

**O‘ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI HUZURIDAGI
YARIMO‘TKAZGICHLAR FIZIKASI VA MIKROELEKTRONIKA
ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR
BERUVCHI DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

FARG‘ONA POLITEKNIKA INSTITUTI

LATIPOVA MUXAYYO IBRAGIMJANOVNA

**BiTeSe-BiSbTe ASOSIDAGI YARIMO‘TKAZGICHLI TERMoeLEKTRIK
MATERIALLARNING SAMARADORLIGINI OSHIRISH USULINI
ISHLAB CHIQISH**

01.04.10 – Yarimo‘tkazgichlar fizikasi

**TEXNIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD) DISSERTATSIYASI
AVTOREFERATI**

Toshkent – 2024

Falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi avtoreferati mundarijasi

Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD)

Content of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD)

Latipova Muxayyo Ibragimjanovna

BiTeSe-BiSbTe asosidagi yarimo‘tkazgichli termoelektrik materiallarning samaradorligini oshirish usulini ishlab chiqish.....4

Латипова Мухайё Ибрагимжановна

Разработка способа повышения добротности полупроводниковых термоэлектрических материалов на основе BiTeSe-BiSbTe23

Latipova Mukhayyo Ibragimjanovna

Development of a method for increasing the figure of merit of semiconductor thermoelectric materials based on BiTeSe-BiSbTe.....43

E‘lon qilingan ishlar ro‘yxati

Список использованной литературы

List of published works.....47

**O‘ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI QOSHIDAGI
YARIMO‘TKAZGICHLAR FIZIKASI VA MIKROELKTRONIKA
ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR
BERUVCHI DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

FARG‘ONA POLITEXNIKA INSTITUTI

LATIPOVA MUXAYYO IBRAGIMJANOVNA

**BiTeSe-BiSbTe ASOSIDAGI YARIMO‘TKAZGICHLI TERMOELEKTRIK
MATERIALLARNING SAMARADORLIGINI OSHIRISH USULINI
ISHLAB CHIQISH**

01.04.10 – Yarimo‘tkazgichlar fizikasi

**TEXNIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD) DISSERTATSIYASI
AVTOREFERATI**

Toshkent – 2024

Texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2023.3.PhD/T3800 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya Farg'ona politexnika institutida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengashning veb-sahifasida (ispm.uz) va «ZiyoNet» Axborot-ta'lim portalida (www.ziynet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy raxbar: **Kasimaxunova Anarxan Mamasadikovna**
texnika fanlari doktori, professor

Rasmiy opponentlar: **Tagayev Marat Baymurotovich**
texnika fanlari doktori, professor

Tukfatullin Oskar Faritovich
texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD), katta ilmiy xodim

Yetakchi tashkilot: **Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti**

Dissertatsiya himoyasi O'zbekiston Milliy universiteti qoshidagi Yarimo'tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti huzuridagi ilmiy darajalar beruvchi DSs.03/30.12.2019.FM/T.01.12 raqamli Ilmiy kengashning 2021 yil «26» 07 soat 10 dagi majlisida bo'lib o'tadi. (Manzil: 100057, O'zbekiston, Toshkent sh., Yangi Olmazor ko'chasi, 20-uy, Tel.: (+99871)248-79-94, faks: (+99871)248-79-92, e-mail: info@ispm.uz).

Dissertatsiya bilan institutning Axborot-resurs markazida tanishish mumkin. (62 raqam bilan ro'yxatga olingan). Manzil: 100057, O'zbekiston, Toshkent shahri, Yangi Olmazor ko'chasi, 20-uy. Tel.: (+99871) 248-79-59; e-mail: info@ispm.uz).

Dissertatsiya avtoreferati 2021 yil «11» 07 kuni tarqatildi.
(2021 yil «11» 07 dagi 62 raqamli restr bayonnomasi).



Sh.B. Utamuradova
Ilmiy darajalar beruvchi
Ilmiy kengash raisi, f.-m.f.d., professor

J.J. Hamdamov
Ilmiy darajalar beruvchi
Ilmiy kengash ilmiy kotibi, PhD, k.i.x.

N.A. Turg'unov
Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash
qoshidagi ilmiy seminar raisi,
f.-m.f.d., dotsent

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Disertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahonda termoelektrik asbobsozlik nazariyasi va amaliyotining tezkor rivojlanishi, ekologik toza energiya manbalarini keng miqyosda joriy etish, yuqori samarador termoelektrik materiallar, qurilmalar va energiya manbalarini yaratishning yangi fizik-texnologik yondashuvlarini qo'llash yetakchi o'rinlardan birini egallamoqda. Dunyo miqyosida termoelektr energiya manbalaridan foydalanish atrof-muhitni ifloslantirmasdan elektr energiyasi ishlab chiqarish, shuningdek, olis hududlarni elektr energiya bilan ta'minlash imkonini beradigan qurilmalarni amaliyotga joriy etishni taqazo etadi. Shu jihatdan energiyaga bo'lgan extiyojni qisman qondirish uchun har qanday issiqlik energiyasini to'g'ridan-to'g'ri elektr energiyasiga o'zgartira oladigan termoelektrik energiya o'zgartirgichlari asosida ishlab chiqilgan avtonom qurilmalardan foydalanish muhim ahamiyatga ega hisoblanadi.

Jahonda yarimo'tkazgichli birikmalar olishning ko'plab usullari va texnologiyalarini takomillashtirish bo'yicha termogeneratorlar uchun yaxshi termoelektrik materiallar olishga yo'naltirilgan ilmiy-tadqiqot ishlari olib borilmoqda. Bu borada mavjud usullar elektrofizik parametrlarga bog'liq ravishda termoelektrik samaradorlik Z ning o'zgarishi termoelement shoxchalarini tayyorlash texnologiyasiga tayanadi, aksariyat tadqiqotchilarning fikriga ko'ra, mavjud ko'plab materiallar, integratsiyalanuvchi termoelektrik xususiyatlarga ega, istiqbolli moddalar deb hisoblanib, materiallar tarkibiga legirovchi moddalarni kiritish, parametrlarining qiymatlarini o'zgartirish va ma'lum darajada rostlashga alohida e'tibor berilmoqda.

Respublikamizda energiya tejoyvchi texnologiyalarni joriy etish va qayta tiklanuvchi energiya manbalarini rivojlantirish yuzasidan keng qamrovli chora-tadbirlar amalga oshirilib, muayyan natijalarga erishilmoqda. Termoelektrik generatorlarning ishlash va iqtisodiy ko'rsatgichlari bilan e'tiborga molik bo'lishiga qaramay, boshqa mamlakatlarga nisbatan, ularning xususiyatlari, materiallar va tadbiq etish masalalari bo'yicha nisbatan kam tadqiqotlar olib borilmoqda. 2022-2026-yillarda O'zbekistonni rivojlantirish strategiyasi doirasida iqtisodiyotning barcha tarmoqlariga energiya tejamkor texnologiyalarni faol joriy etish bo'yicha beshta ustuvor yo'nalish bo'yicha muhim vazifalar belgilab berilgan. Ushbu vazifalarni amalga oshirishda, jumladan, tizimli yondashuvdan foydalangan holda, termoelektrik qurilmalarni yaratishning zamonaviy usullari, legirovchi qo'shimchalarni kiritish orqali komponentlarni eksperimental tanlash yo'li bilan termoelektrik materiallarning yangi tarkiblarini ishlab chiqish, shuningdek, termoelektrik qurilmalarni ishlab chiqarish texnologiyasini takomillashtirish sohasidagi tadqiqotlar olib borish muhim ahamiyat kasb etmoqda.

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022 yil 28 yanvardagi PF-60-son "2022-2026-yillarda Yangi O'zbekistonni rivojlantirish strategiyasi to'g'risida"gi, 2022-yil 9 sentabrdagi PF-220-son "Energiya tejoyvchi texnologiyalarni joriy qilish va kichik quvvatli qayta tiklanuvchi energiya manbalarini rivojlantirish bo'yicha qo'shimcha chora-tadbirlar to'g'risida"gi, 2019-yil 22-avgustdagi PQ-4422-son "Iqtisodiyot va ijtimoiy tarmoqlarning energiya samaradorligini oshirish, energiya

tejoychi texnologiyalarni joriy etish va qayta tiklanuvchi energiya manbalarini rivojlantirish bo'yicha jadal chora-tadbirlar to'g'risida"gi farmon va qarorlari hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa me'yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalda oshirishga ushbu dissertatsiya ishi muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning respublika fan va texnikasi rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga muvofiqligi. Mazkur tadqiqot respublika fan va texnologiyalar rivojlanishining III-«Energetika, energiya resurslarini tejash, transport, mashinasozlik va asbobsozlik; zamonaviy elektronika, mikroelektronika, fotonika, elektron asbobsozlikni rivojlantirish» ustuvor yo'nalishlariga muvofiq bajarilgan.

Muammoning o'rganilganlik darajasi. Hozirgi kunga qadar termoelektrik hodisalarga oid ko'plab nazariy va eksperimental materiallar to'plangan. Bu boradagi ilmiy izlanishlar T.Kajikava va Y.Sinohara (Yaponiya), L.Chen (Xitoy), V. Jovovich (AQSh), professor A. Kasyana (Moldova) kabi yetakchi olimlari tomonidan olib borilmoqda. R.Simona, R.Yur, J.Borrego, O.Bottgerlar (Germaniya) termoelektrik materialning samaradorlik koeffitsientini oshirish uchun tok tashuvchilarning optimal konsentratsiyasini tanlash kabi bir qator yo'nalishlarda ishlagan.

Issiqlik energiyasini to'g'ridan-to'g'ri elektr energiyasiga aylantirish uchun bir qator termoelektrik qurilmalarni yaratishda barqaror xususiyatlarga va yuqori termoelektrik ko'rsatkichlarga ega bo'lgan yuqori sifatli termoelektrik materiallar talab qilinadi. Ushbu yo'nalish bo'yicha MDH davlatlari olimlaridan B.S. Pozdnyakov, E.A. Koptelov, A.S. Oxotin, A.A. Efremov, B.M.Goltsman, V.S. Oxotin, A.S. Pushkarskiy, A.L. Vayner, E.V. Osipovalarning bir qator monografiyalari mavjud. A. I. Burshteyn va B.Ya.Moyjes materiallarning haroratga bog'liqlik xususiyatlariga ko'ra, issiqlik balansi tenglamalarini olish orqali, yarimo'tkazgichli termoelementlarni energetikada qo'llanilishining nazariyasi bilan ishlagan. E. K. Iordanishvili ichki yo'qotishlarni hisobga olgan holda ko'p qatlamli termojuftlarni hisoblash usulini ishlab chiqqan. Shuningdek, turli xil TEG konstruksiyalari va ularning tavsifnomalari bo'yicha ma'lumotlar tizimlashtirilgan.

Mamlakatimizning yetakchi universitetlari va texnika oliy ta'lim muassasalarida tegishli soha mutaxassislarini tayyorlashga bo'lgan talab ham keskin o'sib bormoqda. Ushbu sohadagi tadqiqotlar prof., R.A.Avezov, prof., A.M. Kasimaxunova, G. Abdurahmonov, B.L. Oksengendler, Ya. Usmanov, M.B. Nabiyeu, Q. Gaynazarova kabi olimlar tomonidan olib borilgan.

Mazkur tadqiqotlar natijasida, issiqlik energiyasini elektr energiyasiga to'g'ridan to'g'ri o'zgartirish uchun mo'ljallangan qurilmalarni yaratishda yuqori samaradorlik koeffitsientiga va barqaror termoelektrik xossalarga ega bo'lgan termoelektrik materiallarni olish texnologiyasini takomillashtirish bo'yicha tadqiqotlar yetarli darajada o'tkazilmagan.

Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan oliy ta'lim muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog'liqligi.

Dissertatsiya tadqiqoti Farg'ona politexnika instituti ilmiy tadqiqot dasturi va "Farg'ona Avtomat Raschot" MChJ o'rtasida imzolangan "Kichik va o'rta quvvatli

iste'molchilari uchun ekologik toza muqobil energiya manbai-termoelektrik generatorni (TEG) ishlab chiqish" mavzusidagi 54-21-sonli xo'jalik shartnomasi ((21.11.21 yildagi 44-sonli X/Sh ITS buyrug'i) va "Elektroshok" MChJ o'rtasida imzolangan "Fototermoelektr batareyasini ishlab chiqish" mavzusidagi №6-20-sonli xo'jalik shartnomasi (03.16.20 yildagi 6-sonli ITS buyrug'i) doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi BiTeSe-BiSbTe uchtalik qotishma asosida yuqori foydali ish ko'effitsientiga ega bo'lgan termogeneratorlarni yaratish imkonini beruvchi samarador termoelektrik materiallarni tayyorlash texnologiyasini ishlab chiqishdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

300 K dan 600 K gacha bo'lgan ishchi haroratlar intervaliga ega bo'lgan termoelementlarni tayyorlash uchun termoelektrik materiallarning tarkibini va olish texnologiyasini aniqlash;

turli kirishmalar bilan legirlangan, optimal xossalarga ega bo'lgan n-Bi₂Te₃-Bi₂Se₃ va p-Bi₂Te₃-Sb₂Te₃ asosidagi termoelektrik materiallarni olish shartlarini aniqlash;

eritish jarayonida qotishmalarning yuqori termoelektrik samaradorligi va qaytariluvchanligini ta'minlaydigan yangi legirlovchi qo'shimchani izlash;

grafik usul va ishchi tenglamalar bilan oldindan berilgan termoelektrik hossalarga ega bo'lgan qotishmalarni olishning texnologik jarayonini olib borilishining optimal shartlarini aniqlash;

termoelektrik qurilmalarni chiqish tavsiflarining o'zgarishini hisobiy baholashdan to konstruksiyasigacha modellashtirishning kompleks vazifalarini amalga oshirish uchun dasturiy ta'minotni ishlab chiqish.

Tadqiqot ob'yekti sifatida gorizontal zonali eritish va kukunlarni presslash usullarida olingan BiSbTe (p-turdagi) va BiTeSe (n-turdagi) termoelektrik moddalar olingan.

Tadqiqot predmeti termoelektrik o'zgartirgichlarni elektr yuklamaga ulash rejimlari, vismut telluridi – qo'rg'oshin asosidagi komponentlarni inert gaz bosimi ostida eritish orqali elektron va teshik o'tkazuvchanlikka ega bo'lgan yarimo'tkazgichli termoelektrik materiallarni ishlab chiqarish texnologiyalarini taqqoslashdan iborat.

Tadqiqot usullari. Tadqiqot jarayonida to'rt zondli o'lchash qurilmasi yordamida termoelektrik materiallarning elektr o'tkazuvchanligi kompensatsion usulda, termoelektr yurituvchi kuch ko'effitsienti differensial usulda hamda issiqlik o'tkazuvchanligini aniqlashda nostatsionar usullardan foydalanilgan.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilarni o'z ichiga oladi:

kukunli presslash va gorizontal zonali eritish usullari orqali n- va p-tipli samarali termoelektrik materiallarning tarkibiy qismlarini foiz nisbatlari aniqlangan: n-tip uchun Bi₂Te₃ (85%)-Bi₂Se₃ (15%) va p-tip uchun Bi₂Te₃ (30%) -Sb₂Te₃ (70%);

n-tipli Bi₂Te₃-Bi₂Se₃ termoelektrik materiallarning yuqori qaytariluvchanlik ko'effitsientini ta'minlash uchun legirlovchi modda TeI₄ ning optimal konsentratsiyasi $\sigma = 600 \div 200 \text{ Om}^{-1} \cdot \text{sm}^{-1}$, $\alpha = 200 \div 240 \text{ mkV/K}$ termoelektrik kattaliklarga ega bo'lgan tarkibiy komponentlarga 0,04 mol.% bo'lishi aniqlangan;

ilk bor gorizontaal zonali eritish usuli bilan olingan n- Bi_2Te_3 - Bi_2Se_3 materialini TeI_4 bilan legirlanganda, uning termoelektrik samaradorligi presslangan na'munalarga nisbatan 1,4 marta ortganligi aniqlangan;

gorizontaal zonali eritish usulida $T=1223$ K da 20 daqiqa davomida olingan p- Bi_2Te_3 - Sb_2Te_3 materialiga 1:4 nisbatda Cd kiritilganda, uning termoelektrik samaradorlik koeffitsienti presslangan namunalarga nisbatan ~ 50 % ga ortishi aniqlangan;

300÷600 K harorat oralig'ida n- Bi_2Te_3 - Bi_2Se_3 va p- Bi_2Te_3 - Sb_2Te_3 materiallari asosida olingan termoelementlarda sodir bo'ladigan termoelektrik effektlarning issiqlik oqimiga qo'shadigan hissasini hisobga oladigan matematik model ishlab chiqilgan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

zonali eritish usuli bilan legirlovchi kiritma sifatida TeI_4 dan foydalangan holda termoelektrik moddalarni olish usuli ishlab chiqilgan;

ekspluatatsion ko'rsatkichlarni bashorat qilish imkonini beruvchi termobataveya termoustunlarining elektrofizik parametrlarini hisoblash usuli ishlab chiqilgan;

foydali ish koeffitsientining eng yaxshi qiymatlari ($\approx 7,2\%$) ga ega bo'lgan samarali termoelektrik moddalarni olish va f.i.k.ni oshirish imkoniyati isbotlangan;

olingan moddalar sifatiga texnologiyaning ta'siri ko'rsatildi va yarimo'tkazgichli material hajmida sodir bo'ladigan fizik hodisalar tushuntirildi.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi zamonaviy ilmiy va texnologik usullar, yarimo'tkazgichli energiya o'zgartirgichlarining parametrlari va xususiyatlarini o'lchash uchun standart va aprobatsiyalangan usullardan foydalanganligi bilan tasdiqlanadi. Natijalar va xulosalar nazariy va eksperimental ma'lumotlarga tayangan fizik tushunchalarga asoslanadi. Eksperimental ma'lumotlarning ishonchliligi ma'lumotlarni o'lchash va ishlov berishda mustaqil kompleks o'lchash usullardan foydalanish va ularga ishlov berish, shuningdek, yarimo'tkazgichlar va ular asosida yaratilgan mahsulotlar texnologiyasi va zamonaviy fizika tushunchalariga muvofiqligi bilan ta'minlanadi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati termoelektrik materiallarning energetik, texnik va ekspluatatsion parametrlariga tayyorlash texnologiyasi va muhit ta'sirini bog'liqlik qonuniyatlari ko'ra nazariy hisoblash usullarini kengaytirishdan iborat.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati kichik va o'rta quvvatli sanoat korxonalarida iste'molchilari uchun samarador termoelementlardan tashkil topgan doimiy tok generatorlarini ishlab chiqish imkonini beradi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. BiTeSe - BiSbTe asosidagi yarimo'tkazgichli termoelektrik materiallarning samaradorligini oshirish usulini ishlab chiqish bo'yicha olingan ilmiy natijalar asosida:

uch xil moddadan tashkil topgan BiTeSe (n-tur) va BiSbTe (p-tur) yarimo'tkazgichli termoelektrik materiallar asosidagi termoustunlarni tayyorlash texnologiyalari «FOTON» aksiyadorlik jamiyatida joriy etildi («Uzeltexsanoat» uyushmasining 16.02.2024 yildagi 04–3/232–son ma'lumotnomasi). Natijada

tayyorlangan yarim elementlardan bosim va harorat o'lvhovchi datchiklar, yong'inga qarshi issiqlik datchiklari va termoelektrik o'zgartirgichlar (generatorlar va sovutgichlar) tayyorlashda yarimo'tkazgichli materiallar sifatida foydalanilgan;

dissertatsiyani bajarish jarayonida tayyorlangan termoelektr generatorlar, "Farg'ona IEM" AJda rele himoyasi va avtomatik boshqaruv jihozlari uchun operativ tok manbai sifatida joriy etildi ("Issiqlik elektr stansiyalari" AJning 02.04.2024 yildagi 05–24/642–son ma'lumotnomasi). Natijada korxonadagi mavjud issiqlik energiyasidan foydalangan holda, Zeebek effekti asosida ishlaydigan termoelektrik generatorlardan rele himoyasi va avtomatik boshqarish jihozlari uchun operativ tok manbasi sifatida foydalanilib, elektr energiyasining tejalishidan kutilayotgan yillik iqtisodiy samaradorlik 5460000 (besh million oltmish ming) so'mni tashkil etgan.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Dissertatsiya ishining natijalari 6 ta xalqaro va 7 ta respublika miqyosidagi anjumanlarda bayon etilgan va muhohakamadan o'tkazilgan.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinishi. Dissertatsiya materiallari asosida 26 ta ilmiy ishlar, shu jumladan, 1 ta monografiya, xorijiy jurnallarda 3 ta va respublika jurnallarida 6 ta maqola, ulardan 7 ta maqola O'zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasi tomonidan doktorlik dissertatsiyalarining asosiy ilmiy natijalarini chop etish uchun tavsiya etilgan jurnallarda chop etilgan. EHM uchun dasturiy mahsulotlarga 3 ta sertifikat olingan.

Dissertatsiyaning hajmi va tuzilishi. Dissertatsiya ishi kirish, 4 ta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati va ilovalarni o'z ichiga olgan holda 133 betni tashkil etadi.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Kirish qismida ishning dolzarbligi va zarurati asoslangan, mamlakatimizda fan va texnikani rivojlantirishning asosiy ustuvor yo'nalishlariga mos kelishi ko'rsatilgan, dissertatsiya mavzusiga aloqador muammoning o'rganilganlik darajasi, xorijiy va vatanimizdagi ilmiy tadqiqotlar natijalari tahlil qilingan, tadqiqotning maqsad va vazifalari, ob'ekti va predmeti tavsiflangan, tadqiqotning ilmiy yangiligi va amaliy natijalari bayon qilingan, olingan natijalarning ilmiy va amaliy ahamiyati asoslangan, tadqiqot natijalari amaliyotga joriy qilinganligi, ishni aprobatsiyadan o'tganligi, chop etilgan ilmiy ishlar va dissertatsiyaning hajmi va tuzilishi bo'yicha qisqacha ma'lumotlar keltirilgan.

"Termoelektr bo'yicha tadqiqot ishlarining zamonaviy holati" deb nomlangan **birinchi bobda**, termoelektrik energiyani olish usullari holati tahlil etilgan. Qayta tiklanadigan, ekologik toza va atrof-muhitni ifloslantirmaydigan sifatli elektr energiyasini ishlab chiqarishning printsiplial jihatdan yangi usullarini olish amalga oshirilgan. Samaradorligi yuqori termoelementlarning shoxchalarini tayyorlash uchun yarimo'tkazgichli materiallarni olishning texnologik usullari taqqoslangan. Termoelektrik moddalarni olishning rivojlangan usullarini o'rganish orqali kelajakdagi tadqiqot muammolari aniqlandi. Shu sababli, kichik va o'rta

energetikada termoelektr ta'minot manbalaridan tobora ko'proq foydalanilmoqda. Ushbu ma'lumotlar asosida bir qator vazifalar belgilab olindi.

“Termoelement shoxchalarining elektrofizik parametrlarini modellashtirish” deb nomlangan **ikkinchi bobda**, termoelektr generatorlari rivojlanishining har bir bosqichida amalga oshiriladigan issiqlik-energetik hisoblash uchun tenglamalar va munosabatlar tizimining ayrim xususiyatlarini hisobga oladigan maxsus yechim usullari ko'rib chiqildi. Hisob-kitoblarning asosiy maqsadi tanlangan elementlarning taqdim etilgan qabul qilish shartlari uchun yetarli bo'lgan barcha qismlarni va o'lchamlarini tanlashdir. Ushbu usullardan foydalanib, termoelektrik materialdan tayyorlangan termoelement modellashtiriladi. Termoelektrik materiallarni tanlash termoelektrik samaradorlik Z ning haroratga bog'liqligi bilan aniqlandi. Termoustunni hisoblash uchun o'rtacha parametrlar usulidan foydalanilgan.

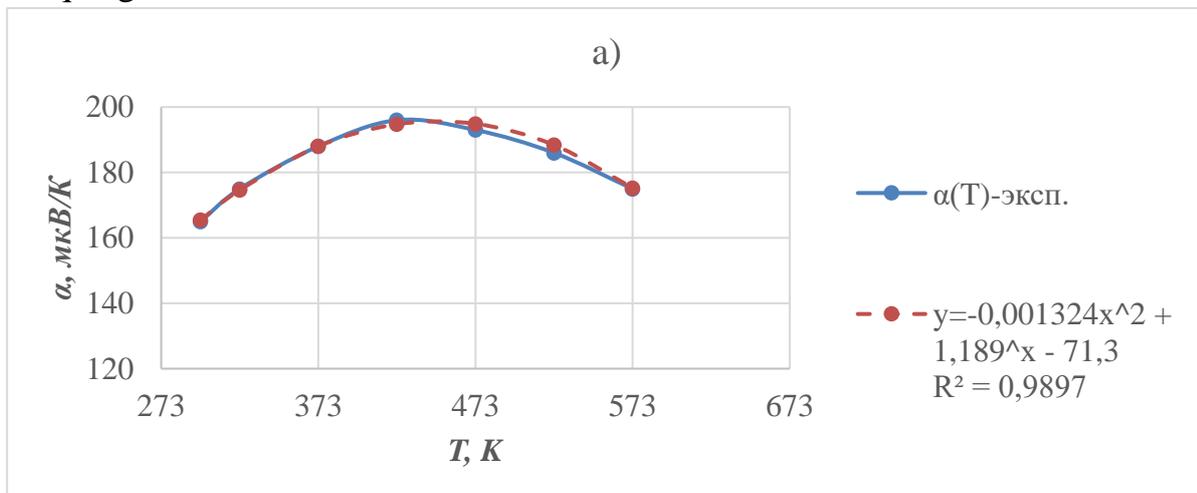
Ushbu usul yordamida Q_0 i Q_1 issiqlik oqimlari shuningdek, V kuchlanishda, α , χ , ρ o'zgarma qiymatlarida va termoelektrik materiallarning xususiyatlari T_0 dan T_1 gacha bo'lgan harorat oralig'ida, ularning haroratga bog'liqligini e'tiborsiz qoldirib bo'lmaydigan holatida hisob-kitoblar amalga oshirildi. Misol uchun, 85%og'ir. Bi_2Te_3 -15%og'ir. Bi_2Se_3 +0,04 mol.% TeI_4 qotishmasi uchun termoEYuK koeffitsienti va solishtirma elektr qarshiligi 300 – 600 K harorat oralig'ida quyidagi funktsiyalar bo'yicha qoniqarli tarzda approksimatsiyalanadi

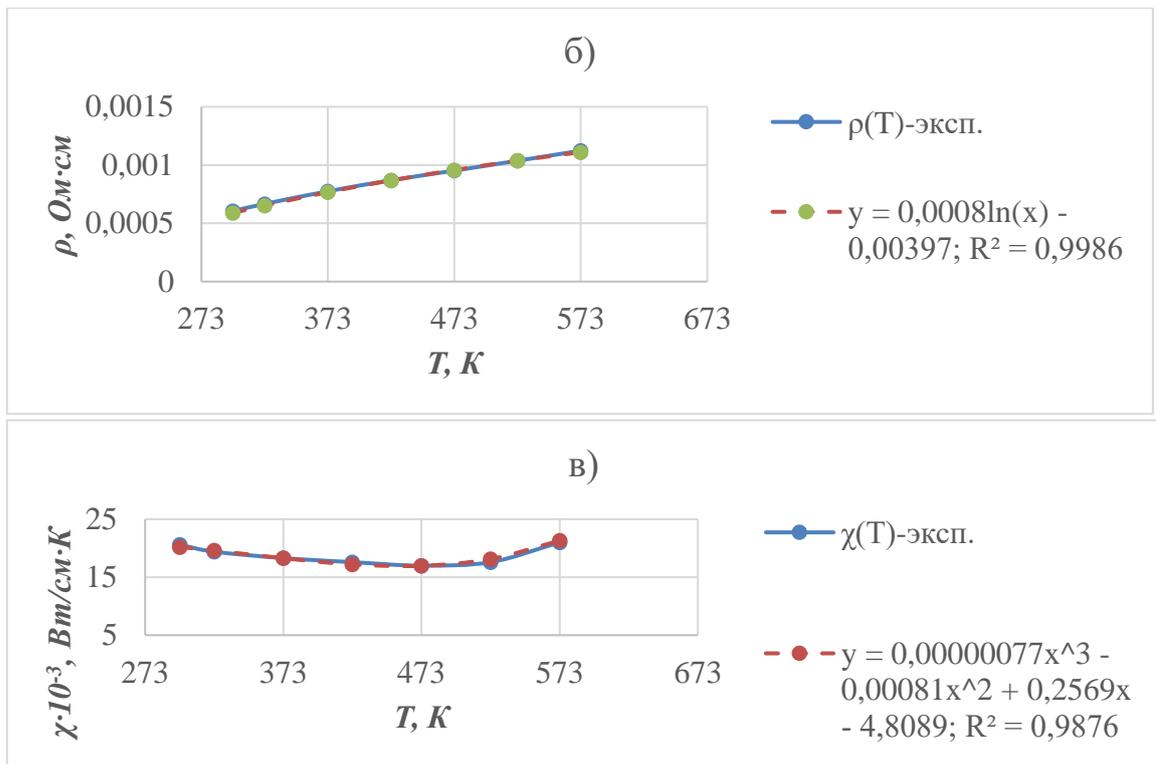
$$\alpha(T) = -0,001324x^2 + 1,189x - 71,3$$

$$\rho(T) = 0,0008\ln(x) - 0,00397$$

$$\chi(T) = 0,00000077x^3 - 0,00081x^2 + 0,2569x - 4,8089 \quad (1)$$

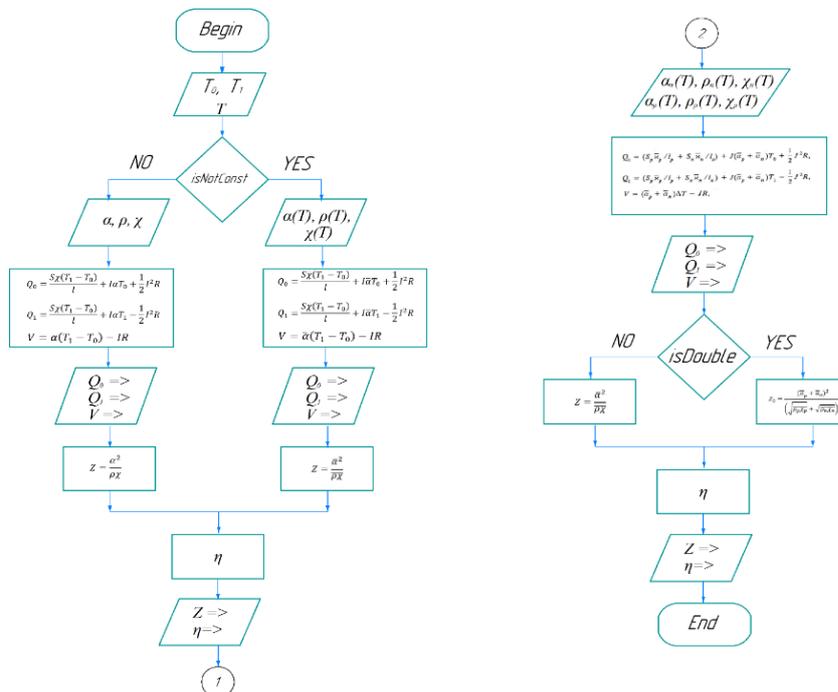
1-rasmda ko'rsatilgan approksimatsiya Microsoft Excel yordamida 2, 3 darajali polinom va logarifmik trend chizig'i yordamida qurilgan. Approksimatsiyaning ishonchlilik qiymati R^2 bilan belgilanadi (1-rasmdagi shtrix chiziq). Natijalardan ko'rinib turibdiki, termoEYuK, solishtirma qarshilik va issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsientlari haqiqiy qiymatlardan 2% dan ko'p bo'lmagan hatolik bilan aniqlangan.





1-rasm. 85%og‘ir. Bi_2Te_3 – 15%og‘ir. Bi_2Se_3 + 0,04 mol.% TeI_4 n-tipidagi yarimo‘tkazgichli qotishmaning termoEYuK koeffitsienti (a), solishtirma elektr qarshiligi (b) va issiqlik o‘tkazuvchanlik koeffitsienti (c)ning haroratga bog‘liqligi. Approksimasiya shtrixlar bilan ko‘rsatilgan (1)

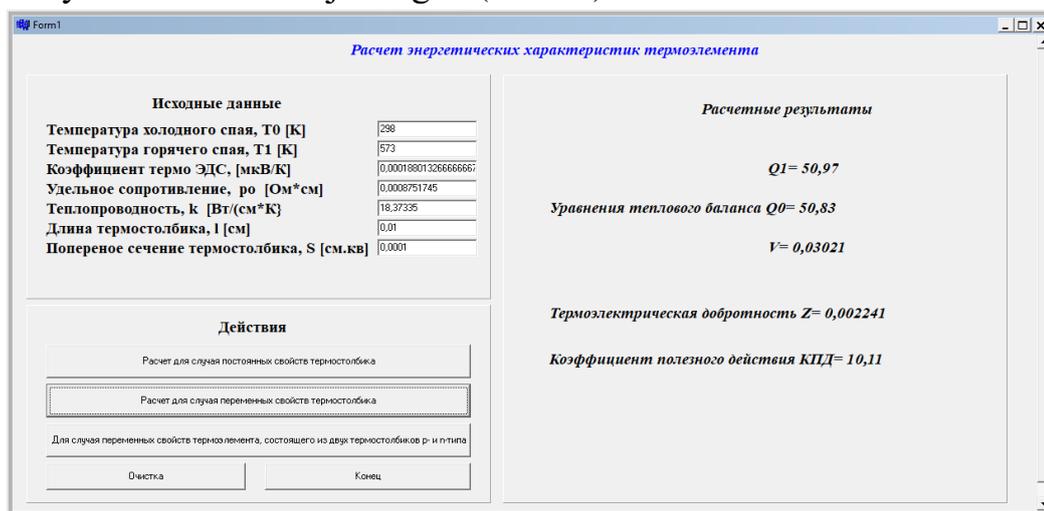
Algoritmi tuzishda termoelektrik batareyaning ishlash xususiyatlari hisobga olingan.



2-rasm. Termoelektrik effektlar bilan bog‘liq bo‘lgan materiallar xossalari va kattaliklarini hisoblash uchun dasturiy ta‘minot algoritmi.

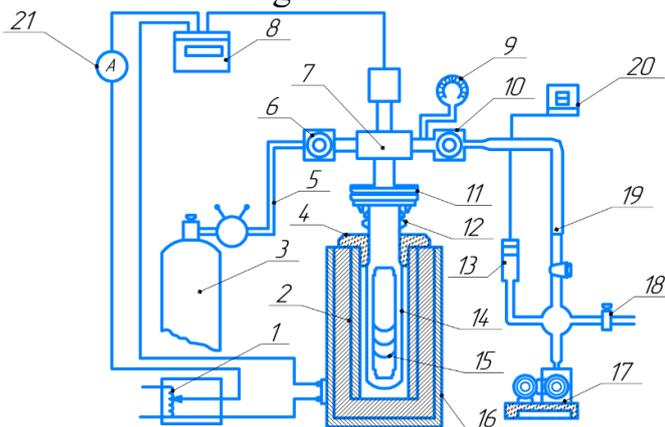
Issiqlik o'tkazuvchanligi bilan solishtirganda issiqlik oqimlariga termoelektrik effektlarning hissasi, material xususiyatlarining haroratga bog'liqligi (ya'ni Peltze, Tomson va Joule effektlari tufayli issiqlik ajralishi) yuqorida tavsiflangan hisob-kitoblarga asoslanib, haroratlarni aniqlagandan so'ng, materiallarning xususiyatlari va termoelektrik ta'sirlar bilan bog'liq miqdorlar aniqlanadi. 2-rasmda dasturiy ta'minotning ishlash algoritmi keltirilgan.

Dastur C++ Builder 6 da ishlab chiqilgan bo'lib, Windows XP va undan keyingi versiyalari uchun mo'ljallangan (3-rasm).



3-рasm. Dasturning tashqi ko'rinishi

“Vertikal tigellarda qotishma olish uchun texnologik qurilmani tuzilishi va tadqiqot natijalari” deb nomlangan **uchinchi bobda** yarimo'tkazgichli termoelektrik materiallar, vertikal tigelda legirlovchi qo'shimchalar bilan inert gazi ostida eritish orqali yarim elementlarni tayyorlashning texnologiyasi keltirilgan, qurilmaning sxemasi 4-rasmda ko'rsatilgan.



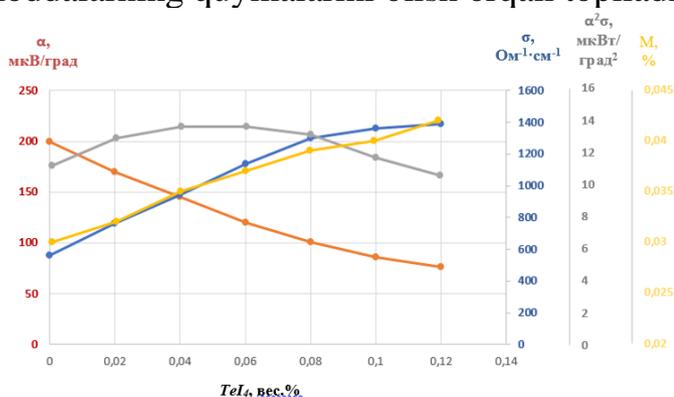
4-рasm. Inert gaz bosimi ostida termoelektrik materiallarni eritish uchun mo'ljallangan qurilmaning prinsipial sxemasi

n-tipli $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Bi}_2\text{Se}_3$ va p-tipli $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Sb}_2\text{Te}_3$ qotishmalarni olish uchun turli xil tozalikdagi materiallar tayyorlanadi va po'lat gilzaga solingan kvarts tigelga yuklanadi. Keyin gilzada 10^{-2} mm.sim.ust. gacha bo'lgan vakuum hosil qilinadi.

Shundan so‘ng, argon gilzaga 152 kPa gacha to‘ldiriladi, so‘ngra boshlang‘ich komponentlarni eritish uchun sandon 1023 K ga qadar qizdiriladi va bu harorat 20 daqiqa davomida saqlanadi. Bunday holda, qotishma inert gaz (argon) bosimi ostida bo‘ladi va 1023 K haroratda uning bosimi 405-406 kPa ga yetadi. Belgilangan vaqt o‘tgandan so‘ng, sandon tarmoqdan uziladi. Gilzaga havo kiritiladi va kvarts tigel chiqariladi.

Termogeneratorlar uchun mo‘ljallangan termoelektrik materialni presslash ikki bosqichda amalga oshirildi: sovuq – 5,7 t/sm² bosimda va issiq – 633 K haroratda. Presslash bosimi 5 daqiqa davomida ushlab turish orqali 4,6 t/sm² sifatida tanlandi.

Past haroratli n-tipli termoelektrik materialning tarkibi 85%og‘ir. Bi₂Te₃ va 15%og‘ir. Bi₂Se₃, quyidagicha Bi-55,186%og‘ir., Te-38,663% og‘ir., Se-6,151% og‘ir., tanlangan. Asosning termoelektrik xususiyatlarini o‘zgartirish uchun, shuningdek, legirlovchi qo‘shimchani optimal kontsentratsiyasi ham o‘zgartirilishi kerak. Odatda, ma‘lum termoelektrik xususiyatlarga ega bo‘lgan asosni olish uchun legirlovchi moddaning optimal kontsentratsiyasini aniqlash turli xil kontsentratsiyali moddalarning quymlarini olish orqali topiladi.



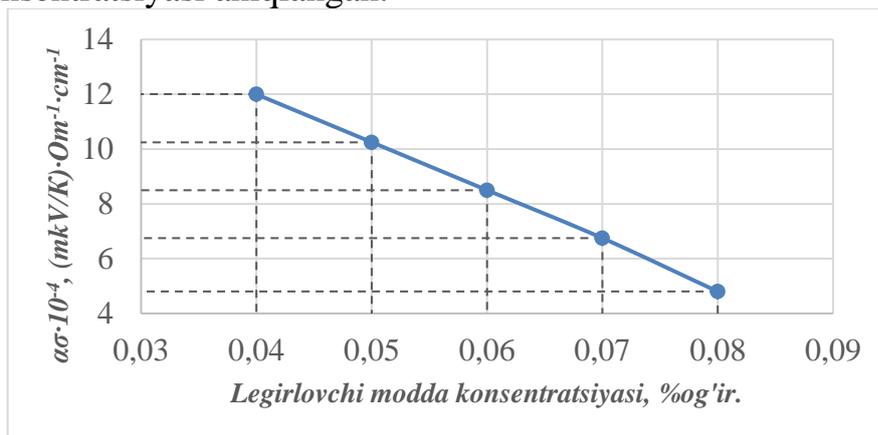
5-rasm. σ , α , $\alpha^2\sigma$ va M ko‘rsatkichlarining TeI_4 konsentratsiyasiga bog‘liqligi grafiklari

O‘tkazilgan tajribalarga ko‘ra, har bir qotishma modda uchun shixtaga kiritiladigan legirlovchi moddaning optimal kontsentratsiyasi mavjudligini ko‘rish mumkin. Kiritilayotgan legirlovchi modda TeI_4 ning konsentratsiyasi 0 mol.% – 0,12 mol.%, oraliqda o‘zgarib borgan (5-rasm).

Olingan natijalardan 6-rasmda keltirilgan nomogrammani qurishda foydalanilgan. Keltirilgan nomogramma bo‘yicha $\sigma = 1150 \text{ Om}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$, $\alpha = 196 \text{ mKV/grad}$ ga mos keladigan optimal termoelektrik xossalarga ega bo‘lgan legirlangan materialni olish uchun, shixtaga legirlovchi moddaning (tellur tetraiodidi) qanday optimal kontsentratsiyasini kiritish kerakligini aniqlash mumkin.

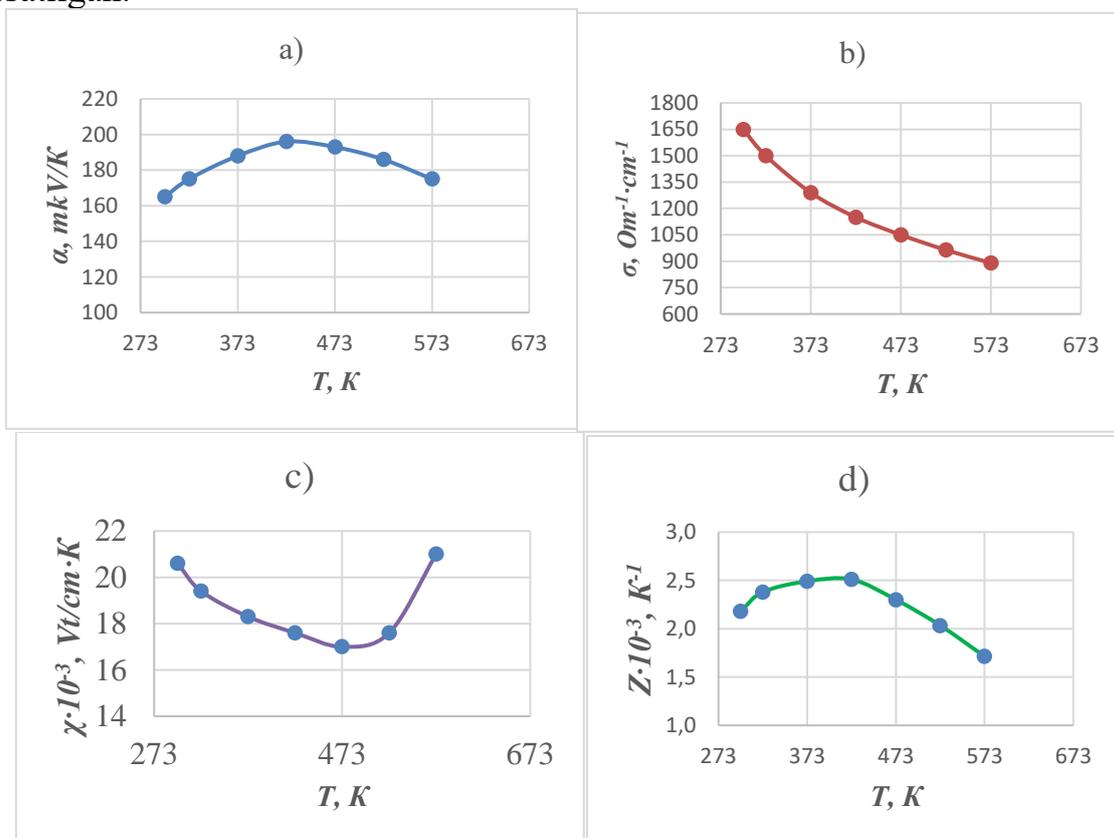
Nomogrammaning ordinata o‘qida termoEYuK ko‘effitsienti va elektr o‘tkazuvchanlik ko‘paytmasi, absissa o‘qida esa kiritilgan legirlovchi moddalar - tellur tetraiodidining konsentratsiyasi qo‘yilgan (6-rasm). Shunday qilib, ushbu sinab ko‘rish uchun olingan xom ashyo materiallaridan asos olish uchun eritib, xona haroratida yarim elementlarning σ va α qiymatlarini o‘lchangan. Shundan so‘ng, ushbu parametrlarni ko‘paytirib, nomogrammadan optimal xususiyatlarga ega

materialni olish uchun qotishma ichiga kiritilishi kerak bo'lgan legirlovchi moddaning konsentratsiyasi aniqlangan.



6-rasm. Bi_2Te_3 - Bi_2Se_3 asosining xossalariga bog'liq ravishda legirlovchi modda tellur tetrayodidi (TeI_4)ning optimal konsentratsiyasini aniqlash uchun nomogramma.

Ishlash jarayonida termoelektrik materiallar doim yuqori haroratlar ostida bo'lganligi sababli, ularning issiq uchi haroratini o'zgartirish orqali termoelektrik xususiyatlarini tekshirish kerak. 7-rasmda termoEYuK koeffirsiyenti, elektr o'tkazuvchanligi va issiqlik o'tkazuvchanligining haroratga bog'liqligini natijalari ko'rsatilgan.



7-rasm. Briketlarning termoelektrik tavsifnomalarini haroratga bog'liqlik grafiklari (a) termoEYuK koeffitsiyenti α ; (b) solishtirma elektr o'tkazuvchanligi σ ; (c) issiqlik o'tkazuvchanligi χ ; (d) termoelektrik samaradorlik Z

Shunday qilib, o'tkazilgan tadqiqotlar natijasida, tarkibi 85%og'ir. Bi_2Te_3 - 15%og'ir. Bi_2Se_3 bo'lgan 0,04 mol.% TeI_4 legirlovchi modda kiritilgan termoelektrik materialning termoelektrik samaradorligi $Z=2,2 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ (298 K) dan $1,7 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ (573 K) gacha o'zgaradi. Termoelektrik samaradorlikning maksimal qiymati $Z=2,55 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ (423 K) ni tashkil etgan.

p-tip tarkibiga mos keladigan qotishma materialni olish uchun 70%og'ir. Sb_2Te_3 , 30%og'ir. Bi_2Te_3 proporsiya yo'li bilan quyidagi miqdorda: Bi - 15,67% og'ir., Te - 57,18% og'ir., Sb - 27,15% og'ir. aniqlangan. Legirlangan qo'shimcha sifatida Cd dan foydalanilgan. Shixtaga kadmiy 0,1 mol.% dan 0,4 mol.% miqdorda kiritilgan. 8-rasmda olingan legirlangan materiallarning termoelektrik xususiyatlari ko'rsatilgan. Rasmdan ko'rinib turibdiki, legirlangan qo'shimchalar konsentratsiyasi olingan materiallarning termoelektrik xususiyatlari bilan chiziqli bog'langan.

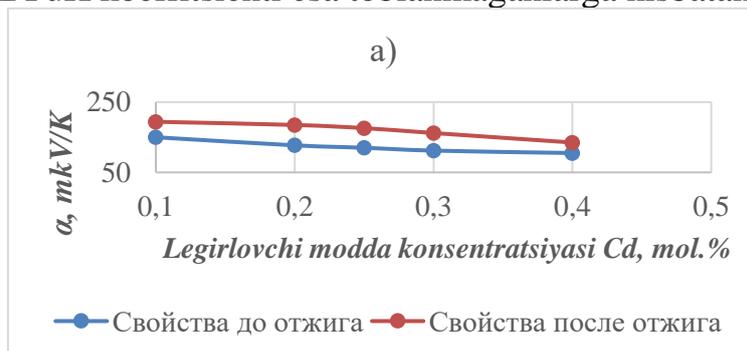
Tadqiqot uchun turli xil konsentratsiyaga ega bo'lgan kadmiyli yarim elementlar tayyorlangan. 1-jadvalda hona haroratida toblanishdan oldin va keyingi yarim elementlarning solishtirma elektr o'tkazuvchanligi va termoEYuK koefitsientining natijalari keltirilgan.

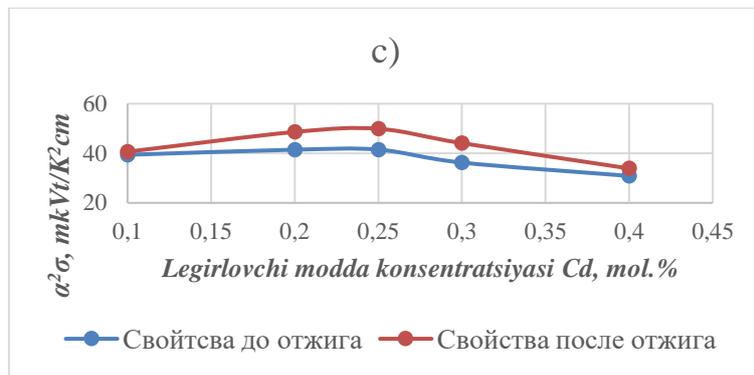
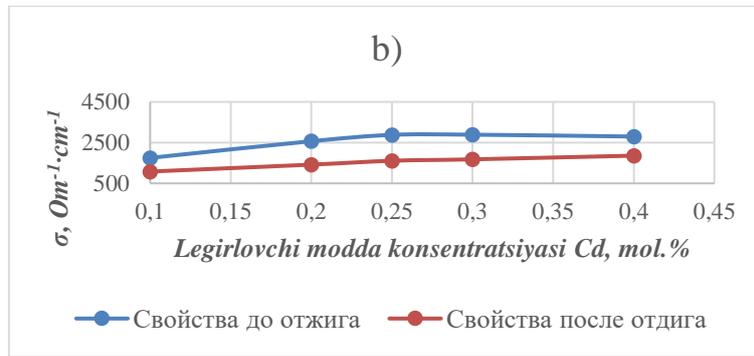
1-jadval

Hona haroratida yarim elementlarning termoelektrik xususiyatlariga kiritilgan legirlangan qo'shimcha konsentratsiyasining bog'liqligi

Tarkib	Legirlovchi modda konsentratsiyasi Cd, mol.%	Toblashgacha			Toblashdan so'ng		
		σ $\text{Om}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$	α mkV/K	$\alpha^2 \sigma$ mkV/K ² cm	σ $\text{Om}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$	α mkV/K	$\alpha^2 \sigma$ mkV/K ² cm
30% mol. Bi_2Te_3 70% mol. Sb_2Te_3	0,1	1750	150	39	1080	194	40
	0,2	2570	127	41	1420	185	48
	0,25	2880	120	41	1610	176	49
	0,3	2890	112	36	1680	162	44
	0,4	2800	105	30	1860	135	33

Jadvaldan ko'rinib turibdiki, kiritilgan legirlangan qo'shimchanning konsentratsiyasi ortishi bilan toblanishdan oldin yarim elementlarning solishtirma elektr o'tkazuvchanligi ortadi, termoEYuK koefitsienti pasayadi. Yarim elementlarni toblanishidan so'ng ularning solishtirma elektr o'tkazuvchanligi pasayadi, termoEYuK koefitsienti esa toblanmaganlarga nisbatan ortadi.

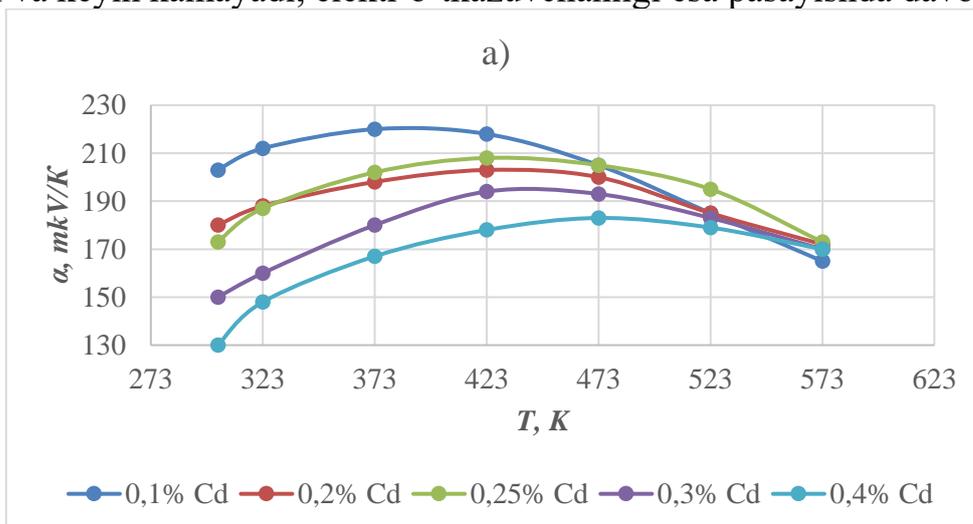


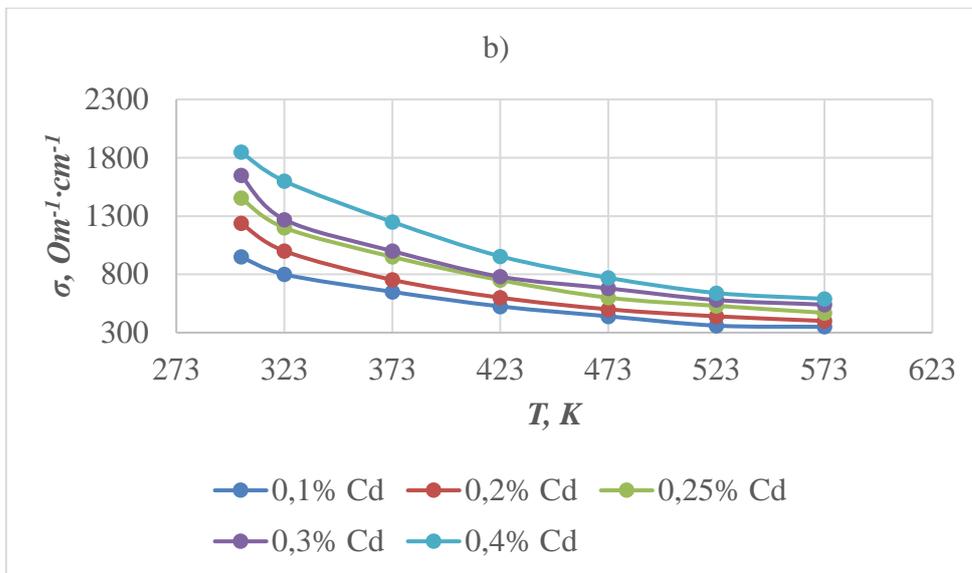


8-rasm. Cd% og'ir., konsentratsiyasi o'zgarishiga σ , α , $\alpha^2\sigma$ qiymatlarining bog'liqlik grafigi

Haroratning o'zgarishi bilan solishtirma elektr o'tkazuvchanligi va termoEYuK koeffitsientini o'rganishda (9-rasm) haroratning ortishi bilan dastlabki davrda solishtirma elektr o'tkazuvchanligi pasayib, termoEYuK koeffitsienti ortishi aniqlandi.

Haroratning orttirib borilishi bilan termoEYuK koeffitsienti maksimal darajaga yetadi va keyin kamayadi, elektr o'tkazuvchanligi esa pasayishda davom etadi.

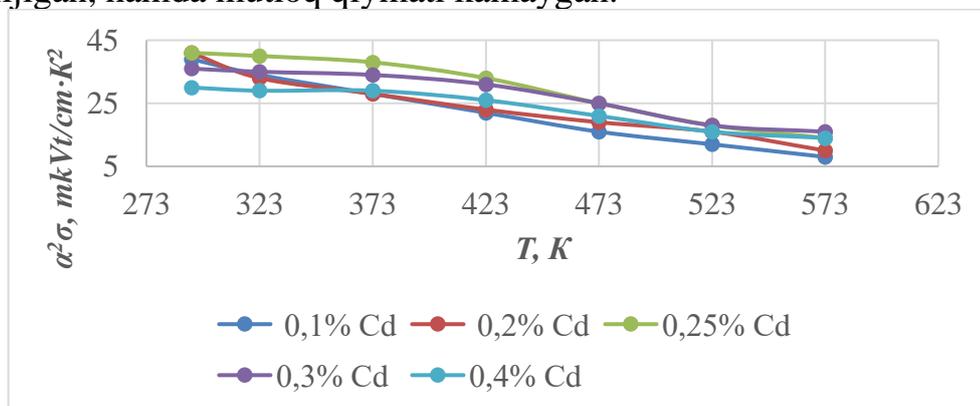




9-rasm. Harorat o'zgarishi bilan kiritilayotgan legirlovchi modda – kadmiy konsentratsiyasining termoEYuK koeffitsienti (a) va solishtirma elektr o'tkazuvchanligi (b)ga ta'siri

Haroratning o'zgarishi bilan $\alpha^2\sigma$ qiymatining o'zgarishi 10-rasmda ko'rsatilgan. Rasmdan ko'rinib turibdiki, Cd konsentratsiyasi 0,25 mol.% da qo'shilgan namunaning $\alpha^2\sigma$ qiymati uchun eng yaxshi ko'rsatgichga ega bo'lgan.

Legirlangan qo'shimcha konsentratsiyasining α va σ ning haroratga bog'liq ravishda o'zgarishiga ta'sirini o'rganish shuni ko'rsatadiki, legirlangan qo'shimcha konsentratsiyasining ortishi bilan termoEYuK maksimumi yuqori haroratlar tomonga siljigan, hamda mutloq qiymati kamaygan.

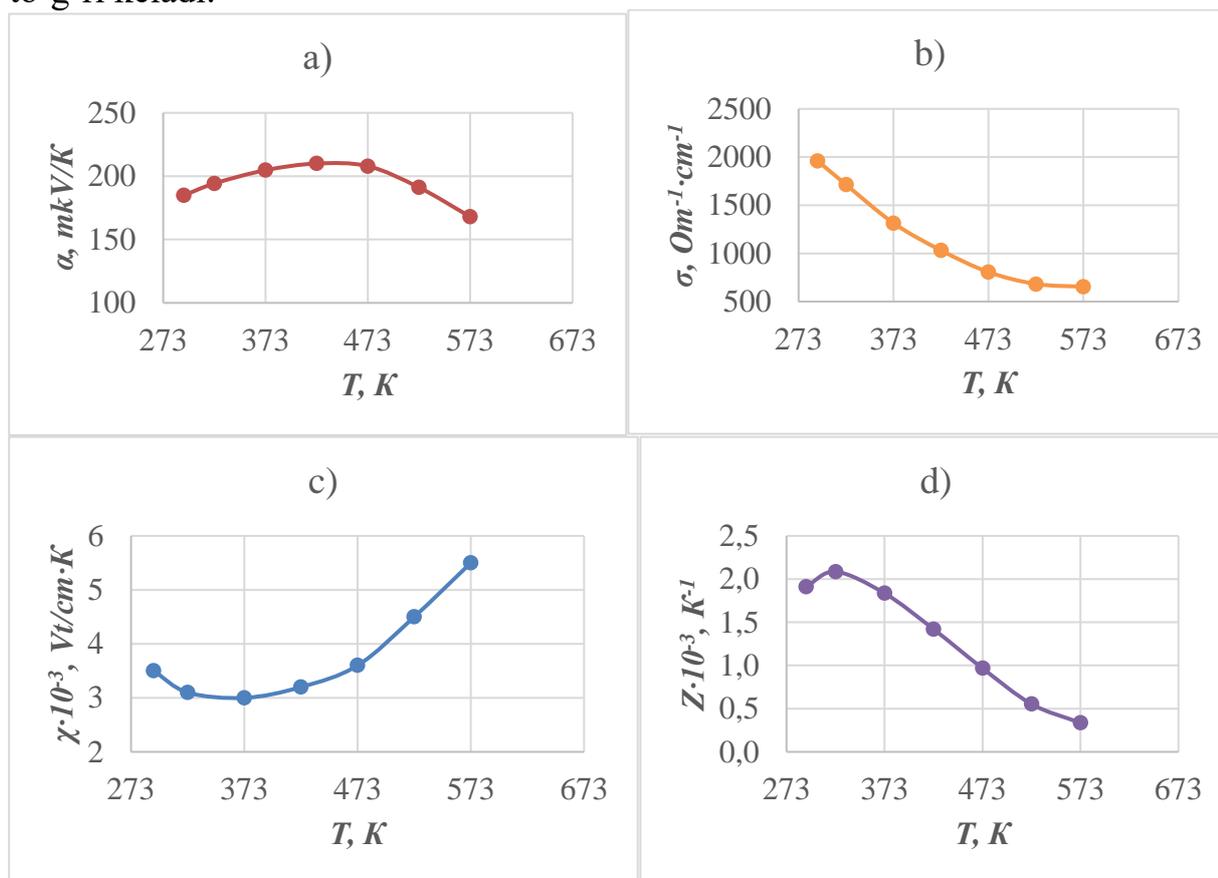


10-rasm. Harorat o'zgarishi bilan, kiritilgan legirlangan qo'shimcha - kadmiyning konsentratsiyasiga qarab, $\alpha^2\sigma$ ni o'zgarishini bog'liqligi

Egri chiziqlar: 1 – 0,1% Cd, 2 – 0,2% Cd, 3 – 0,25% Cd, 4 – 0,3% Cd, 5 – 0,4% Cd.

Kadmiy (Cd) bilan legirlangan $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Sb}_2\text{Te}_3$ asosning termoelektrik xossalarini haroratga bog'liqligi va 293K dan 573K gacha bo'lgan harorat oralig'ida legirlangan quymani termoelektrik xossalarining o'zgarishini tadqiqot natijalari 11-rasmda keltirilgan. Rasmdan ko'rinib turibdiki, termoelektrik samaradorlik $Z =$

$2,1 \cdot 10^{-3} K^{-1}$ ning maksimal qiymati 293K dan 373K gacha haroratlar intervaliga to‘g‘ri keladi.



11-rasm. Briketlarning termoelektrik xossalarini haroratga bog‘liqlik grafiklari (a) termoEYuK koeffitsienti α ; (b) solishtirma elektr o‘tkazuvchanligi σ ; (c) issiqlik o‘tkazuvchanligi χ ; (d) termoelektrik samaradorlik Z.

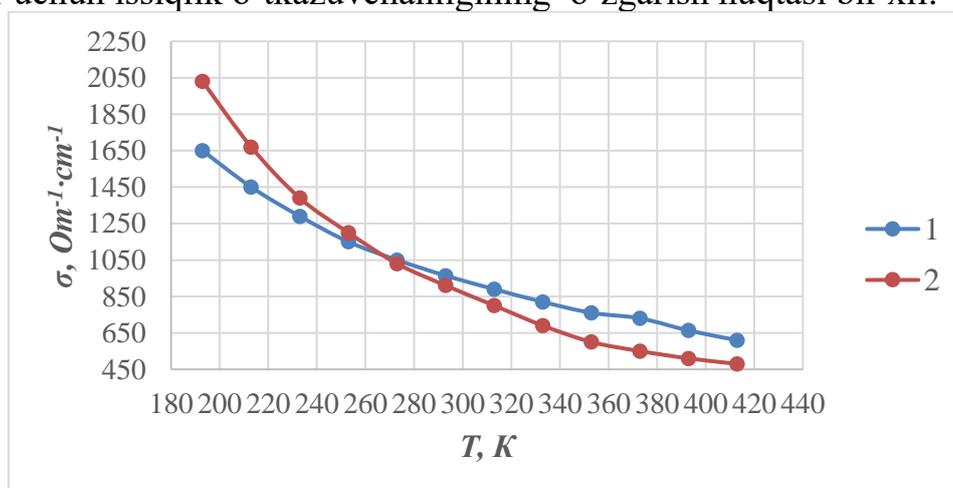
Ushbu texnologiyalar yordamida qotishmalarni olish uchun eritish jarayonida maxsus aralashtirish amalga oshirilmagan. Quymalarning uzunligi bo‘ylab termoelektrik xossalarining bir xilligi yuqorida aytib o‘tilganidek, tigeldagi shixta komponentlarini tanlangan joylashuvi tufayli tabiiy aralashtirish orqali erishilgan. Buning uchun 500 g miqdoridagi eritilgan moddaning hosil bo‘lgan quymasi 50 g.li teng qismlarga bo‘lingan va har bir qismdan yarim element tayyorlangan. O‘tkazilgan tadqiqotlar shuni ko‘rsatdiki, quymalarni termoelektrik xossalarining uzunligi bo‘yicha bir xilligi amaliy talablarga to‘liq javob beradi. Xossalar bo‘yicha tarqoqligi 3% dan oshmaydi.

“Gorizontal zonali eritish yo‘li bilan yarim elementlar uchun materiallarni olish texnologiyasi va tadqiqot natijalari” deb nomlangan to‘rtinchi bobda Uch qorishmali $(\text{Bi}, \text{Sb})_2(\text{Te}, \text{Se})_3$ asosidagi termoelektrik materiallarni gorizontal zonali eritish orqali namunalarni tayyorlash texnologiyasining muqobil usuli keltirilgan. Zonali eritishning afzalliklari ham bor, chunki kristallanish jarayonida harorat zonali bo‘ylab erish natijasida olingan namunalarda yaxshi panjara hosil qiladi. Bundan tashqari, yoriqlar, deformatsiyalar va

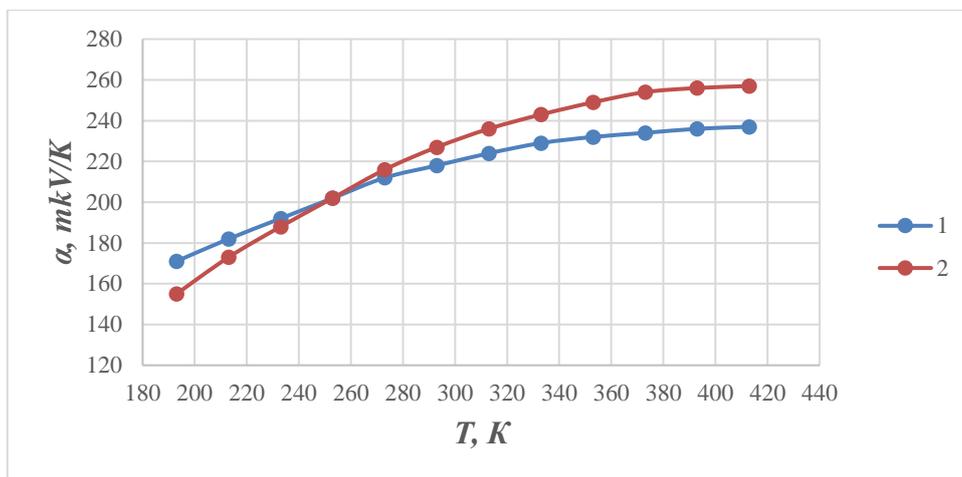
qotishma aralashmalarning notekis taqsimlanishi kabi nuqsonlarning shakllanishi deyarli kuzatilmaydi.

n- va p-tipli qotishma olish uchun xuddi presslash usuli uchun tanlangan tarkib tanlandi. Boshlang'ich materiallar kvarts tigelga joylashtiriladi va erish zonasiga kiritiladi. Harorat rejimiga ko'ra, zona besh qismdan iborat. Uchinchi zona eng yuqori haroratga to'g'ri keladi, chunki bu bosqichda eritilgan tarkibiy qismlarning yaxshi erishiga erishish, ularni aralashtirish va kerakli tuzilmani shakllantirish kerak. Taglikning harakat tezligi 15-20 mm/soat oralig'ida bo'lgan. Eritilayotgan materialning harorati, taglikning pastki qismida 0,18 mm diametrli teshikcha ichiga qatirilgan termopara bilan o'lchandi. Eritma tayyor bo'lgach, uning qisman sovishi haroratning asta-sekin pasayishi bilan kamera ichida amalga oshirildi. Oxirgi jarayon qolgan ikkita zonada amalga oshiriladi, bu yerda kamera bo'ylab eksponensial harorat gradienti saqlanadi. So'ng yetarli darajadagi issiq qotishma kameradan olinadi va kesish uchun yuboriladi. Moddani kesish elektr uchqun kesish qurilmasida amalga oshiriladi. Termoelement shoxchalari $4 \times 4 \times 7 \text{ mm}^3$ o'lchamlarda kesilgan. Shoxchalarning ikkinchi partiyasi quyidagi o'lchamlarda tayyorlangan: $4 \times 4 \times 14 \text{ mm}^3$.

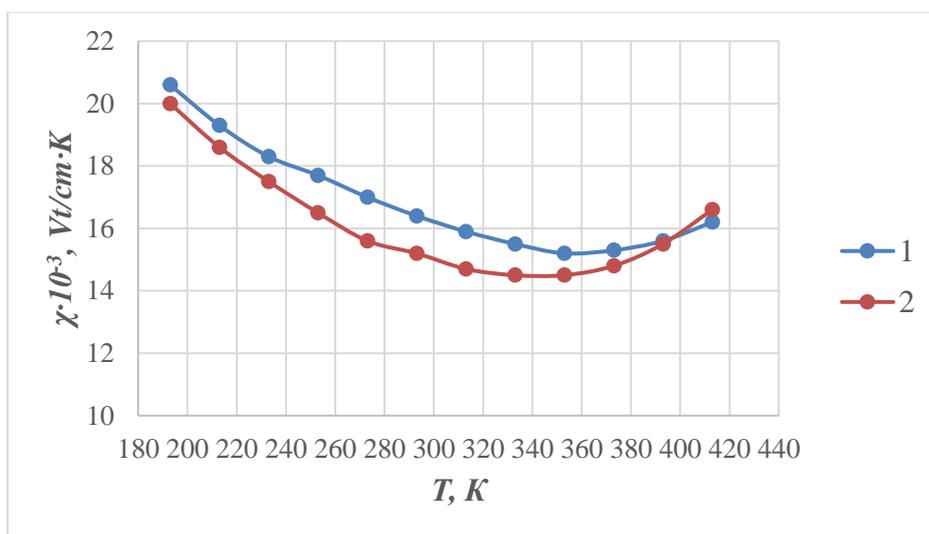
Tajribaga ko'ra, har ikkala turdagi o'tkazuvchanlikka ega bo'lgan shoxchalarda harorat ortishi bilan elektr o'tkazuvchanligi eksponensial ravishda kamayishi aniqlandi (12-rasm). Bundan tashqari, elektron o'tkazuvchanlikka ega bo'lgan material uchun σ ning pasayishi (egri chiziq 1) kovakli o'tkazuvchanlikka ega bo'lgan moddaga qaraganda ancha sekinroq (egri chiziq 2) bo'ladi. Ushbu xususiyatlarning haroratga bog'liqligi 420 K gacha o'rganildi. Shu bilan birga, deyarli bir xil tarzda, termoelektr yurituvchi kuch koeffitsienti ortadi (12-rasm). n-tiptan farqli o'laroq, p-tipli materialdagi bu koeffitsient tezroq o'sadi. Issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsientining pasayishi o'tkazuvchanlikning ikkala turi uchun ham kuzatiladi (13-rasm). Koeffitsientlar qiymatlarini solishtirganda, eng katta χ qiymatlari elektron o'tkazuvchanlikka ega bo'lgan shoxchalarga mos kelishi aniqlandi. Biroq, $T \approx 360 \text{ K}$ ga erishishi bilan bu parametr ortadi. Ikkala turdagi moddalar uchun issiqlik o'tkazuvchanligining o'zgarish nuqtasi bir xil.



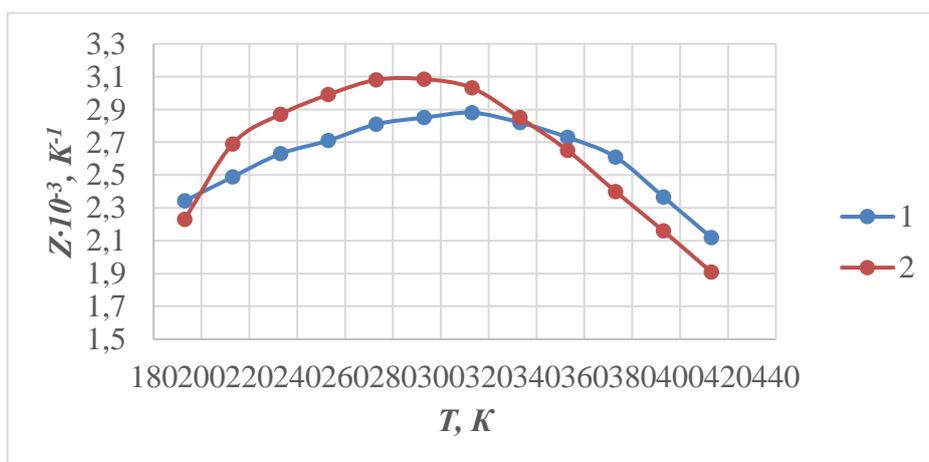
12-rasm. Termobatareya shoxchalarining elektr o'tkazuvchanligini haroratga bog'liqligi. 1-n-tip, 2-p-tip.



13-rasm. Termobatarya shoxchalarining termoEYuK koeffitsiyentini haroratga bog‘liqligi. 1-n-tip, 2-p-tip.



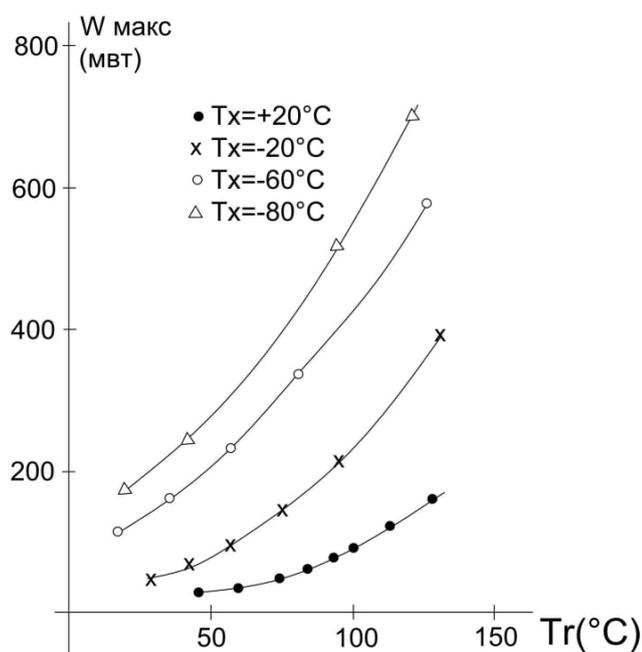
14-rasm. Termobatarya shoxchalarining issiqlik o‘tkazuvchanligini haroratga bog‘liqligi. 1-n-tip, 2-p-tip.



15-rasm. Termobatarya shoxchalarining termoelektrik samaradorligini haroratga bog‘liqligi. 1-n-tip, 2-p-tip.

Materialning termoelektrik samaradorligiga kelsak, kovakli o'tkazuvchanlikka ega bo'lgan shoxchalar, mutlaq noldan va xona harorati oralig'ida $Z=3,1 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ qiymatlarga ega ekanligini ko'rish mumkin, bunda elektron o'tkazuvchanlikka ega bo'lgan shoxchalar $Z=2,85 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ ga teng bo'ladi. Maksimal samaradorlik qiymatiga 310 K da $Z=2,9 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ gacha erishiladi (13-rasm).

Termobatareya yuklamasida generatsiya bo'layotgan maksimal quvvatni tadqiqotlarda o'lchangan qiymatlari, uzluksiz o'sib borayotganligini ko'rsatdi. 16-rasmda termobatareyaning foydali quvvatini, sovuq uchining harorati o'zgarmas saqlangan holda va issiq uchining haroratiga bog'liqligi ko'rsatilgan. Rasmdan ko'rinib turibdiki, issiq uchining haroratini ortishi bilan va natijada issiq va sovuq uchlari orasidagi harorat farqining ortishi bilan foydali elektr quvvatini qiymati ortadi.



16-rasm. Termoelektrik o'zgartirgichlarning yuklamasidagi elektr quvvatni haroratga bog'liqligi

XULOSA

Olib borilgan ilmiy-tadqiqot va texnologik-hisoblash ishlari natijalariga ko'ra quyidagi xulosalar qilindi:

1. Termogeneratorlar uchun mo'ljallangan BiTeSe va BiSbTe asosidagi termoelektrik materiallarni olishning optimal shartlari aniqlandi: kukunli presslash usulida $P=5,7 \text{ t/sm}^2$ bosim ostida va $T=293 \text{ K}$ da $5 \div 10$ daqiqa davomida, shuningdek gorizontali zonali eritish usulida $T=1023 \text{ K}$ da 20 daqiqa davomida.

2. $\sigma = 600 \div 200 \text{ Om}^{-1} \cdot \text{sm}^{-1}$, $\alpha = 200 \div 240 \text{ mkV/K}$ termoelektrik kattaliklarga ega bo'lgan tarkibiy komponentlarga 0,04 mol.% miqdorda qo'shilganda yuqori qaytariluvchanlik koeffitsientini ta'minlaydigan TeI_4 legirlovchi qo'shimchaning optimal konsentratsiyasini aniqlash uchun ishchi tenglama olindi va grafik taklif etildi.

3. Gorizontal zonali eritish usuli natijasida olingan n-Bi₂Te₃-Bi₂Se₃ materialiga TeI₄ qo‘shilishi uning termoelektrik samaradorligini presslash natijasida olingan namunalarga nisbatan 40% ga ortirishi aniqlandi.

4. Xona haroratida maksimal samaradorlik ko‘rsatgichiga ega bo‘lgan p-Bi₂Te₃-Sb₂Te₃ asosidagi materialni olish uchun, kiritilayotgan legirlovchi qo‘shimcha Cd ning optimal konsentratsiyasi 0,25 mol.% tashkil etishi kerakligi aniqlandi. Natijada termoelektrik samaradorlik presslangan na‘munalarga nisbatan ~50 % ga ortdi.

5. 300÷600 K harorat intervalida maksimal quvvat va FIKga ega bo‘lgan p- va n-tipli ikkita termoelementlarning energetik tavsiflarini hisoblash uchun ishlab chiqilgan matematik model asosida algoritm va dasturiy ta‘minot ishlab chiqildi.

6. p-Bi₂Te₃-Sb₂Te₃ asosidagi 0,1 mol.% miqdorida Cd bilan legirlangan termoelementlarni 663 K harorat ostida toblash, termoEYuK koeffitsientining qiymatini 30% ga ortishiga olib kelishi aniqlandi.

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

ФЕРГАНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ЛАТИПОВА МУХАЙЁ ИБРАГИМЖАНОВНА

**РАЗРАБОТКА СПОСОБА ПОВЫШЕНИЯ ДОБРОТНОСТИ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ BiTeSe-BiSbTe**

01.04.10 – Физика полупроводников

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

Ташкент – 2024

Тема диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве Высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за номером B2023.3.PhD/T3800

Диссертация выполнена в Ферганском политехническом институте

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (www.ispm.uz) и Информационно-образовательном портале "ZiyoNet" (www.ziynet.uz).

Научный руководитель: Касимахунова Анархан Мамасадиковна
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Тагаев Марат Баймуратович
доктор технических наук, профессор
Тукфатуллин Оскар Фаритович
PhD по т.н., с.н.с.

Ведущая организация: Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова

Защита диссертации состоится 26 » 07 2024 года в 10 часов на заседании Научного совета DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 по присуждению ученых степеней при Научно-исследовательском институте Физики полупроводников и микроэлектроники Национального университета Узбекистана (Адрес: 100057, Узбекистан, г. Ташкент, ул. Янги Алмазар, дом 20. Тел: (+99871) 248-79-94, факс (+99871) 248-79-92, e-mail: info@ispm.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном Центре института (зарегистрирована за № 62) по адресу: 100057, Узбекистан, г. Ташкент, ул. Янги Алмазар, дом 20. Тел: (+99871) 248-79-59

Автореферат диссертации разослан «11» 07 2024.
(реестр протокола рассылки № 62 от 11.07 2024.)



Ш.Б. Угамурдова,

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

Ж.Ж. Хамдамов,

Учленный секретарь Научного совета по присуждению ученых степеней, PhD, с.н.с.

Н.А. Тургунов

Председатель научного семинара при Научном совете по присуждению ученых степеней, д.ф-м.н., доцент

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мире быстрое развитие теории и практики термоэлектрической техники, масштабное внедрение экологически чистых источников энергии, использование новых физических и технологических подходов к созданию высокоэффективных термоэлектрических материалов, устройств и источников энергии занимают одно из лидирующих мест. Использование термоэлектрических источников энергии в мировом масштабе требует внедрения устройств, позволяющих производить электроэнергию без загрязнения окружающей среды, а также обеспечивать электроэнергией отдаленные районы. В связи с этим для частичного удовлетворения спроса на энергию актуально использование автономных устройств, разработанных на основе термоэлектрических преобразователей энергии, способных напрямую преобразовывать любую тепловую энергию в электрическую.

В мире совершенствуются многие методы и технологии получения полупроводниковых соединений, проводятся научно-исследовательские работы, направленные на получение качественных термоэлектрических материалов для термогенераторов. В связи с этим особое внимание уделяется существующим методам основанным на технологию изготовления ветвей термоэлемента, изменению термоэлектрической добротности Z в зависимости от электрофизических параметров, по мнению большинства исследователей, многие существующие материалы с интегрируемыми термоэлектрическими свойствами считаются перспективными веществами, особое внимание уделяется введению в состав материалов легирующих веществ, изменению значений их параметров и регулировать их в определенной степени.

В нашей республике реализуются комплексные меры в связи с внедрением энергосберегающих технологий и развитием возобновляемых источников энергии и достигаются определенные результаты. Несмотря на то, что термоэлектрические генераторы заслуживают внимания по своим эксплуатационным и экономическим показателям, по их характеристикам, материалам и вопросам применения проводится относительно мало исследований по сравнению с другими странами. В рамках стратегии развития Узбекистана на 2022-2026 годы по пяти приоритетным направлениям определены важные задачи, связанные с активным внедрением энергоэффективных технологий во все отрасли экономики. При реализации этих задач, среди прочего, используются современные методы создания термоэлектрических устройств с использованием системного подхода, разработки новых составов термоэлектрических материалов путем экспериментального подбора компонентов путем введения легирующих добавок, а также приобретает все большее значение проведения исследований в области усовершенствования технологии производства термоэлектрических устройств.

Исходя из этого, данная диссертационная работа в определенной степени служит для практического выполнения задач, поставленных в Указах и постановлениях Президента Республики Узбекистан “О стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы” №УП-60 от 28 января 2022 года, указ Президента “О дополнительных мерах по внедрению энергосберегающих технологий и развитию возобновляемых источников энергии малой мощности” от 9 сентября 2022 года №УП-220, постановление Президента Республики Узбекистан “Об ускоренных мерах по повышению энергоэффективности отраслей экономики и социальной сферы, внедрению энергосберегающих технологий и развитию возобновляемых источников энергии” от 22 августа 2019 г. №ПП-4422 и другими нормативно-правовыми документами связанными с этой отраслью.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики Узбекистан III-«Энергетика, энергоресурсосбережение, транспорт, машино- и приборостроение; развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники, электронного приборостроения».

Степень изученности проблемы. К настоящему времени накоплен большой теоретический и экспериментальный материал по термоэлектричеству. Научные исследования в этой области проводятся ведущими учеными, такими как Т. Kajikawa и Y. Shinohara (Япония), L. Chen (Китай), V. Jovovich (США) и др., профессор А. Касьяна (Молдова). По ряду направлений таких как выбор оптимальной концентрации носителей тока для повышения добротности термоэлектрического материала работали Р.Симона, Р.Юр, Дж.Боррего, О.Боттгер (Германия).

При создании целого ряда термоэлектрических устройств для прямого преобразования тепловой энергии в электрическую необходимы высококачественные термоэлектрические материалы со стабильными характеристиками и высокой термоэлектрической добротности. В странах СНГ по этому направлению систематизированы и опубликованы ряд монографий Б. С. Позднякова, Е. А Коптелова, А.С.Охотина, А.А.Ефремова, В.С.Охотина, А.С.Пушкарского, А.Л.Вайнера, Э.В.Осиповой, Б.М.Гольцман. Теорией энергетического применения полупроводниковых термоэлементов получением уравнений теплового баланса, зависящих от температурной зависимости свойств материалов, работали А.И. Бурштейн и Б.Я. Мойжес. Е.К. Иорданишвили разработал метод расчета многослойного термоэлемента с учетом внутренних потерь. Также систематизированы данные по различным конструкциям ТЭГ и их характеристикам.

Резко возрастает также подготовка специалистов соответствующих профилей в ведущих университетах и технических вузах нашей страны. Исследования в этой области проводились такими учеными как, проф.,

Р.А.Авезов, проф. А.М.Касимахунова, Г.Абдурахманов, Б.Л. Оксенгендлер, Я.Усманов, М.Набиев, К.Гайназарова.

В результате вышеперечисленных исследований по совершенствованию технологии получения термоэлектрических материалов с высоким коэффициентом полезного действия и стабильными термоэлектрическими свойствами для создания устройств, предназначенных для прямого преобразования тепловой энергии в электрическую, не проведены в достаточной степени.

Связь темы диссертации с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация

Диссертационное исследование выполнено в Ферганском политехническом институте в рамках хозяйственных договоров №54-21 от 1-ноября 2021 г. Между Ферганским политехническим институтом и ООО "Fergana Avtomat Raschot" по теме: «Разработка экологически чистого альтернативного источника энергии-термоэлектрического генератора (ТЭГ) для потребителей постоянного тока малой и средней мощности» (Приказ за №44 Х/Ш НИС от 02.11.21 г.) и ООО «Электрошок» (Приказ за №6 НИС от 16.03.20г.) на тему: «Разработка фототермоэлектрической батареи».

Целью исследования является разработка технологии изготовления эффективных термоэлектрических материалов, на основе тройного сплава BiTeSe-BiSbTe , позволяющего создавать термогенераторы с высокими значениями коэффициента полезного действия.

Задачи исследования:

определение состава и технологии получения термоэлектрических материалов для изготовления термоэлементов с рабочем интервалом температуры от 300 К до 600 К;

определение условий получения термоэлектрических материалов с оптимальными свойствами на основе $n\text{-Bi}_2\text{Te}_3\text{-Bi}_2\text{Se}_3$ и $p\text{-Bi}_2\text{Te}_3\text{-Sb}_2\text{Te}_3$, легированных различными примесями;

поиск новой легирующей добавки, обеспечивающую высокую термоэлектрическую добротность и воспроизводимость сплавов в процессе плавки;

определение оптимальных условий проведения технологического процесса получения сплавов с предварительно заданными термоэлектрическими свойствами графическим методом и выводом рабочих уравнений;

разработка программного обеспечения для реализации комплекса задач моделирования термоэлектрических устройств, от расчетной оценки изменения его выходных характеристик до конструкций.

Объектом исследования является, термоэлектрические вещества из BiSbTe (p-тип) и BiTeSe (n-тип), полученные методами прессования порошков и горизонтальной зонной плавки.

Предметом исследования являются, режимы включения термоэлектрических преобразователей на электрическую нагрузку,

сопоставления технологий изготовления полупроводниковых термоэлектрических материалов электронной и дырочной проводимости на основе теллурида висмута – сурьмы путём сплавления компонентов под давлением инертного газа.

Методы исследования. В ходе исследований электропроводность термоэлектрических материалов определялась компенсационным методом, коэффициент термоэлектрической движущей силы - дифференциальным методом с помощью четырехзондового измерительного устройства, а для определения теплопроводности применялся нестационарный метод измерения.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

определены процентные соотношения составных компонентов для эффективных термоэлектрических материалов n- и p-типа методами прессования порошков и горизонтальной зонной плавки: для n-типа Bi_2Te_3 (85%)- Bi_2Se_3 (15%) и p-типа Bi_2Te_3 (30%) - Sb_2Te_3 (70%);

установлено, что оптимальная концентрация легирующего вещества TeI_4 , обеспечивающая высокий коэффициент воспроизводимости термоэлектрических материалов Bi_2Te_3 - Bi_2Se_3 n-типа, для составных компонентов с термоэлектрическими параметрами $\sigma = 600 \div 200 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, $\alpha = 200 \div 240 \text{ мкВ/град}$ составляет 0,04 моль.%;

впервые установлено, что при легировании материала n- Bi_2Te_3 - Bi_2Se_3 , полученного методом горизонтальной зонной плавки, с примесью TeI_4 его термоэлектрическая добротность увеличивается в 1,4 раза, по сравнению с прессованными образцами;

установлено, что при введении Cd с соотношением 1:4 в материал p- Bi_2Te_3 - Sb_2Te_3 , полученного методом горизонтальной зонной плавкой при $T=1223\text{K}$ в течение 20 минут, его термоэлектрическая добротность увеличивается на ~50 % по сравнению с прессованными образцами;

разработана математическая модель для учета вклада термоэлектрических эффектов в тепловой поток происходящих в термоэлементах, полученных на основе материалов n- Bi_2Te_3 - Bi_2Se_3 и p- Bi_2Te_3 - Sb_2Te_3 в диапазоне температур 300÷600 К.

Практические результаты исследования заключается в следующем:

разработан способ изготовления термоэлектрических веществ использованием в качестве легирующих примесей TeI_4 методом зонного переплава;

разработан метод расчета электрофизических параметров термостолбиков термобатареи, позволяющий прогнозировать эксплуатационные показатели;

доказана возможность повышения и получения эффективных термоэлектрических веществ, обладающих с наилучшими значениями коэффициента полезного действия ($\approx 7,2\%$);

показаны влияния методов технологии качеству получаемых веществ и объяснены физические явления, происходящие в объеме полупроводникового материала.

Достоверность результатов исследования подтверждается применением современных научных и технологических методов, стандартных и апробированных методик измерения параметров и характеристик полупроводниковых преобразователей энергии. Результаты и выводы обосновываются на физических представлениях, основанных на теоретических и экспериментальных данных. Достоверность экспериментальных данных обеспечивается использованием комплексных независимых методик измерения и обработки данных, а также их соответствием современным понятиям физики и техники полупроводников и изделий на их основе.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследования заключается в расширении методов теоретического расчета по законам зависимости энергетических, технических и эксплуатационных параметров термоэлектрических материалов от технологии изготовления и воздействия окружающей среды.

Практическая значимость результатов исследований позволяет разработать генераторы постоянного тока, изготовленные из эффективных термоэлементов для потребителей промышленных предприятий малой и средней мощности.

Внедрение результатов исследования. На основе полученных научных результатов по разработке метода повышения эффективности полупроводниковых термоэлектрических материалов на основе BiTeSe-BiSbTe:

внедрены в технологии изготовления термостолбиков на основе полупроводниковых термоэлектрических материалов тройного сплава BiTeSe (n-тип) и BiSbTe (p-тип) в акционерном обществе «FOTON» (Справка №04–3/232 ассоциации «Uzeltexsanoat» от 16.02.2024 года). В результате применения разработанной технологии, полученные полуэлементы использовались в качестве полупроводниковых материалов при изготовлении датчиков давления и температуры, противопожарных тепловых датчиков и термоэлектрических преобразователей (генераторов и охладителей).

термоэлектрические генераторы изготовленные при выполнении диссертации, внедрены в качестве источника оперативного тока устройств релейной защиты и автоматического управления на АО «Farg‘ona IEM» (Справка №05–24/642 АО «Тепловые электрические станции» от 02.04.2024 года). В результате термоэлектрические генераторы, работающие на основе эффекта Зеебека, были использованы в качестве источников оперативного тока для аппаратуры релейной защиты и автоматического управления, используя имеющуюся на предприятии тепловую энергию, а годовой экономический эффект, ожидаемый от экономии электроэнергии, составил

5460000 (пять миллионов шестьдесят тысяч) сумов.

Апробация результатов исследования. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 6 международных и 7 республиканских конференциях.

Опубликованность результатов исследования. По материалам диссертации опубликовано 26 научных работ, из них 1 монография, научные статьи, в том числе, 3 статья в зарубежных и 6 в республиканских журналах, из них 7 статей, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций. Получено 3 свидетельства на программные продукты для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объем диссертации изложен на 133 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, указаны соответствие исследования основным приоритетным направлениям развития науки и технологии в стране, проделан и проанализирован обзор зарубежных и отечественных научных исследований по теме диссертации, степень изученности проблемы, сформулированы цель и задачи, указаны объекты, предмет и методы исследования, изложена научная новизна исследования, обоснована достоверность научных результатов, раскрыта их теоретическая и практическая значимость, изложены краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, а так же об объеме и структуре диссертации.

В первой главе под названием **“Современное состояние исследовательских работ по термоэлектричеству”** проведен анализ состояния методов получения термоэлектрической энергии. Получение принципиально новых методов выработки электроэнергии, которые приводят качественным изменениям, которые являются возобновляемыми, экологически чистыми не загрязняющими окружающее среду. Сопоставлены технологические методы получения полупроводниковых материалов, для создания эффективных ветвей термоэлементов. Изучены вопросы и выявлены проблемы будущих исследований по изысканию развитых методов получения термоэлектрических веществ. Поскольку, термоэлектрические источники питания все чаще находят применение в малой и средней энергетике. На основе этих данных сформулирована постановка задачи.

Во второй главе под названием **“Моделирование электрофизических параметров ветвей термоэлемента”** рассмотрены специальные методы решения, которые учитывают определенные особенности системы уравнений и соотношения для теплоэнергетического расчета, которые проводятся на каждом этапе разработки термоэлектрических генераторов. Главной целью этих расчётов является подборка всех частей и размеров выбранных

элементов, которые достаточны представленным условиям приемлемости. С использованием этих методов производилось моделирование термоэлемента из термоэлектрического материала. Выбор термоэлектрических материалов обуславливался температурной зависимостью термоэлектрической добротности Z . Для вычисления термостолбика использовался метод средних параметров.

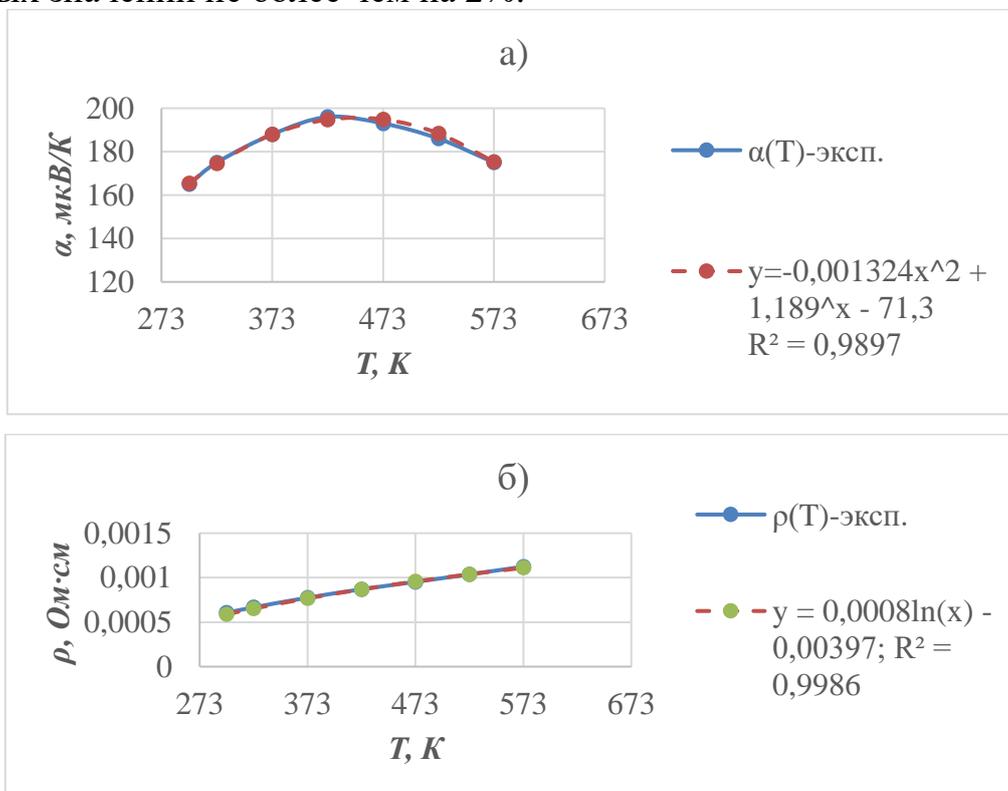
По этому методу рассчитаны тепловые потоки Q_0 и Q_1 , а также напряжение V когда свойства материала α , χ , ρ постоянны и изменялись в интервале температур от T_0 до T_1 настолько, что пренебречь их температурной зависимостью не удастся. Например, для сплава 85 вес.% Bi_2Te_3 -15 вес.% Bi_2Se_3 +0,04 моль.% TeI_4 поведение коэффициента термоЭДС и удельного электрического сопротивления в интервале температур 300 – 600 К удовлетворительно аппроксимируется функциями

$$\alpha(T) = -0,001324x^2 + 1,189x - 71,3$$

$$\rho(T) = 0,0008\ln(x) - 0,00397$$

$$\chi(T) = 0,00000077x^3 - 0,00081x^2 + 0,2569x - 4,8089 \quad (1)$$

Приведенная на рис.1 аппроксимация построена при помощи Microsoft Excel с использованием полиномиальной со степенью 2, 3 и логарифмической линий тренда. Величина достоверности аппроксимации обозначается R^2 (штриховая линия на рис.1). Из результатов видно, что коэффициенты термоЭДС, удельного сопротивления и теплопроводности отклоняются от реальных значений не более чем на 2%.



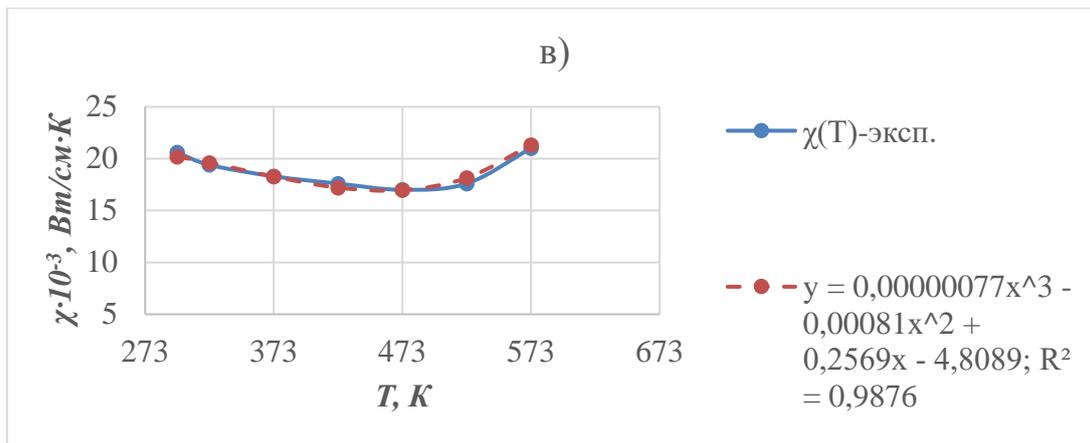


Рис.1. Зависимости коэффициента термоЭДС (а), удельного электрического сопротивления (б) и коэффициента теплопроводности (в) полупроводникового сплава 85 вес.% Bi_2Te_3 -15 вес.% Bi_2Se_3 + 0,04 моль.% TeI_4 n-типа проводимости от температуры. Штрихами показана аппроксимация (1)

При построении алгоритма были учтены особенности работы термоэлектрической батареи. Вклад термоэлектрических эффектов в тепловые потоки по сравнению с теплопроводностью, зависимость свойств материалов от температуры (т.е. тепловыделение за счет эффектов Пельтье, Томсона и Джоуля). На основе описанных выше расчетов, после определения температур уточняются свойства материалов и величины, связанные с термоэлектрическими эффектами. На рис.2. представлен алгоритм работы программного обеспечения.

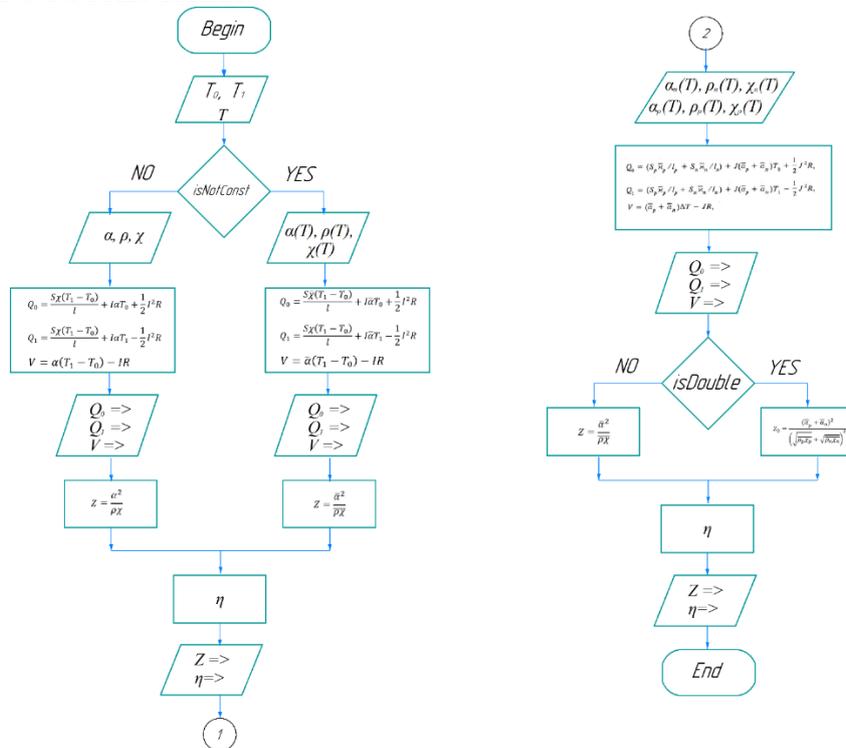


Рис.2. Алгоритм программного обеспечения для расчета свойств материалов и величин, связанных с термоэлектрическими эффектами

Программа разработана в С++ Builder 6, используется для Windows XP и для более новых версий (Рис.3).

Исходные данные

Температура холодного спая, T_0 [K]	298
Температура горячего спая, T_1 [K]	573
Коэффициент термо ЭДС, [мкВ/К]	0,000189013266666666
Удельное сопротивление, ρ_0 [Ом·см]	0,0008751745
Теплопроводность, k [Вт/(см·К)]	18,37335
Длина термоэлемента, l [см]	0,01
Поперечное сечение термоэлемента, S [см.кв]	0,0001

Действия

Расчет для случая постоянных свойств термоэлемента

Расчет для случая переменных свойств термоэлемента

Для случая переменных свойств термоэлемента, состоящего из двух термоэлектриков р- и n-типа

Очистка Конеч

Расчетные результаты

$QI = 50,97$

Уравнения теплового баланса $Q_0 = 50,83$

$V = 0,03021$

Термоэлектрическая добротность $Z = 0,002241$

Коэффициент полезного действия КПД = 10,11

Рис.3. Внешний вид программы

В третьей главе под названием “**Конструкция технологической установки получения сплава в вертикальных тиглях и результаты исследований**” приведена установка и технология изготовления полуветвей в которой производится плавление полупроводниковых термоэлектрических материалов в вертикальном тигле с легирующими добавками путем введения инертного газа, схема установки приведена на рис.4.

Для получения слитков n-типа $Bi_2Te_3-Bi_2Se_3$ и p-типа $Bi_2Te_3-Sb_2Te_3$ подготавливаются материалы различной чистоты и загружаются в кварцевый тигель, который помещается в стальную гильзу. Затем в гильзе создается вакуум до 10^{-2} мм.рт.ст. После этого, в гильзу заполняется аргон до 152 кПа, далее печь нагревается до 1023 К для расплавления исходных компонентов, и эта температура выдерживается в течении 20 минут. При этом сплав находится под давлением инертного газа (аргон), а давление последнего при температуре 1023 К достигает 405-406 кПа. По истечению заданного времени печь отключается от сети. В гильзу запускается воздух и извлекается кварцевый тигель.

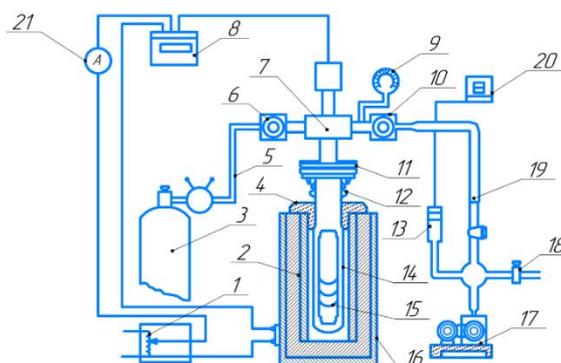


Рис.4. Принципиальная схема установки для сплавления термоэлектрических материалов под давлением инертного газа.

Прессование термоэлектрического материала для термогенераторов, осуществлялся в два этапа: холодное – при давлении 5,7 т/см² и горячее – при температуре 633 К. Давление прессования выбрано 4,6 т/см² с выдержкой при этих условиях в течении 5 минут.

Подобран состав низкотемпературного термоэлектрического материала n-типа 85 вес.% Bi₂Te₃ и 15 вес.% Bi₂Se₃, следующего состава Bi-55,186 вес.%, Te-38,663 вес.%, Se-6,151 вес.%. Чтобы изменить термоэлектрические свойства основы, также должна изменена оптимальная концентрация легирующей добавки. Обычно определение оптимальной концентрации легирующей добавки для получения основы с определенными термоэлектрическими свойствами, находят путем получения значительного количества слитков с различной концентрацией легирующей добавки.

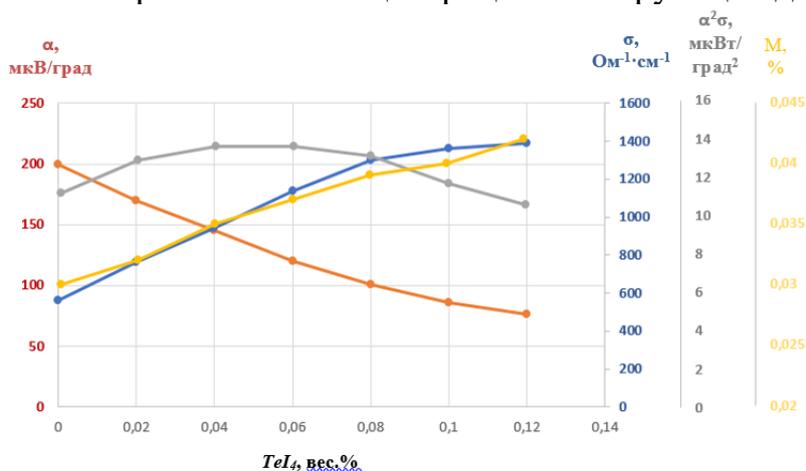


Рис. 5. Графики зависимости показателей σ , α , $\alpha^2\sigma$ и M от величины концентрации TeI_4

По проведенным опытам видно то, что существует оптимальная концентрация легирующей добавки, вводимой в шихту для каждого легирующего вещества. Концентрация вводимой легирующей добавки TeI_4 менялась в пределах 0 моль.% – 0,12 моль.% (Рис.5).

Полученные результаты были использованы при построении номограммы, приведенной на рис.6. По приведенной номограмме можно определить, какую оптимальную концентрацию легирующей добавки (тетрайодида теллура) необходимо ввести в шихту для получения легированного материала с оптимальными термоэлектрическими свойствами, соответствующими $\sigma = 1150 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, $\alpha = 196 \text{ мкВ/град}$.

На оси ординат номограммы отложены произведение коэффициента термоЭДС и удельной электропроводности, а на оси абсцисс концентрация вводимой легирующей добавки – тетрайодида теллура (рис.6). Таким образом, сделав пробную плавку основы из данных сырьевых материалов, измеряем значения σ и α полуэлементов при комнатных температурах. После этого перемножив эти параметры, находим по номограмме концентрацию легирующей добавки, которую необходимо ввести в сплав для получения материала с оптимальными свойствами.

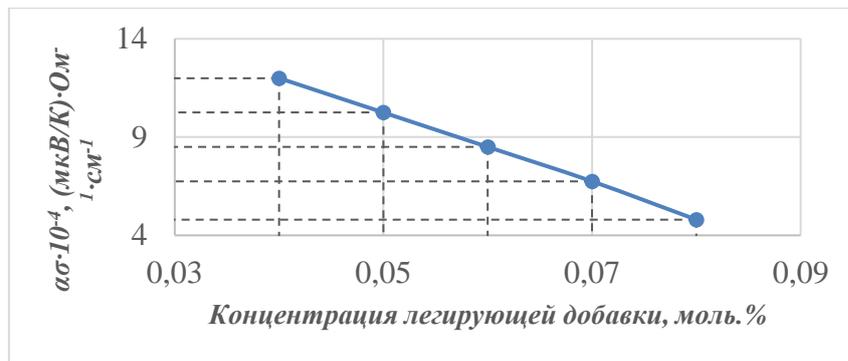


Рис.6. Номограмма для определения оптимальной концентрации легирующей добавки тетраиодида теллура (TeI_4) в зависимости от свойств основы $\text{Bi}_2\text{Te}_3 - \text{Bi}_2\text{Se}_3$.

Так как в рабочем состоянии термоэлектрические материалы всегда находятся под высокими температурами, необходимо было исследовать их термоэлектрические свойства с изменением температуры горячего спая. На рис. 7 показаны результаты температурных зависимостей термоЭДС, удельной электропроводности и теплопроводности.

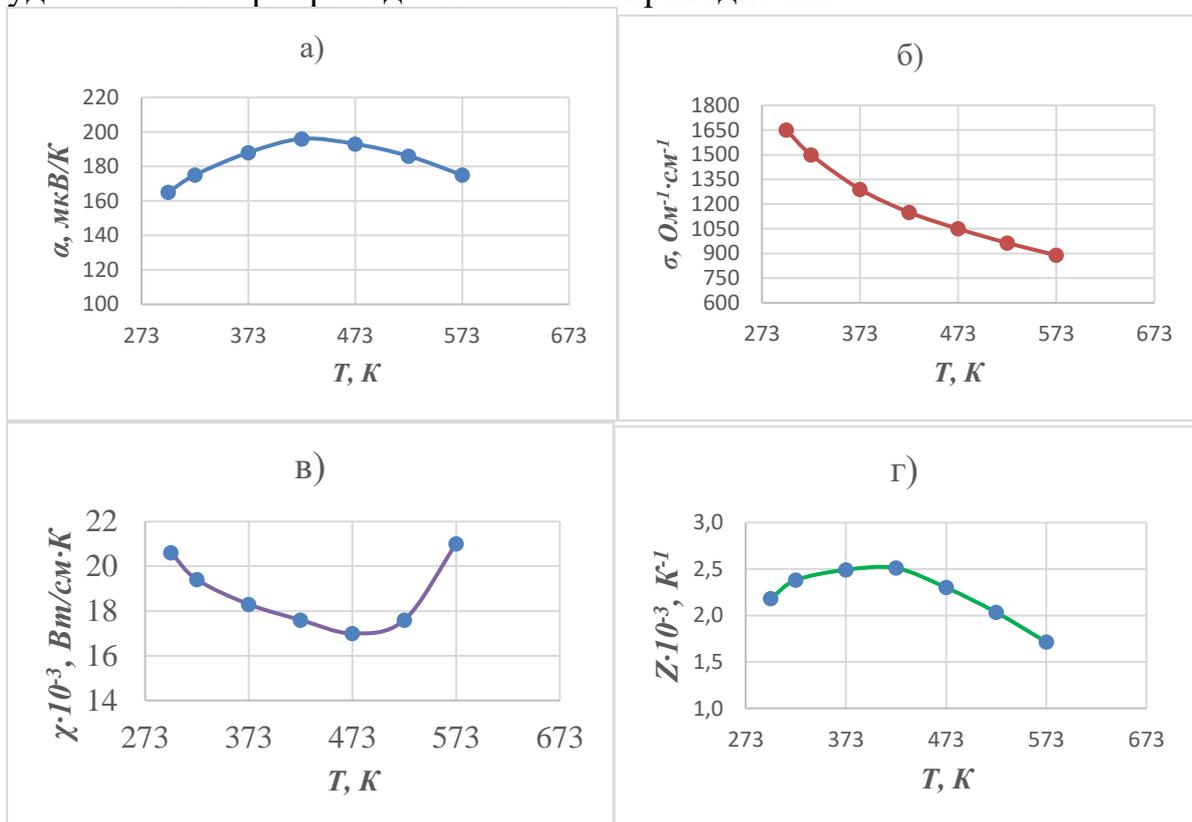


Рис. 7. Графики термоэлектрических характеристик брикетов в зависимости от температуры (а) коэффициент термЭДС α ; (б) удельная электропроводность σ ; (в) теплопроводность χ ; (г) коэффициент добротности Z

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что у термоэлектрического материала имеющий состав 85 вес.% Bi_2Te_3 и 15 вес.% Bi_2Se_3 легированный 0,04 моль.% TeI_4 термоэлектрическая добротность изменяется от $2,2 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ (298 K) до $1,7 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ (573 K). Максимальное значение термоэлектрической добротности $Z=2,55 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ (423 K).

Для получения легированного материала отвечающего составу р-типа 70 вес.% Sb_2Te_3 , 30 вес.% Bi_2Te_3 методом пропорции следующего количества: Bi – 15,67% вес, Te – 57,18% вес, Sb – 27,15% вес. В качестве легирующей добавки использовался Cd . В шихту кадмий вводился в количестве от 0,1 моль.% до 0,4 моль.%. На рисунке 8 показаны термоэлектрические свойства полученных легированных материалов. Из рисунка видно, что концентрация легирующей добавки линейно связана с изменением термоэлектрических свойств полученных материалов.

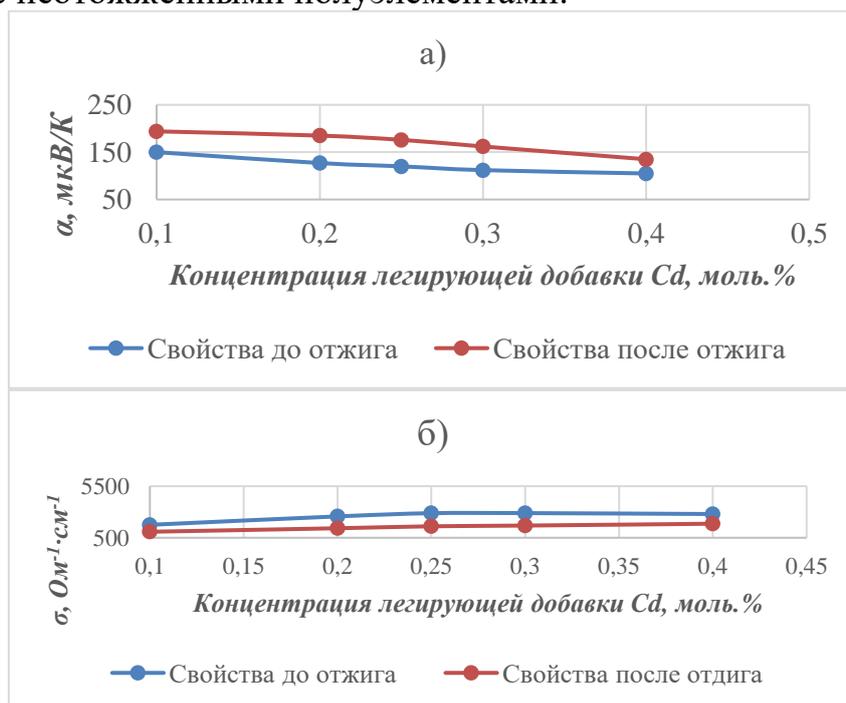
Для исследования были изготовлены полуэлементы с различной концентрацией кадмия. Результаты измерений коэффициента термоЭДС и удельной электропроводности полуэлементов при комнатной температуре до и после отжига приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Термоэлектрические свойства полуэлементов при комнатной температуре в зависимости от концентрации, вводимой легирующей добавки

Состав	Концентрация легирующей добавки Cd , моль.%	Свойства до отжига			Свойства после отжига		
		σ $Om^{-1}\cdot cm^{-1}$	α мкВ/К	$\alpha^2\sigma$ мкВ/К ² см	σ $Om^{-1}\cdot cm^{-1}$	α мкВ/К	$\alpha^2\sigma$ мкВ/К ² см
30 вес.% Bi_2Te_3	0,1	1750	150	39	1080	194	40
	0,2	2570	127	41	1420	185	48
	0,25	2880	120	41	1610	176	49
70 вес.% Sb_2Te_3	0,3	2890	112	36	1680	162	44
	0,4	2800	105	30	1860	135	33

Из таблицы следует, что с увеличением концентрации вводимой легирующей добавки, у полуэлементов до отжига удельная электропроводность растет, а коэффициент термоЭДС падает. После отжига полуэлементов их удельная электропроводность падает, а коэффициент термоЭДС растет по сравнению с неотожженными полуэлементами.



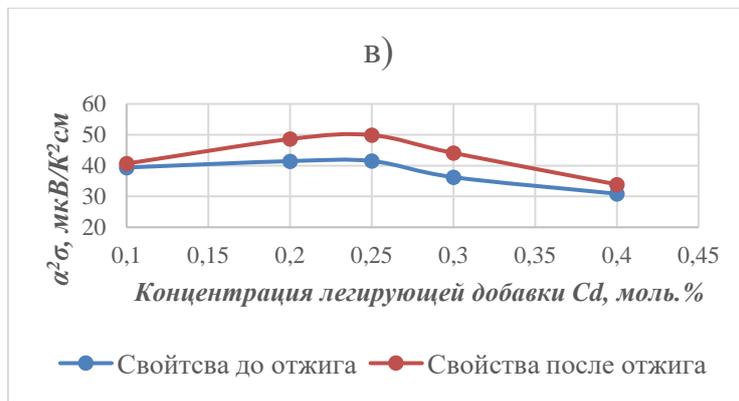


Рис.8. График зависимости значений σ , α , $\alpha^2\sigma$ от величины концентрации моль.% Cd.

При исследовании удельной электропроводности и коэффициента термоЭДС с изменением температуры (рис.9) установлено, что в начальный период с увеличением температуры удельная электропроводность падает, а коэффициент термоЭДС растет. При дальнейшем повышении температуры коэффициент термоЭДС достигает максимума, а затем уменьшается, а удельная электропроводность продолжает уменьшаться.

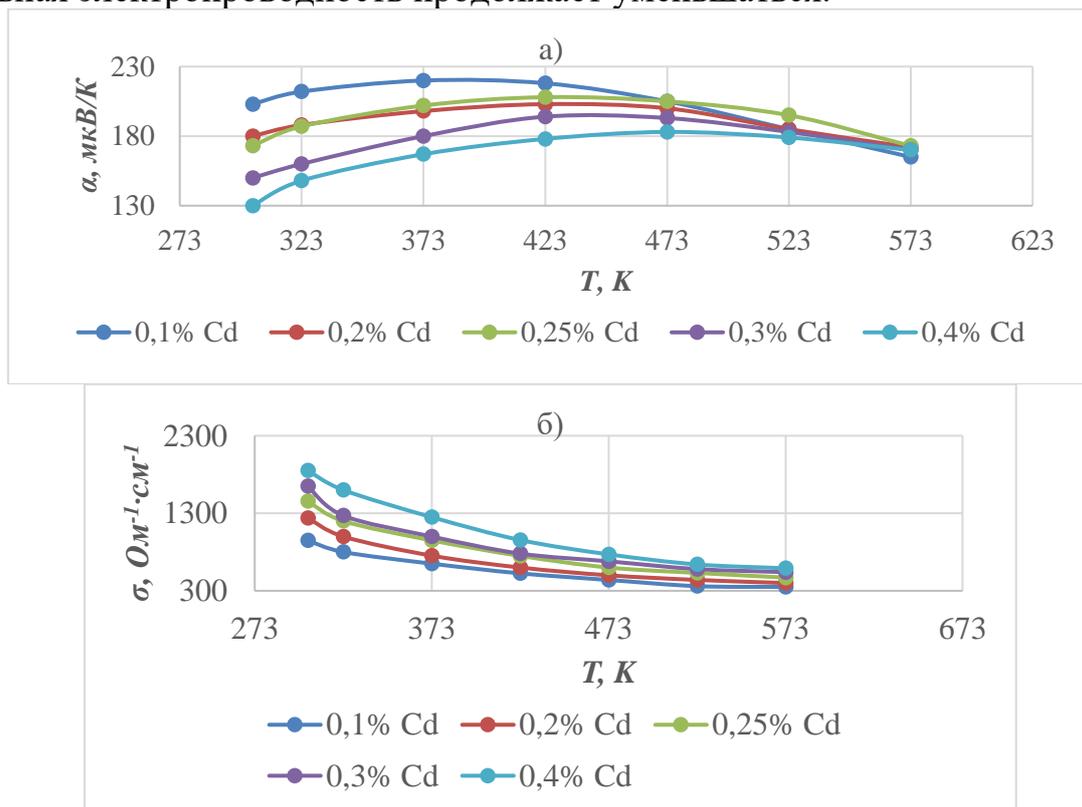


Рис. 9. Влияние концентрации, вводимой легирующей добавки – кадмия, на изменение коэффициента термоЭДС (а) и удельной электропроводности (б) с изменением температуры

Изменение значения $\alpha^2\sigma$ с изменением температуры приведено на рис.10. Из рисунка следует, что наилучшее значение $\alpha^2\sigma$ получено для образца с концентрацией легирующей добавки кадмия 0,25 моль.%.

Из исследований влияния концентрации легирующей добавки на температурный ход α и σ следует, что с увеличением концентрации легирующей добавки максимум термоЭДС сдвинут в сторону высоких температур, уменьшаясь по абсолютной величине.

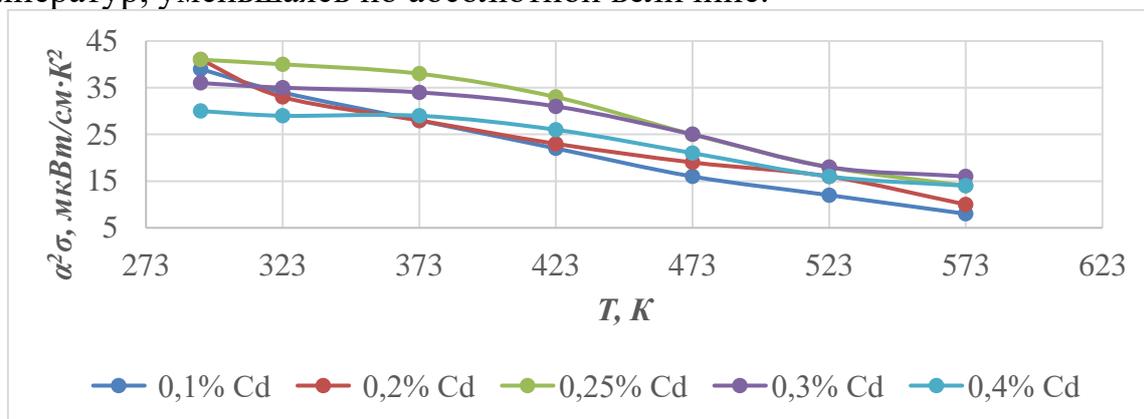


Рис.10. Изменение $\alpha^2\sigma$ с изменением температуры в зависимости от концентрации вводимой легирующей добавки – кадмия.

Кривые: 1 – 0,1% Cd, 2 – 0,2% Cd, 3 – 0,25% Cd, 4 – 0,3% Cd, 5 – 0,4% Cd.

Результаты исследования температурной зависимости термоэлектрических свойств основы Bi_2Te_3 - Sb_2Te_3 легированной кадмием (Cd) и изменение термоэлектрических свойств легированного слитка в интервале температур от 293К до 573К приведены на рис.11. Из рисунка видно, что максимальное значение термоэлектрической добротности $Z = 2,1 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$ получается в интервале температур от 293К до 373К.

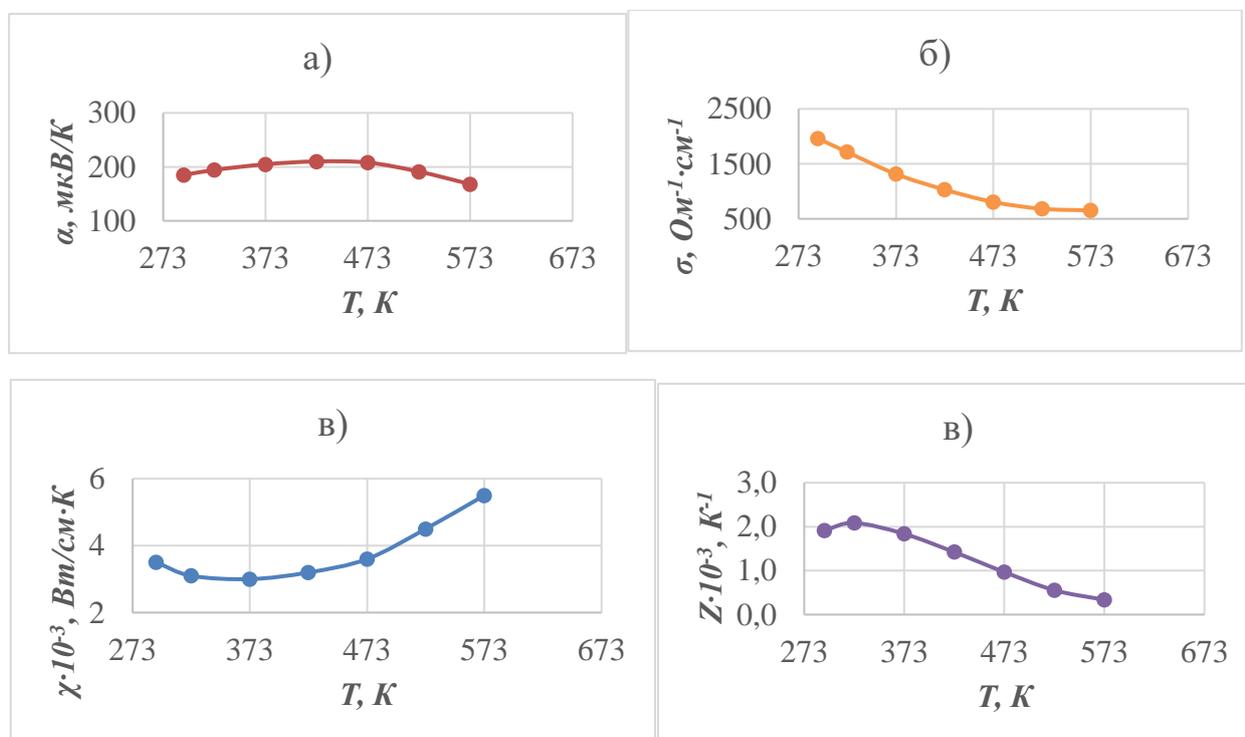


Рис.11. Графики термоэлектрических характеристик брикетов в зависимости от температуры (а) коэффициент термоЭДС α ; (б) удельная электропроводность σ ; (в) теплопроводность χ ; (г) коэффициент добротности Z

При получении сплавов по данным технологиям специальное перемешивание в процессе плавки не проводилось. Однородность термоэлектрических свойств вдоль длины слитков достигалось естественным перемешиванием за счет подобранного расположения компонентов шихты в тигле как было описано выше. Для этого полученный слиток сплавленного вещества в количестве 500 г был поделен на равные части по 50 г и из каждой части был изготовлен полуэлемент. Проведенные исследования показали, что однородность термоэлектрических свойств слитков по длине вполне удовлетворяет практическим требованиям. Разброс по свойствам составляет не более 3%.

В четвертой главе под названием **“Технология получения материалов полуветвей горизонтальной зонной плавкой и результаты исследований”** представлен альтернативный метод технологии изготовления образцов, горизонтальной зонной плавки термоэлектрического материала тройного соединения на основе $(\text{Bi, Sb})_2(\text{Te, Se})_3$. Зонная плавка имеет преимущества ещё с тем, что образцы, полученные плавлением по температурным зонам при кристаллизации, хорошо формируются на решетку. Кроме того, образования дефектов таких как трещин, деформаций и неравномерное распределение легирующих примесей практически не наблюдается.

Для получения сплава n- и p-типов был отобран тот же состав что и для метода прессования. Исходные материалы размещаются в кварцевый тигель и вводятся в зону плавления. По температурному режиму зона состоит из пяти частей. Третья зона соответствует наиболее высокой температуре, так как в данном этапе необходимо достигать хорошего расплавления компонентов расплава, смешиванию их и образованию желаемой структуры. Скорость передвижения подложки была в пределах 15-20 мм/час. Температура расплавляемого материала измерялась термопарой, прикрепленной корольком на дно подложки внутри просверленной дырочки диаметром 0,18 мм. После получения расплава, частичное медленное охлаждение его также проводилось внутри камеры, постепенным снижением температуры. Последняя процедура была выполнена в двух других зонах, где вдоль камеры поддерживается градиент температуры экспоненциального характера. Затем достаточно горячий слиток вынимался из камеры и подвергался резке. Резка вещества осуществлялась на установке электроискровой резки. Полуветви термоэлементов резались с размерами $4 \times 4 \times 7 \text{ мм}^3$. Вторая партия ветвей были изготовлены следующих размеров: $4 \times 4 \times 14 \text{ мм}^3$.

Для исследования свойства ветвей были использованы общеизвестные методы измерения электропроводности, теплопроводности, коэффициента термоэлектродвижущей силы и вычислена добротность полученных образцов.

По данным эксперимента установлено (рис.12), что ветвях обоих типов проводимости, электропроводность с ростом температуры падает экспоненциально. Причем спад σ у материала электронной проводимостью (кривая 1) намного медленнее, чем у вещества с дырочной проводимостью (кривая 2). Температурная зависимость этих свойств исследовались вплоть до

420 К. Одновременно с этим, практически таким же образом, растет коэффициент термоэлектродвижущей силы (рис.13). В отличие от n-типа, этот коэффициент в материале p-типа растет быстрее. Спад коэффициента теплопроводности наблюдается у обоих типов проводимости (рис.14). При сравнении значений коэффициентов установлено наибольшие показатели χ соответствуют ветвям с электронной проводимостью. Однако с достижением $T \approx 360$ К, этот параметр растет. Точка изменения хода теплопроводности для обоих типов вещества одинаковы.

Что касается термоэлектрической добротности материала, видно, что ветви с дырочной проводимостью имеют значения $Z=3,1 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ в пределах температур от абсолютного нуля и комнатной, тогда как у ветвей с электронной проводимостью она равна $Z=2,85 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. Максимальное значение добротности достигается до $Z=2,9 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ только при 310 К (рис.15).

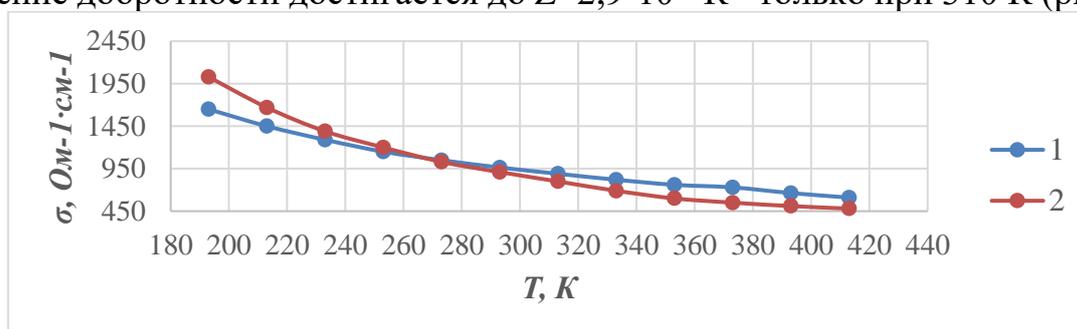


Рис.12. Температурная зависимость электропроводности ветвей термобатареи. 1-n-тип, 2-p-тип.

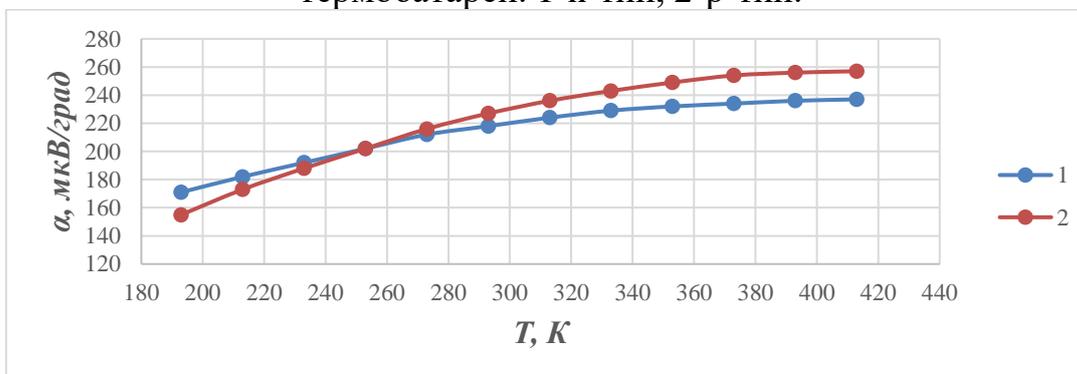


Рис.13. Температурная зависимость коэффициента термоЭДС ветвей термобатареи. 1-n-тип, 2-p-тип.

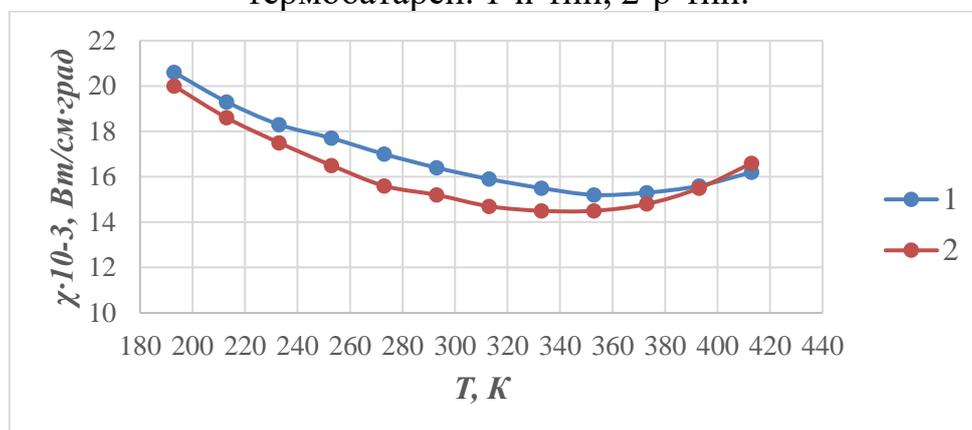


Рис.14. Температурная зависимость теплопроводности. 1-n-тип, 2-p-тип.

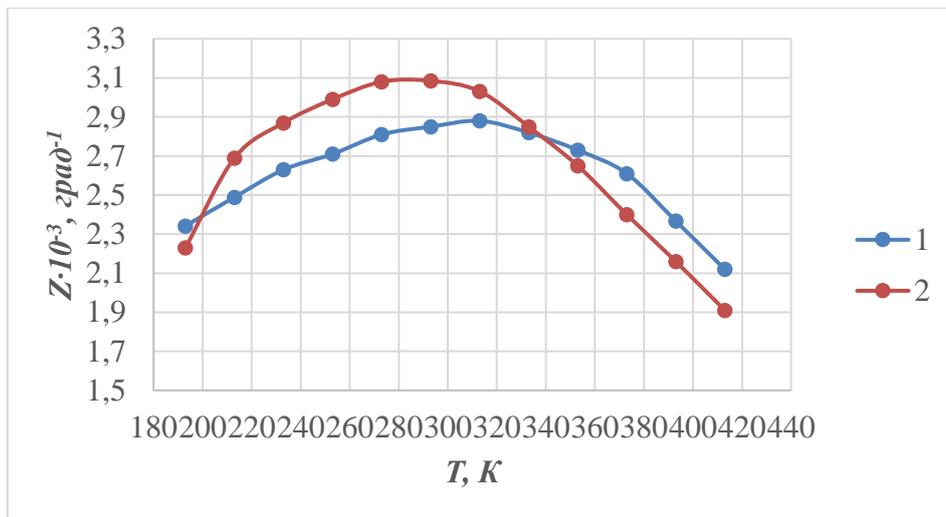


Рис.15. Зависимость термоэлектрической добротности ветвей от температуры. 1- n-тип, 2- p-тип.

Измеренные значения в наших исследованиях максимальной мощности, генерируемой на нагрузке термобатареи, показали непрерывность увеличения её. На рисунке 16 показана зависимость полезной мощности термобатареи от температуры горячего спая при зафиксированных значениях температуры на холодных спаях. Как видно из рисунка, с ростом температуры горячих спаев, и, следовательно, с ростом перепада температур между горячими и холодными спаями значение полезной электрической мощности увеличивается.

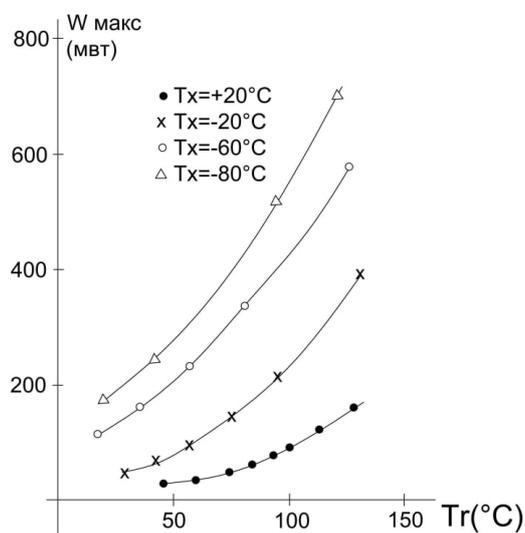


Рис.16. Температурная зависимость электрической мощности, выделяемая на нагрузке термоэлектрического преобразователя

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По проведенным результатам научно-исследовательских и расчетно-технологических работ можно сделать следующие заключения:

1. Определены оптимальные условия получения термоэлектрических материалов для термогенераторов на основе BiTeSe и BiSbTe методом прессования порошков при давлении $P=5,7 \text{ т/см}^2$ и $T=293 \text{ К}$ в течение $5\div 10$ минут, а также методом горизонтальной зонной плавки при $T=1023 \text{ К}$ в течение 30 минут.

2. Выведено рабочее уравнение и предложен график для определения оптимальной концентрации легирующей добавки TeI_4 , обеспечивающий высокий коэффициент воспроизводимости при добавлении в количестве 0,04 моль.% для составляющих компонентов со следующими термоэлектрическими параметрами $\sigma = 600 \div 200 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, $\alpha = 200 \div 240 \text{ мкВ/град}$.

3. Установлено, что добавление TeI_4 к материалу $n\text{-Bi}_2\text{Te}_3\text{-Bi}_2\text{Se}_3$, полученному методом горизонтальной зонной плавки, увеличивает его термоэлектрическую эффективность на 40% по сравнению с образцами, изготовленными методом прессования.

4. Установлено, что для получения материала методом горизонтальной зонной плавки на основе $p\text{-Bi}_2\text{Te}_3\text{-Sb}_2\text{Te}_3$ с максимальным значением добротности $Z=3,1 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$ при комнатной температуре, оптимальная концентрация вводимой легирующей добавки Cd должна составлять 0,25 моль.%. В результате термоэлектрическая добротность увеличивается на ~50% по сравнению с прессованными образцами;

5. Разработаны алгоритм и программное обеспечение на основе разработанной математической модели для расчета энергетических характеристик двух термоэлементов p - и n -типа с максимальной мощностью и КПД в диапазоне температур $300\div 600 \text{ К}$.

6. Установлено, что отжиг термоэлементов на основе $p\text{-Bi}_2\text{Te}_3\text{-Sb}_2\text{Te}_3$ легированного Cd с количеством 0,1 моль.% при температуре 663К, приводит к повышению значения коэффициента термо ЭДС на 30%.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSC.03/30.12.2019.FM/T.01.12 ON THE
AWARDING ACADEMIC DEGREES AT THE SCIENTIFIC RESEARCH
INSTITUTE OF SEMICONDUCTOR PHYSICS AND MICROELEC-
TRONICS OF THE NATIONAL UNIVERSITY OF UZBEKISTAN**

FERGANA POLITECHNICAL INSTITUTE

LATIPOVA MUKHAYYO IBRAGIMJANOVNA

**DEVELOPMENT OF A METHOD FOR INCREASING THE FIGURE OF
MERIT OF SEMICONDUCTOR THERMOELECTRIC MATERIALS
BASED ON BiTeSe-BiSbTe**

01.04.10-Physics of semiconductors

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

Tashkent-2024

The theme of the dissertation of the doctor of philosophy (PhD) on technical sciences was registered by the Supreme Attestation Commission under the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2023.3.PhD/T3800.

The dissertation was carried out at the Fergana Polytechnic Institute.

The abstract of the dissertation was posted in three (Uzbek, Russian, English (resume)) languages on the website of the Scientific Council at www.ispm.uz and on the website of "ZiyoNet" Information and Educational Portal at www.ziynet.uz.

Scientific supervisor: **Kasimakhunova Anarkhan Mamasadikovna**
doctor of technical sciences, professor

Official opponents: **Tagayev Marat Baymuratovich**
doctor of technical sciences, professor

Tukfatullin Oskar Faritovich
PhD of technical science, s.r.

Leading organization: **Tashkent State Technical University named after Islam Karimov**

The defense of the doctoral dissertation will be held on "26" 07 2024 at 10 at the meeting of the Scientific Council No. DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 at the Scientific Research Institute of Physics of Semiconductors and Microelectronics of the National University of Uzbekistan (Address: 20 Yangi Olmazor str., 100057 Tashkent city, Uzbekistan. Tel. (+99871) 248-79-94, fax: (+99871) 248-79-92, e-mail: info@ispm.uz).

The dissertation can be found at the Information Resource Center of the Institute (registered under No. 62). Address: 20 Yangi Almazor str., 100057 Tashkent city, Uzbekistan. Tel.: (+99871) 248-79-59, e-mail: info@ispm.uz.

The abstract of the dissertation was distributed on "11" 07 2024.
(Registry record No. 62 dated "11" 07 2024.)



Sh. B. Utamuradova,
Chairwoman of the Scientific Council for Award of Academic Degrees, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

J. J. Khamdamov,
Scientific Secretary of the Scientific Council for the Award of Academic Degrees, Doctor of Philosophy (PhD) on Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher

N. A. Turgunov,
Chairman of the Scientific Seminar of the Scientific Council for Award of Academic Degrees, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor

INTRODUCTION (abstract of PhD dissertation)

The aim of the research work is to develop a technology for the manufacture of efficient thermoelectric materials based on the BiTeSe-BiSbTe ternary alloy, facilitating the creation of thermogenerators with high efficiency.

Research objectives:

determine the composition and production technology for thermoelectric materials suitable for thermoelements operating within the temperature range of 300 K to 600 K;

identify the conditions for obtaining thermoelectric materials with optimal properties based on n-Bi₂Te₃-Bi₂Se₃ and p-Bi₂Te₃-Sb₂Te₃, doped with various impurities;

discover a new alloying additive that provides a high thermoelectric figure of merit and reproducibility during the melting process;

determine the optimal conditions for producing alloys with predefined thermoelectric properties using graphical methods and derive working equations.

develop software to model thermoelectric devices, including calculating changes in output characteristics and design optimizations.

The objects of investigation is thermoelectric substances from BiSbTe (p-type) and BiTeSe (n-type), obtained via powder pressing and horizontal zone melting methods.

The scientific novelty of the research is as follows:

determined the percentage ratios of constituent components for effective n- and p-type thermoelectric materials by powder pressing and horizontal zone melting: for n-type Bi₂Te₃ (85%) - Bi₂Se₃ (15%) and p-type Bi₂Te₃ (30%) - Sb₂Te₃ (70%).

established that the optimal concentration of the TeI₄ dopant, providing a high coefficient of reproducibility for n-type thermoelectric materials Bi₂Te₃-Bi₂Se₃, for composite components with thermoelectric parameters $\sigma=600\div 200 \text{ Ohm}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$, $\alpha=200\div 240 \text{ }\mu\text{V/deg}$ is 0,04 mol.%;

found for the first time that alloying n-Bi₂Te₃-Bi₂Se₃ material obtained by horizontal zone melting with TeI₄ increases its thermoelectric figure of merit by 1,4 times compared to pressed samples;

established that introducing Cd with a ratio of 1:4 into p-Bi₂Te₃-Sb₂Te₃ material, obtained by horizontal zone melting at T = 1223 K for 20 minutes, increases its thermoelectric figure of merit by approximately 50% compared to pressed samples;

developed a mathematical model to account for the contribution of thermoelectric effects to the heat flow in thermoelements made from n-Bi₂Te₃-Bi₂Se₃ and p-Bi₂Te₃-Sb₂Te₃ materials in the temperature range of 300-600 K.

Implementation of the research results. Based on the scientific results obtained on the development of a method for increasing the efficiency of semiconductor thermoelectric materials based on BiTeSe-BiSbTe:

introduced in the technology of manufacturing thermocolumns based on semiconductor thermoelectric materials of the ternary alloy BiTeSe (n-type) and

BiSbTe (p-type) at the joint-stock company “FOTON” (Certificate No. 04–3/232 of the “Uzeltexanoat” association dated 16.02.2024). As a result of the application of the developed technology, the resulting semielements were used as semiconductor materials in the manufacture of pressure and temperature sensors, fire thermal sensors and thermoelectric converters (generators and coolers).

thermoelectric generators manufactured during the implementation of the dissertation were introduced as a source of operational current for relay protection and automatic control devices at Farg‘ona IEM JSC (Certificate No. 05–24/642 JSC “Thermal Power Plants” dated 02.04.2024). As a result, thermoelectric generators operating on the basis of the Seebeck effect were used as sources of operational current for relay protection and automatic control equipment, using the thermal energy available at the enterprise, and the annual economic effect expected from energy savings amounted to 5460000 (five million sixty thousand) sums.

Publication of the research results. Based on the dissertation materials, 26 scientific papers were published, including 1 monograph, scientific articles, including 3 articles in foreign journals and 6 in republican ones, of which 7 articles recommended by the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for the publication of the main scientific results of doctoral dissertations. 3 certificates for software products for computers were received.

The structure and volume of the dissertation. The dissertation work consists of an introduction, four chapters, a conclusion, a list of references and applications. The volume of the dissertation is presented on 133 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РУЙҲАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; part I)

1. А.М.Касимахунова, Я.Усманов, М.И.Латипова. Bi_2Te_3 асосидаги термоэлектрик материалларни олиш технологияси // Монография, Фарғона, Классик нашриёти, ISBN:978-9943-8501-9-4, 2022. 100 Б.

2. M.Diuldin, A.Kasimaxunova, A.Cheremisin, M.Latipova, V.Tseiko, S.Rud, L.Tseiko, N.Vatin, V.Krasnoshchekov, V.Rud, N.Semenova. Features of bismuth telluride based ternary alloys for thermoelectric applications // E3S Web of Conferences. 2023, Volume 458, Pp.1-10 (№3; Scopus).

3. А.М.Касимахунова, М.Б.Набиев, Я.Усманов, М.И.Латипова, З.М.Хамиджонов. Исследование термоэлектрических полупроводниковых материалов для высоко эффективных термоэлектродгенераторов // НамМТИ илмий-техника журнали. Наманган, 2020, Том 5, №1. С.125-130. (05.00.00; №33).

4. М.И.Латипова, А.М.Касимахунова, М.Б.Набиев. Исследование экстремальных режимов работы термоэлементов на основе термоэлектрических материалов BiTeSe-BiSbTe // Научно технический журнал ФерПИ, 2022, Том 26, №1, С.156-160 (05.00.00; №20).

5. М.И.Латипова. Исследование эффективного метода сплавления с последующим легированием низкотемпературных термоэлектрических материалов на основе $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Bi}_2\text{Se}_3$, Научно технический журнал ФерПИ, 2022, №2, С.188-191 (05.00.00; №20).

6. M.I.Latipova. Selection of thermoelectric materials and production technologies for highly efficient thermoelectric generators // Mashinasozlik. Andijon. 2023, Tom 1, №1, 54-62 B (05.00.00; ОАК Rayosatining 2021 yil 30 dekabrda 310/14.2-son qarori).

7. M.I.Latipova. Analysis of the current status of thermoelectric materials and technology for obtaining and manufacturing half-elements // Scientific and Technical Journal of NamIET. 2023, Volume 8, Issue 1, Pp.66-71 (05.00.00; №20);

8. M.I.Latipova. Manufacturing of half-elements by deep alloying and the method of pressing powders by selecting the optimal pressing mode // Web of Scientist: International Scientific Research Journal. 2023, Volume 4, Issue 6, Pp.345-349 (№23; SJIF, IF: 7,565).

II бўлим (II часть; part II)

9. М.И.Латипова, Я.Усманов, М.Б.Набиев. Технология получения низкотемпературных термоэлектрических материалов на основе BiTeSe-BiSbTe под давлением инертного газа // Universum: технические науки: научный журнал. 2020, № 10 (79), С.63-66 (02.00.00; №1).

10. M.I.Latipova. Termoelektrik o'zgartirgichlar uchun vismut telluride asosidagi yarimo'tkazgichli materiallarni olish texnologiyasi // Involta Ilmiy jurnali. 2022, Volume1(6), 129-134 B.

11. M.И.Латипова. Система расчета распределения температуры вдоль ветви термоэлемента при разных температурах горячего конца ветви // №DGU 09153, 23.09.2020

12. M.I.Latipova, A.A.Abdullayev. "Uch qorishmali past haroratli BiTeSe-BiSbTe asosidagi termoelektrik yarimo'tkazgichli materiallarni stexiometrik tarkibini hisoblash" mavzusida EHM uchun dastur // № DGU 22168, 25.01.2023 y.

13. M.И.Латипова. Добротность лабораторных образцов термоэлектрических материалов и пути ее повышения // "Яримўтказгичлар физикасининг ва қайта тикланувчи энергия манбаларини ривожлантиришнинг замонавий муаммолари" Республика илмий-амалий анжумани. 2018, 20-21 апрел, 75-76 Б.

14. M.I.Latipova. Yuqori samaradorlikka ega bo'lgan termogeneratorlar uchun BiTeSe-BiTeSb asosidagi past haroratli yarimo'tkazgichli termoelektrik materiallardan legirlovchi asos olish // "Neft-gaz sanoatida innovatsiyalar, zamonaviy energetika va uning muammolari" Xalqaro konferensiya. 2020, 26 may, 753-754 B.

15. M.И.Латипова. К вопросу о применению полупроводниковых термоэлектродгенераторов в научных, бытовых и производственных сферах // Электр энергиясини ишлаб чиқариш, узатиш ва тақсимлаш ҳамда ундан оқилна фойдаланишнинг долзарб муаммолари мавзусида республика миқёсида илмий-техникавий анжуман. 2020, 23-24 Б.

16. M.I.Latipova. Past haroratli termoelektrik materiallar va ular asosidagi termogeneratorlarning qo'llanilish sohalari // Zamonaviy mikroelektronikaning rivojlanishida fan, ta'lim va innovatsiya integratsiyasi, Respublika ilmiy-uslubiy anjuman. 2020, 24-25 dekabr, 295-297 B.

17. M.И.Латипова. Получение полупроводниковых материалов для фото и термоэлектрических генераторов // Материалы 2-ой Международной конференции "Инновационное развитие нефтегазовой отрасли, современная энергетика и их актуальные проблемы". 2021, 29-30 октября, С.332-334

18. M.И.Латипова. Использование термоэлектрических генераторов в качестве автономного источника питания для обеспечения бесперебойного электроснабжения // "Elektr energetikasi ta'minoti tizimi uzluksizligini ta'minlash dolzarb muammolarining samarador yechimlari" Respublika ilmiy-texnika anjuman. 2021, 3-4-dekabr, 109-111 B.

19. M.И.Латипова. Применение термоэлектрического генератора для решения современных проблем энергетики // "Физика фанининг техника соҳасидаги тутган ўрни" Республика илмий-амалий конференция. 2021, 28-май, 232-234 Б.

20. M.И.Латипова. Перспективы развития термоэлектрической генерации электрической энергии // "Энергетика соҳасини ривожлантиришда муқобил

энергия манбаларининг роли” мавзусида Халқаро миқёсидаги илмий-амалий конференция. 2021, 24 апрель, 452-454 Б.

21. M.I.Latipova. Termogeneratorlar uchun mo‘ljallangan past haroratli yarimo‘tkazgichli materiallardan olingan asoslarni legirlash usullari // “Energetika sohasini rivojlantirishda muqobil energiya manbalarining roli” Vazirlik miqyosidagi ilmiy-amaliy konferensiya 2-qism. 2022, 28-29 aprel, 182-184 B.

22. М.И.Латипова. Современное применение термоэлектричества в различных отраслях промышленной и бытовой сферы // Материалы научно-технической конференции Республики “Использование новых видов альтернативных источников энергии инновационные решения и энергосбережение при их использовании”. 2022, 29-апрель, С.40-41

23. М.И.Латипова. К вопросу о применении термоэлектрических генераторов, как автономных источников питания в различных отраслях // Материалы Международной конференции “Инновационные подходы к развитию образовательно-производственного кластера в нефтегазовой отрасли”. 2022, 30 апрель, С.147-148

24. M.I.Latipova. Qayta tiklanadigan energiya manbalari: termoelektrik generatorlardan foydalanishning yangi imkoniyatlari // Energiyadagi perspektivalar va muammolarning zamonaviy yechimlari Xalqaro ilmiy-amaliy konferensiya. 2022, 28-29-oktyabr, 205-207 B.

25. M.I.Latipova. Termoelektr generatorlardan foydalanib markazlashmagan iste’molchilarni energiya tejankor energiya bilan ta’minlash // “Ishlab chiqarishning texnik, muhandislik va texnologik muammolarining innovatsion yechimlari” mavzusidagi Xalqaro miqyosidagi ilmiy-texnik anjuman. 2022, 28-29-oktabr, 189-191 B.

26. M.I.Latipova. “Termoelementlarning energetik xarakteristikalarini hisoblash” mavzusida EHM uchun dastur // № DGU 27924, 19.07.2023 y.

Avtoreferat «Til va adabiyot ta'limi» jurnali tahririyatida tahrirdan o'tkazilib,
o'zbek, rus va ingliz tillaridagi matnlar o'zaro muvofiqlashtirildi.

Bosmaxona litsenziyasi:



9338

Bichimi: 84x60^{1/16}. «Times New Roman» garniturasini.
Raqamli bosma usulda bosildi.
Shartli bosma tabog'i: 3,5. Adadi 100 dona. Buyurtma № 31/24.

Guvohnoma № 851684.
«Tipograff» MCHJ bosmaxonasida chop etilgan.
Bosmaxona manzili: 100011, Toshkent sh., Beruniy ko'chasi, 83-uy.