and activation energy of PbSb and Bi-Sb eutectic solders in contact with thermoelectric materials under OT-FA-68 project in the project. (Certificate of

Andijan State University No. 04-2791 of 11.12.2024). This contributed to additional efficiency in the efficiency of obtaining results.

Publications of research results. On the topic of the dissertation, 26 scientific papers were published in total, 5 of them in scientific journals recommended by the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for publishing the main scientific results of dissertations, including 2 articles published at foreign international conferences Scopus.

The structure and scope of the dissertation. The dissertation work consists of an introduction, 4 chapters, a conclusion, a list of references and applications. The volume of the dissertation is 110 pages.

E'LON QILINGAN ISHLAR RO'HATI
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I bo'lim (I часть; I part)

1. Usmonov Ya., Nabiyeu M., Yakubova Sh., **Azimov T.M.** P – tipdagi termoelektrik materiallar olish usuli // O'zR adliya vazirligi huzuridagi intellektual mulk agentligi Ixtiroga patent Uz FAP № IAP05968 06.08.2019
2. Onarkulov K., **Azimov T.** Study of diffusion processes in contact areas of thermocouples with metals // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 376. No. 01058. Proceedings of the 2023 International Scientific and Practical Conference on Environmental Risks and Safety in Mechanical Engineering, ERSME 2023, Rostov-on-Don, March 1–3, 2023. DOI: 10.1051/e3sconf/202337601058. (№3 Scopus)
3. Onarkulov K., **Azimov T.** Diffusion processes in contact areas thermoelements based on PbSb alloys // AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing, 2024. – T. 3045. – №. 1. <https://doi.org/10.1063/5.0197662> (№3 Scopus)
4. **Azimov T. M.**, Yuldashev A.A., Ismoilova Sh.A. Exploring the properties of bismuth and antimony solid solutions for thermoelectric applications. // Scientific Bulletin of NamSU – 2024. -5-son 72-75 betlar (01.00.00. №14)
5. **Azimov T. M.** Nikel bilan legirlangan $Bi_{0,5}Sb_{1,5}Te_3$ termoelektrik materiallarning elektrofizik xossalari // Ilmiy xabarnoma (Andijon davlat universiteti) 2025. (01.00.00. №13)
6. Онаркулов К.Э., **АЗИМОВ Т.М.** Повышение прочности механических свойств материалов легированного с Ni и Cu на границе коммутационный материал – полупроводник. Научный вестник // (Андижанский государственный университет) - 2024. – Т. 6 – №. 2 С. 21-26. (01.00.00. №13)

II bo'lim (II часть; II part)

7. Набиев М, Усмонов Я.,Ахмедов Т, **АЗИМОВ Т.** Интер газ босими остида очик калта тигелда термоэлектрик материал олиш. // ФарДУ илмий хабарлар. 2016. №6. 81-83 бетлар.
8. Онаркулов К.Э., Юлдашев А.,**АЗИМОВ Т.М**, Ш.Йўлдош Қори, Висмут-сурма теллурид юпка пардаларнинг электрофизик хоссаларига технологик жараённинг таъсири. // ФарДУ-Илмий хабарлар журналы 2017 йил №2 9-12 бетлар.
9. Onarkulov K.E., Usmanov Y., G'aynazarova K.I., **Azimov T.M.** Semiconductor sensor for detecting volume changes at low temperatures. // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. doi.org/10.29013/AJT-20-1.2-16-20. (№35 CrossRef, IF 6,62.)
10. **Azimov T.M.**, Onarkulov K.E., G'aynazarova K.I. Effect of commutation solder on the operating characteristics of cooling elements based on bismuth and antimony chalcogenides Semiconductor sensor for detecting volume changes at low temperatures. // Austrian Journal of Technical and Natural

Sciences. doi.org/10.29013/AJT- 20-1.2-21-25. (№ 35 CrossRef, IF 6,62.)

11. **Azimov T. M.** Gaynazarova, K. I., Onarkulov, M. K., Yuldashev, A. A. Thermoelectric and Galvanomagnetic Properties of the Alloy Bi₂Te₃+ 0.04 Weight% Ni in the Temperature Range 77÷ 300 K //American Journal of Modern Physics. – 2021. – Т. 13. – №. 2. – С. 124-128. DOI: 10.11648/j.ajmp.20211006.12 (№ 14 ResearchBib)
12. **Т.М. АЗИМОВ** Исследования термоэлектрической характеристики тонких пленок на основе материалов р – Bi₂Te₃ Республика илмий –техникавий анжумани материаллари “Мукобил энергия турлари ва улардан фойдаланиш истикболлари” Фарғона 2017 12 май 41-42 бет
13. **АЗИМОВ Т.М.**, Рахмонкулов М., Юлдашев Йўлдош Қори Ш. Влияний макроскопических параметров термовакуумного испарения на элнетрофизические свойства пленок теллурида висмута-сурьмы Мукобил энергия турлари ва улардан фойдаланиш истикболлари Республика илмий-техникавий анжумани материаллари Фарғона 2017 йил 74-76 бетлар
14. Онаркулов К., Набиев М., **Азимов Т.М.**, Гайназарова К. Разработка эффективных коммутационных переходов с использованием металлизации контактируемых поверхностей ветвей термоэлементах. Замонавий тадқиқотлар, инновациялар, техника ва технологияларнинг долзарб муаммолари ва ривожланиш тенденциялари. Республика илмий-техник анжуман материаллари Жиззах 2018 йил 14 декабрь
15. **Азимов Т.М.**, Гайназарова К.И., Онаркулов К.Э. Метод определения контактного сопротивления контактов Сборник материалов международной научно-рецензируемой онлайн конференции «Тенденция развития современной физики полупроводников: проблемы достижения и перспективы» с. 281-284. 28 мая 2020 г
16. Набиев М.Б., Гайназарова К.И., **Азимов Т.М.** Изучение технологии получения некоторых свойств, напыленных пленок n-PbTe. Международной конференция физика полупроводников и микроэлектроника. Ташкент-2020.
17. **Азимов Т.М.**, Гайназарова К.И., Онаркулов К.Э. Метод определения контактного сопротивления термоэлементов Международной конференция физика полупроводников и микроэлектроника. Ташкент-2020.
18. Онаркулов К.Э., **Азимов Т.М.**, Гойназарова К.И., Онаркулов М.Э. Влияние контактов термоэлементов на эффективность термобатареи Международной конференция физика полупроводников. Наманган-2020.
19. **Азимов Т.М.**, Нишонова Н.В. Разработка технология коммутирования термоэлектрических модулей скоммутированных эвтектическим сплавом PbSb. "Ўзбекистонда илмий-амалий тадқиқотлар" мавзусидаги республика 12-қўп тармоқли илмий конференция материаллари Тошкент – 2020
20. Гуфронова Д.Ш., Эргашева Г.Ш., **Азимов Т.** Исследование диффузионных процессов, проходящих в приконтактной области

- термоэлемента. Международный научно-практическая конференция Том 2 (25) Москва.12.02.2020. 38-43
21. **Азимов Т.М.**, Гайназарова К.И., Юлдашев А.А, Механические и термоэлектрические свойства термоэлементов на основе $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$. «Инновационные идеи, разработки в практику: проблемы, исследования и решения» Международная научно-практическая онлайн конференция. Андижон 2021 04 21.156-157.
 22. Онаркулов К.Э., **Азимов Т.М.**, Онаркулов М.Э. Исследование диффузионных процессов, проходящих в приконтактной области в охлаждающих термоэлементах из Bi_2Te_3 и Sb_2Te_3 «Новые материалы и гелиотехнологии» 20-21 мая 2021 года. г.Паркент, Узбекистан. 46-49.
 23. Онаркулов К.Э, **Азимов Т.М.**, Зокиров А.И. Физические процессы, происходящие в контактах термоэлементов. II Международная научная конференция «современные тенденции развития физики полупроводников: достижения, проблемы и перспективы» Ташкент, 2022 г., 27-28 декабрь 55-56
 24. **Azimov T.M.** A'zamova D.I., Hayitoxunova M.Z. Chemical interaction of solders with materials of thermoelement legs and busbars "Ilm-zakovatimiz – senga, ona-vatan!" Respublika ilmiy-amaliy anjuman materiallari (2023-yil 25-aprel) s.160-163. Fergana -2023
 25. **Азимов Т.М.**, Гайназарова К.И., Юлдашев А.А Механические и термоэлектрические свойства термоэлементов на основе $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$ «Инновационные идеи, разработки в практику: проблемы, исследования и решения» Международная научно-практическая онлайн конференция 156-158
 26. Onarkulov K.Э., **Azimov T.M.** Exploring the properties of bismuth and antimony solid solutions for thermoelectric application Fizika, matematika va mexanikaning dolzarb muammolari mavzusida o'tkazilayotgan Xalqaro miqyosdagi ilmiy-amaliy anjuman Buxoro - 2023 yil

Avtoreferat Namangan shahar U.Nosir nashriyotida tahrirdan o'tkazildi va o'zbek,
rus, ingliz tillaridagi matnlari mosligi tekshirildi (02.04.2025).

Bosishga ruxsat etildi 02.04.2025 y.
Bichimi 60X84 1/16, "Times New Roman"
Garniturada raqamli bosma usulida bosildi.
Shartli bosma tobog'i 3. Adadi: 100. Buyurtma: № 127

“ FAZILAT ORGTEX SERVIS”
hususiy korxonasi bosmaxonasida chop etildi.
Manzil: Namangan sh. Amir Temur ko'chasi 97 uy.
Tel: (+998) 91-346-44-43, (+998) 99-608-69-44