

**YADRO FIZIKASI INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR
BERUVCHI DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

MIRZO ULUG‘BEK NOMIDAGI O‘ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI

TURSUNOV MUHRIDDIN EGAMQUL O‘G‘LI

**LEGIRLANGAN SILIKAT SHISHA (QALIN QATLAMLI
REZISTOR) NING TERMOELEKTRIK XOSSALARIGA
DEFORMATSIYANING TA‘SIRI**

01.04.07 – Kondensirlangan holat fizikasi

**fizika-matematika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi
AVTOREFERATI**

Toshkent – 2025

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

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

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

Tursunov Muhridin Egamqul O‘g‘li

Legirlangan silikat shisha (qalin qatlamli rezistor) ning termoelektrik
xossalari ga deformatsiyaning ta‘siri..... 3

Турсунов Мухриддин Эгамкулович

Влияние деформации на термоэлектрические свойства легированного
силикатного стекла (толсто пленочного резистора)..... 23

Tursunov Mukhriddin

The effect of deformation on the thermoelectric properties of doped silicate
glass (thick-film resistor)..... 47

E‘lon qilingan ishlar ro‘uxati

Список опубликованных работ
List of published works..... 51

**YADRO FIZIKASI INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR
BERUVCHI DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

MIRZO ULUG‘BEK NOMIDAGI O‘ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI

TURSUNOV MUHRIDDIN EGAMQUL O‘G‘LI

**LEGIRLANGAN SILIKAT SHISHA (QALIN QATLAMLI
REZISTOR) NING TERMOELEKTRIK XOSSALARIGA
DEFORMATSIYANING TA‘SIRI**

01.04.07 – Kondensirlangan holat fizikasi

**fizika-matematika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi
AVTOREFERAT**

Toshkent – 2025

Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2024.2.PhD/FM1115 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya Mirzo Ulug'bek nomidagi O'zbekiston Milliy universitetida bajarilgan.

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

Ilmiy rahbar:

Abduraxmanov Gulmurza

fizika-matematika fanlari doktori, professor

Rasmiy opponentlar:

Mussayeva Malika Anvarovna

fizika-matematika fanlari doktori, katta ilmiy xodim

Tursunqulov Oybek Muydinovich

fizika-matematika fanlari nomzodi, katta ilmiy xodim

Yetakchi tashkilot:

Islom Karimov nomidagi Toshkent

davlat texnika universiteti

Dissertatsiya himoyasi Yadro fizikasi instituti huzuridagi DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 raqamli Ilmiy kengashning 2025-yil _____ soat _____ dagi majlisida bo'lib o'tadi (Manzil: 100174, Toshkent shahri, Ulug'bek qo'rg'oni, Yadro fizikasi instituti. Tel.: (+99871) 289-31-41; faks: (+99871) 289-36-65; e-mail: info@inp.uz).

Dissertatsiya bilan Yadro fizikasi institutining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (_____ raqami bilan ro'yxatga olingan). Manzil: 100214, Toshkent shahri, Ulug'bek qo'rg'oni, YaFI. Tel.: (+99871) 289-31-19).

Dissertatsiya avtoreferati 2025-yil "____" _____ kuni tarqatildi.
(2025-yil "____" _____ dagi _____ raqamli reyestr bayonnomasi).

M.Yu.Tashmetov

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

O.R.Tojiboyev

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash ilmiy kotibi, f.-m.f. PhD., katta ilmiy xodim

S.B.Igamov

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash huzuridagi Ilmiy seminar raisi, f.-m.f.d., katta ilmiy xodim

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasining annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurligi. So‘nggi yillarda metall oksidlari bilan legirlangan silikat shishalarning elektrotransport va termoelektrik xossalari o‘rganish nafaqat fundamental fizika doirasida, balki amaliy texnologiyalar rivojida ham alohida ahamiyat kasb etmoqda. Qalin qatlamli texnologiya asosida tayyorlanadigan bunday materiallar arzonligi, ekologik xavfsizligi, yuqori issiqlikka chidamliligi, barqaror elektrotransport xossalari hamda ishlab chiqarish jarayonining soddaligi bilan ajralib turadi. Shu sababli turli xil metall oksidlari bilan legirlangan silikat shisha materiallari asosida termoelektrik generatorlar, tenzoresistiv elementlar, harorat va bosim datchiklari kabi qurilmalar yaratish jahon amaliyotida keng rivojlanmoqda. Shu bilan birga, legirlangan silikat shishalarda struktura elementlarining o‘zaro ta’siri, ularning zaryad tashuvchilarini boshqarish qobiliyati va tashqi omillarga sezgirligi ushbu materiallarni turli o‘lchash tizimlarida barqaror ishlaydigan funksional elementlar sifatida qo‘llash imkoniyatini ochib bermoqda. Bu esa mazkur materiallarga bo‘lgan ilmiy va amaliy qiziqishni yanada kuchaytirib, tadqiqotlar doirasining kengayishiga olib kelmoqda.

Jahon ilm-fanida oxirgi o‘n yillikda legirlangan silikat shishalarning energetik zonalari, kiritma holatlari, taqiqlangan zona kengligining deformatsiya ostida o‘zgarishi, tunnelli va perkolatsion o‘tkazuvchanlik mexanizmlari keng miqyosda o‘rganilmoqda. AQSh, Yaponiya, Xitoy, Kanada va Yevropa tadqiqotchilari bu materiallarning elektrofizik va termoelektrik xossalari izchil tahlil qilmoqda. Shunga qaramay, aynan ruteniy (RuO_2) va marganes (MnO_2) oksidlari bilan legirlangan silikat shishalarda deformatsiya ta’sirida termoEYuKning qanchalik kuchli o‘zgarishi, uning mikrostrukturaviy sabablari va energetik tirqishlar bilan bog‘liqligi hozirgacha to‘liq yoritilmagan. Shu bois bu yo‘nalishda fundamental tadqiqotlar olib borish ilmiy va amaliy jihatdan dolzarbdir.

Respublikamizda ham metall oksidlari bilan legirlangan silikat shishalarning elektrofizik va termoelektrik xossalari bo‘yicha ilmiy tadqiqotlar so‘nggi yillarda sezilarli rivojlanmoqda. Xususan, Mirzo Ulug‘bek nomidagi O‘zbekiston Milliy universiteti, Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti, O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Yadro fizikasi instituti va boshqa ilmiy markazlarda ushbu materiallarda solishtirma qarshilikning haroratga bog‘liqligi, mikrostrukturaviy o‘zgarishlar, kontakt zonalaridagi termoEYuK generatsiyasi, shaffof o‘tkazgichli strukturalar, nanoklasterli metall oksid qatlamlari bo‘yicha fundamental izlanishlar olib borilmoqda. Mamlakat sanoatida import o‘rnini bosuvchi sezgir datchiklarga bo‘lgan ehtiyojning ortishi, elektronika va avtomatlashtirilgan tizimlarning modernizatsiyasi, shuningdek, energiya tejoychi qurilmalar yaratish ushbu tadqiqot yo‘nalishining amaliy ahamiyatini yanada oshirmoqda.

O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-sonli “2022-2026-yillarga mo‘ljallangan Yangi O‘zbekistonni rivojlantirish strategiyasi to‘g‘risida”, 2020-yil 29-oktabrdagi PF-6097-sonli “2030-yilgacha bo‘lgan ilm-fanni rivojlantirish konsepsiyasi to‘g‘risida”gi farmonlari, 2019-yil 24-avgustdagi PQ-4426-sonli “Tarmoq korxonalarini o‘rtasida kooperatsiya aloqalarini kengaytirish va mahalliy lashtirishni rivojlantirish to‘g‘risida”gi qarori hamda mazkur faoliyatga

tegishli boshqa me'yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiya tadqiqoti muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotlarning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga mosligi. Dissertatsiya tadqiqoti respublika fan va texnologiyalarni rivojlantirishning II-ustuvor yo'nalishi - «Energetika, energiya tejash va muqobil energiya manbalari»ga muvofiq ravishda bajarilgan.

Muammoning o'rganilganlik darajasi: Legirlangan silikat shishalarning elektro-fizik va termoelektrik xossalarini o'rganish bo'yicha dunyoning ko'plab olimlari shug'ullanib kelgan va hozir ham shug'ullanmoqda, jumladan, germaniyalik (Y.G. Magnus, K. Maurer, H. Schmidt, R. Müller, Joseph P. Heremans), britaniyalik (U. Thomson, A. Paul, J. Zarzycki), amerikalik (G.E. Pike, C.H. Seager, Z.H. Meiksin, G.C. Kuczynski, J. Shelby, R. Brow, M. Tomozawa, J. MacKenzie), yaponiyalik (T. Minami, M. Tatsumisago, Ken Kurosaki, Anek Charoenphakdee, Shinsuke Yamanaka), xitoylik (X. Guan, M. Wen, H. Li, J. Ou), italiyalik (C. Meneghini, S. Mobilio, F. Pivetti, I. Selmi, M. Prudenziati, B. Morten), fransiyalik (D. Nassau, P. Richet), rossiyalik (N.V. Morozova, V.V. Shchennikov, S.V. Ovsyannikov, A.S. Gusev, S.V. Zaitsev, V.V. Osipov), sloveniyalik (M. Hrovat, D. Belavič, Z. Samaržija, J. Holc), hind (D.P. Rai), belarus (V. Ksenovich), o'zbekistonlik (G. Abdurakhmanov, A. Dekhkonov, D. Toshmuhammedova, I. Nuritdinov, B. Umrzoqov, M. Mussayeva, A. O'roqov) va boshqa mutaxassislar.

Materiallarning elektr o'tkazuvchanligi va termoelektrik xossalariga deformatsiyaning ta'siri muammosi XIX asr o'rtalaridan boshlab o'rganilib kelinmoqda. So'nggi yillarda metall oksidlari bilan legirlangan silikat shishalarning elektr va termoelektrik xossalari yo'nalishida izchil tadqiqotlar olib borilmoqda. Tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, bunday materiillardagi deformatsiya jarayonlari nafaqat geometrik o'zgarishlar bilan, balki lokal tuzilmaning qayta tashkil topishi, zaryad tashuvchilarning diffuziyasi va energetik holatlarning shakllanishi bilan ham bog'liq. Dunyoning ko'plab tadqiqotchilari tomonidan legirlangan silikat shishalar asosida yuqori issiqlikka chidamli elektrodlar, qalin qatlamli rezistorlar, shaffof o'tkazgichlar, piezo va tenzorezistiv elementlar, gaz va bosim datchiklari uchun sezgir qatlamlar ishlab chiqilgan. Metall oksidlari bilan legirlangan silikat shishalarda elektronlarning energiya holatlari taqsimoti, kiritmalararo tunnelli o'tkazuvchanlik mexanizmlari, perkolatsiya chegaralari va Zeebek koeffitsientining fazoviy taqsimlanishi bo'yicha ko'plab ilmiy natijalar e'lon qilingan. Termoelektrik sezgirlikning harorat, struktura va deformatsiya bilan bog'liqligini izohlash uchun mikrostrukturaviy modellar ham taklif qilingan.

Shunga qaramay, legirlangan silikat shisha asosidagi qalin qatlamli rezistorlarda deformatsiyaning elektro'tkazuvchanlik va termoelektrik xossalarga kompleks ta'siri, xususan, Zeebek koeffitsientining fazoviy taqsimlanishi hamda elektr o'tkazuvchanlik va termoelektrik xossalarning energetik tirqishlar bilan bog'liqligi kabi masalalar to'liq yoritilmagan. Bundan tashqari, metall oksidlari silikat shishaga kiritma sifatida kiritilganda silikat shishada hosil bo'ladigan kiritma zonalari va psevdotirqishlarning hosil bo'lish mexanizmlari haqida yakdil tasavvurlar yo'q. Shuningdek ushbu materiillarda energetik holatlar zichligi hanuzgacha o'rganilmagan.

Dissertasiya mavzusining dissertasiya bajarilgan oliy ta'lim muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari bilan bog'liqligi. Dissertasiya tadqiqoti O'zbekiston Milliy universiteti ilmiy-tadqiqot ishlari rejasiga muvofiq Uzb-Ind-2021-78-raqamli "Metall oksidlari bilan legirlangan silikatlarining termoelektrik xossalari va o'z-o'zidan tashkil bo'lish jarayonlari" (2021-2023) mavzusidagi amaliy loyiha doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi legirlangan silikat shishaning elektr o'tkazuvchanligi va termoelektrik xossalariga bir o'qli elastik deformatsiya ta'sirining mexanizmlarini aniqlashdan iborat.

Tadqiqot vazifalari:

zarur tarkibli legirlangan silikat shisha namunalarini tayyorlash, tarkibini nazorat qilish;

rentgen nurlari difraksiyasi (XRD) yordamida namunalar strukturasi va fazaviy tarkibini aniqlash;

elektr o'tkazuvchanlikka deformatsiyaning ta'sirini tajribada aniqlash;

Zeebek koeffitsientining deformatsiyaga bog'liqligini aniqlash;

termoEYuKning fazoviy taqsimlanishini aniqlash;

o'tkazuvchanlikdagi o'zgarishni energetik zonalar bilan bog'lash;

termoelektrik tenzodatchikning sezuvchanlik darajasini baholash.

Tadqiqotning ob'ekti sifatida ruteniy (RuO_2) va marganes (MnO_2) oksidlari bilan legirlangan silikat shishalari olingan.

Tadqiqotning predmetini legirlangan silikat shishaning elektr o'tkazuvchanligi va termoelektrik xossalariga bir o'qli elastik deformatsiya ta'sirining mexanizmlari tashkil etadi.

Tadqiqotning usullari: qalin qatlamli texnologiya, Rentgen nurlari difraksiyasi (XRD), energiya dispersiyasi spektrometri (EDS), uch nuqtali egilish, VAX o'lchovi, Zeebek koeffitsientini aniqlash usullari, CorelDraw 2018 va Kompas 3D v.17 dasturlari, Wolfram Mathematica v.13 va Origin 2018 dasturlari.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

ruteniy oksidi bilan legirlangan silikat shishaning taqiqlangan zonasida kiritma zonasi joylashishi va hosil bo'ladigan psevdotirqishda energetik holatlar zichligining taqsimlanishi, shuningdek, Fermi sathining valent zonasi tomon siljishi termoEYuK koeffitsienti qiymatini belgilovchi asosiy omillardan ekanligi aniqlangan;

legirlangan silikat shishada deformatsiyaning termoEYuK koeffitsientiga ta'siri elektr o'tkazuvchanlikka ta'siriga nisbatan katta (20-120 baravar) ekani, bu esa Mott nazariyasi asosida lokalizatsiyalangan holatlar zichligi taqsimotining o'zgarishi bilan izohlanishi ko'rsatilgan;

mikrokontakt spektroskopiyasi usuli orqali ruteniy va marganes oksidlari bilan legirlangan silikat shishalarda energetik holatlar zichligining taqsimoti aniqlanib, tadqiq qilingan namunalarda psevdotirqish hosil bo'lishi ko'rsatilgan;

legirlangan silikat shisha namunalarida termoEYuK asosan legirlangan silikat shisha va kumush o'tkazgich tutashgan joyda, ya'ni ikki xil o'tkazgich chegarasi (kontakt) yaqinida paydo bo'lishi aniqlangan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

qalin qatlamli texnologiya bo'yicha RuO₂ va MnO₂ bilan legirlangan silikat shishada termoEYuK ning o'zgarishiga asoslangan deformatsiyaga o'ta yuqori sezgir datchik (qarshilik o'zgarishiga nisbatan 20-120 barobar yuqori sezgirlikka ega) yaratish mumkinligi aniqlangan va bunday datchikning laboratoriya namunasi sinovdan o'tkazilgan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi olingan ma'lumotlarning takroriy tajribalar bilan tasdiqlanishi, zamonaviy o'lchov uskunalari (XRD, EDS, raqamli multimetrlar, teplovizor va hakoza) yordamida yuqori aniqlikda qayd etilishi orqali ta'minlangan. Natijalar mavjud ilmiy tasavvurlarga zid emas va taklif etilgan fizik modelga mos keladi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.

Ilmiy ahamiyati shundaki, deformatsiya va harorat ta'sirida qalin qatlamli texnologiya asosida tayyorlangan legirlangan silikat shishalarning elektr va termoelektr xossalari tizimli ravishda o'rganildi. Olingan natijalar bunday materiallarning tashqi ta'sirlarga sezgirligini tushunish, ularning elektro-fizik xususiyatlarini maqsadli boshqarish va yangi avlod datchik elementlarini ishlab chiqish uchun ilmiy asos yaratadi.

Amaliy ahamiyati shundaki, taklif qilingan konstruktiv va texnologik yechimlar importni o'rnini bosuvchi, mahalliy datchiklar yaratish imkonini beradi, ular energetika, transport va sanoat avtomatlashtirishida amaliy qo'llanishga mo'ljallangan.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Legirlangan silikat shisha (qalin qatlamli rezistor) ning termoelektrik xossalari deformatsiya ta'siri bo'yicha olingan ilmiy natijalar asosida:

termoEYuK koeffitsientining qiymatini belgilovchi hamda termoEYuK ning ikki har xil o'tkazgichlar tutashgan joyda (kontaktda) paydo bo'lishi haqidagi ma'lumotlardan, Mirzo Ulug'bek nomidagi O'zbekiston Milliy universiteti fizika fakultetida bajarilgan IL-4821091628-raqamli "Fotovoltaikada qo'llanilish uchun shaffof o'tkazuvchan metall oksidlardagi nanostrukturali grafenli plyonkalarni shakllantirish va ulardagi zaryad tashuvchilarining ko'chish jarayonlari mexanizmlari" mavzusidagi O'zbekiston-Belarus qo'shma amaliy tadqiqot loyihasi doirasida foydalanilgan (Mirzo Ulug'bek nomidagi O'zbekiston Milliy universiteti 2025-yil 18-iyundagi № 01/11-7616-sonli xati). Ilmiy natijalardan foydalanish shaffof o'tkazuvchan metall oksidlardagi nanostrukturali grafenli plyonkalarda solishtirma qarshilikni o'lchash jarayonida qarshilikning deformatsiyaga bog'liq holda o'zgarishini hamda metal oksid qatlamlarida termoelektrik xususiyatlarini tushuntirish imkonini bergan;

termoEYuK ning deformatsiyaga juda yuqori sezgirligi aniqlangani, ruteniy va marganets oksidlari bilan legirlangan silikat shishalarda energetik holatlar zichligining taqsimoti hamda o'rganilgan namunalarda psevdotirgish paydo bo'lishi haqidagi ma'lumotlardan, Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universitetida bajarilgan AL-202102215-raqamli "Ferromagnit nanoklasterli Si bilan aylanma saraton hujayralarini tutib qoluvchi mikrosuyuqlik kanalli integrallangan tizim" mavzusidagi O'zbekiston - Turkiya qo'shma amaliy tadqiqotlar loyihasida foydalanilgan (Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika universiteti 2025-

yil 8-sentyabrdagi № 01/9-14-2398-sonli xati). Ilmiy natijalardan foydalanish termoEYuK o'zgarishiga asoslangan, yuqori sezgirlikka ega yangi usuldagi termoelektr tenzodatchikning laboratoriya namunasidan foydalangan holda mikrokanallarda suyuqlik bosimini o'lchash hamda nanoklasterlarning magnit xossalarini aniqlash imkonini bergan.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Dissertatsiya ishining natijalari 5 ta xalqaro va respublika ilmiy-amaliy anjumanlarida ma'ruza qilingan hamda muhokamadan o'tkazilgan.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinishi. Dissertatsiya mavzusi bo'yicha jami 9 ta ilmiy ish, shulardan, Oliy attestatsiya komissiyasining dissertatsiyalar asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 4 ta maqola, jumladan, 2 tasi xorijiy ilmiy jurnallarda nashr etilgan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya tarkibi kirish, to'rt bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro'yxatidan iborat. Dissertatsiyaning hajmi 125 betni tashkil etadi.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Kirish qismida dissertatsiya mavzusi bo'yicha turli tadqiqotchilar tomonidan olingan natijalar tahlili keltirilgan, dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati asoslangan, tadqiqotning maqsad va vazifalari shakllantirilgan, ob'ekti va predmeti aniqlangan, tadqiqotning O'zbekiston Respublikasida fan texnologiyalarni rivojlantirishning ustuvor yo'nalishlariga mosligi ko'rsatilgan, tadqiqotning ilmiy yangiligi va amaliy natijalari bayon qilingan, ularning ishonchligi asoslangan, olingan natijalarning nazariy va amaliy ahamiyati ochib berilgan, ishlanmalarni amaliyotga joriy qilish, ishning aprobatsiyasi natijalari, e'lon qilingan ishlar va dissertatsiyaning tuzilishi to'g'risida ma'lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiyaning birinchi bobi **“Turli materiallarning elektr o'tkazuvchanligiga deformatsiyaning ta'siri. Tenzodatchik”** deb nomlangan bo'lib, u turli materiallarning - metallar, yarimo'tkazgichlar va qalin qatlamli rezistorlarning elektr o'tkazuvchanlik va termoelektr xossalariga bir o'qli elastik deformatsiya ta'sirining nazariy hamda eksperimental asoslarini tahlil qilishga bag'ishlangan. Bobda deformatsiyaning elektr o'tkazuvchanlik va Zeebek koeffitsientiga ta'siri, materiallarning struktura-parametrlaridagi o'zgarishlar va energetik zonalardagi kiritmalar bilan bog'liqligi yoritilgan.

Shuningdek, termoelektr hodisalarga deformatsiyaning ta'siri bo'yicha olib borilgan fundamental tadqiqotlar, tajriba usullari va fizik modellar tahlil qilingan. Ayniqsa, bir o'qli elastik deformatsiya sharoitida elektr transport xossalarining sezgirlik darajasini oshiruvchi omillar, termoelektr kuchlanishning chiziqli bog'lanishi va struktura bilan o'zaro ta'siri ilmiy manbalar asosida umumlashtirilgan. Bu borada shisha asosidagi kompozitsion materiallarda diffuziya, lokal struktura buzilishlari va energetik kiritmalar asosiy rol o'ynashi ko'rsatilgan.

Bob yakunida, legirlangan silikat shisha materiallari uchun deformatsiya ostidagi elektr va termoelektr xossalarning kompleks tahlili yetarlicha o'rganilmaganligi asosida, dissertatsiyaning maqsadi va ilmiy-tadqiqot vazifalari shakllantirilgan.

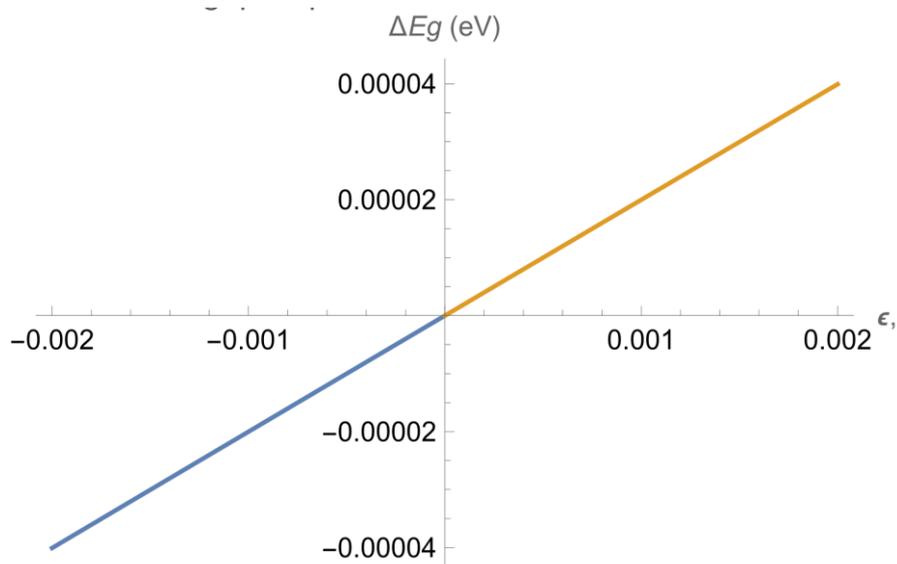
Dissertatsiyaning **“Legirlangan silikat shisha asosidagi namunalarni tayyorlash texnologiyasi va tadqiqot usullari”** nomli ikkinchi bobi legirlangan silikat shisha asosidagi namunalarni tayyorlash, ularning fizik xossalarini o‘rganish va o‘lchash uchun ishlatilgan eksperimental qurilmalar va metodlarga bag‘ishlangan. Bobda sintez qilingan namunalarning struktura, morfologiya, elektr va termoelektrik parametrlarini aniqlashda qo‘llanilgan texnologik yechimlar yoritilgan.

Tadqiqot uchun tanlangan RuO_2 va MnO_2 oksidlari bilan legirlangan silikat shisha namunalar qalin qatlamli texnologiya asosida tayyorlangan. Ularning fazaviy tarkibi XRD, morfologiyasi esa energiya dispersion spektrometrli skanerlovchi elektron mikroskop yordamida o‘rganilgan. Elektr o‘tkazuvchanlik va termoelektrik xossalarining deformatsiyaga bog‘liqligini aniqlash uchun maxsus uch nuqtali egilish qurilmasi ishlab chiqilgan.

Dissertatsiyaning uchinchi bobi **“Legirlangan silikat shishada kiritma zonalari, energetik tirqishlar va elektr o‘tkazuvchanligi”** deb nomlangan bo‘lib, legirlangan silikat shishalarda elektr o‘tkazuvchanlik va termoelektrik xossalariga deformatsiyaning ta‘sirini o‘rganishga bag‘ishlangan. Bobda qattiq jismlarda elektr transport hodisalari, xususan deformatsiya ostida elektr o‘tkazuvchanlik va termoEYuK ning o‘zgarish mexanizmlari Kroning-Penni modeli va Mott mexanizmi asosida nazariy jihatdan tahlil qilingan. Shuningdek, legirlovchi elementlar kiritilishi natijasida silikat shisha strukturasida yuzaga keladigan kiritma zonalari, faza o‘zgarishlari va holatlar zichligining elektr o‘tkazuvchanlikka ta‘siri eksperimental va nazariy asosda izohlangan. Shuningdek, termoEYuKning material yuzasi bo‘yicha fazoviy taqsimoti maxsus o‘lchov tizimi yordamida aniqlangan.

Kompyuter texnologiyalarining rivojlanishi turli kristall moddalarning tarkibiga tayanib tuzilishi va xossalarini, ularga mexanik ta‘sirning natijalarini hisoblash imkonini beradi (WIEN2k, Quantum Espresso kabi dasturlar). Bunda kristall moddalarda bir necha atomlardan iborat elementar yacheykani ajratish juda muhim rol o‘ynaydi, hisoblash jarayonini oqilona vaqt davomida bajarish imkonini beradi. Ammo shishasimon materiallarda elementar yacheykani ajratish imkoni yo‘qligi vaziyatni keskin murakkablashtiradi (modellashtirish imkonini yo‘q qiladi). Shuning uchun shishasimon materiallar xossalarining deformatsiya ta‘sirida o‘zgarishini modellashtirishda soddaroq tasavvurlardan foydalanishga majburmiz. Shunday tasavvurlarning eng soddasi Kroning-Penni modeli.

Bu modelda atomlarning fazoda davriy joylashuvi energetik zonalar hosil qiladi, deformatsiya esa atomlararo masofani o‘zgartirib, taqiqlangan zonaning kengligiga ta‘sir qiladi. Agar taqiqlangan zonada kiritmalar sathlari yoki zonasi bo‘lsa, deformatsiya ta‘sirida uning asosiy zonalarga nisbatan joylashuvi va kengligi, ya‘ni bu zonadagi holatlar zichligi hamda uning energiya boylab taqsimlanishi o‘zgaradi. Bu tahlillarni amalga oshirish uchun “Wolfram Matematika v.13” dasturiy ta‘minotidan foydalanildi. Dastur yordamida taqiqlangan zona kengligi nisbiy o‘zgarishi ΔE ning deformatsiya nisbiy o‘zgarishi $\Delta \varepsilon$ ga bog‘liqligi grafigi qurildi (1-rasm). Bunda panjara doimiysi 0.500 nm dan 0.499 nm gacha (siqilish, nisbiy deformatsiya $\varepsilon = -2 \cdot 10^{-3}$) va 0.500 nm dan 0.501 nm gacha (cho‘zilish, $\varepsilon = 2 \cdot 10^{-3}$) o‘zgarganda taqiqlangan zona (0.050 eV) qanday o‘zgarishi hisoblandi va grafigi chizildi.



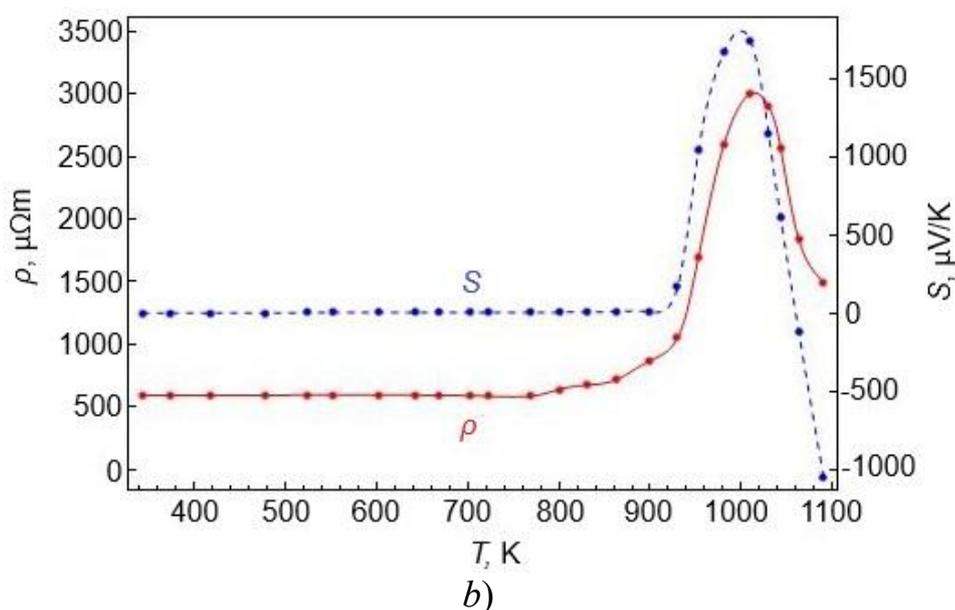
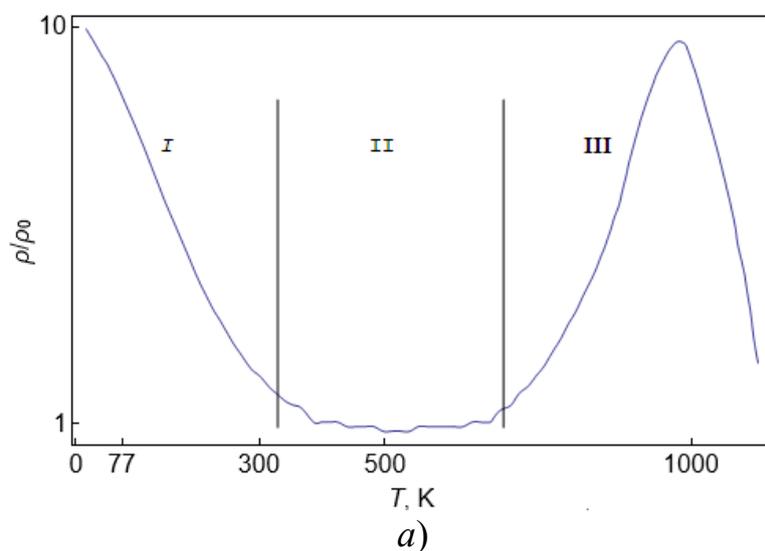
1-rasm. Kroning Penni modelida taqiqlangan zona kengligi nisbiy o‘zgarishining deformatsiya nisbiy o‘zgarishiga bog‘liqligi

1-rasmdan tor deformatsiya diapozonida (0-0,002) taqiqlangan zonaning o‘zgarishi chiziqli ko‘rinishga ega ekanligi aniqlandi. Taqiqlangan zona kengligining deformatsiya ta’sirida o‘zgarishi (1-rasm) shu zonaning ichidagi kiritma zonasining joylashuviga va kiritma zonasi bilan shishaning valent zonasi orasidagi psevdotirqishning kengligiga (3-rasm) ham mos ravishda ta’sir qiladi. Natijada psevdotirqishda energetik holatlar zichligi o‘zgaradi - namuna cho‘zilganda holatlar zichligi kamayadi, va aksincha. Elektronlar holatlari zichligi $N(E)$ qattiq jismlarning barcha elektr xossalari (elektr o‘tkazuvchanligi, fotoo‘tkazuvchanligi, termoEYuK koeffitsiyenti, va hokazo) belgilovchi omillardan biri. Ko‘pgina yarimo‘tkazgichlarda $N(E)$ yaxshi o‘rganilgan, ammo legirlangan silikat shisha (LSSh) da holatlar zichligi haqida ma’lumot uchramadi. Faqatgina Jacoboni va Rizzi $g(E)$ ni

$$g(\mathcal{E}) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m^*}{\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} \sqrt{\mathcal{E}} \quad (1)$$

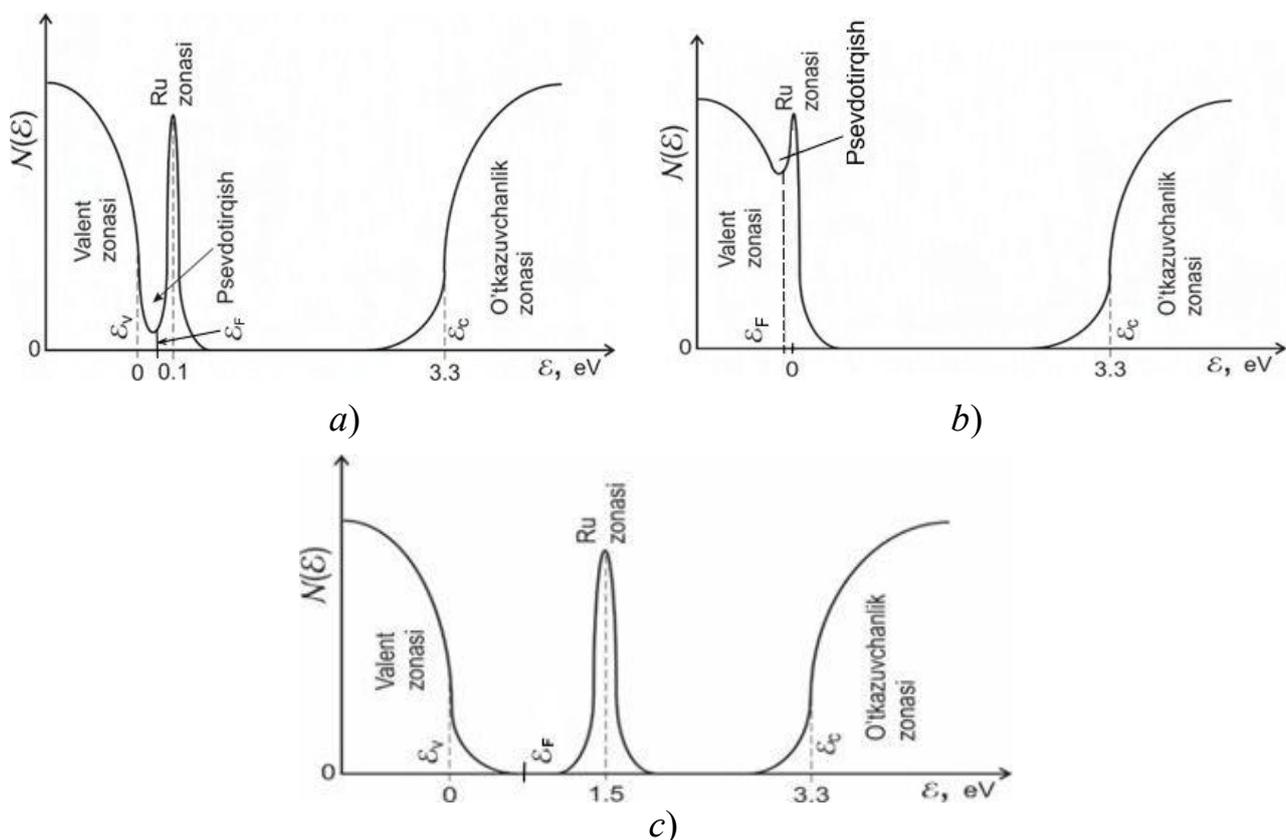
shaklida, LSSh ning elektr o‘tkazuvchanligini nazariy hisoblash uchungina ishlatishdi.

LSSh elektr xossalari bo‘yicha na dielektrik (yarimo‘tkazgich)larga, na metallarga o‘xshamaydigan unikal material (2-rasm). Past temperaturalarda (I hudud) LSSh ning solishtirma qarshiligi $\rho(T) \sim \exp(T_0/T)^\gamma$, $\gamma = 0.4-0.8$ (asosan $\gamma = 0.5$); xona temperaturasi atrofida minimum paydo bo‘ladi, keyin “metallsimon” ($\rho \sim T^\zeta$, $\zeta = 1-2$) o‘tkazuvchanlik kuzatiladi (II hudud). Juda yuqori temperaturalarda ($T > 700$ K) esa ρ keskin oshadi (5-6 martagacha) va maksimumga chiqadi (III hudud), keyin xuddi yarimo‘tkazgichlardagiday aktivatsiya qonuni bo‘ylab kamayadi (aktivatsiya energiyasi $E_\sigma = 0.5-1.5$ eV shishaning tarkibiga qarab).



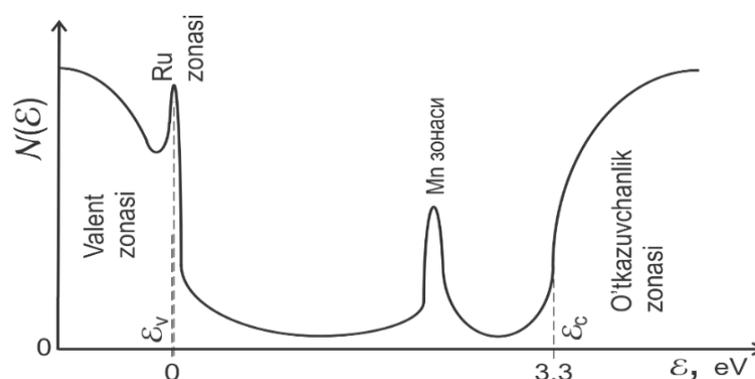
2-rasm. LSSh da solishtirma qarshilik ρ va termoEYuK koeffitsienti S ga temperaturaning ta'siri: (a) - shartli ravishda geliy temperaturasidan 1100 K gacha; (b) - tajribada 300 K dan 1100 K gacha. I, II va II - mos ravishda past, o'rta va yuqori temperatura hududlari

2-rasmdagi II hududda $\rho(T)$ ning minimumi paydo bo'lishi elektron-fonon bog'lanishi ta'sirida kiritma zonasi shishaning valent zonasi bilan birlashuvi oqibati ekanligi asoslangan edi. Kiritma zonasini temperatura bo'ylab $(2-5) \cdot 10^{-4}$ eV/K tezlik bilan siljiydi. Shunga ko'ra $T = 0$ K da kiritma zonasi shishaning valent zonasi shiftidan $E_g \approx 300 \cdot (2-5) \cdot 10^{-4} = 0.06-0.15$ eV masofada joylashgan (3a-rasm). Temperatura oshishi bilan shishaning taqiqlangan zonasi elektron-fonon bog'lanishi tufayli toraya boradi, ammo bu torayish (0.06-0.15 eV) taqiqlangan zona kengligiga (3.3 eV) nisbatan sezilarli bo'lmaydi. Kiritma zonasining siljishi esa bu zonaning xona temperaturasi atrofida valent zonasi bilan qo'shilishiga olib keladi (3b - rasm), oqibat LSSh da "metall" o'tkazuvchanligi paydo bo'ladi, chunki endi kovaklar konsentratsiyasi o'zgarmaydi, elektr o'tkazuvchanligining temperatura bo'ylab o'zgarishi faqat kovaklarning sochilishi tufayli bo'ladi.



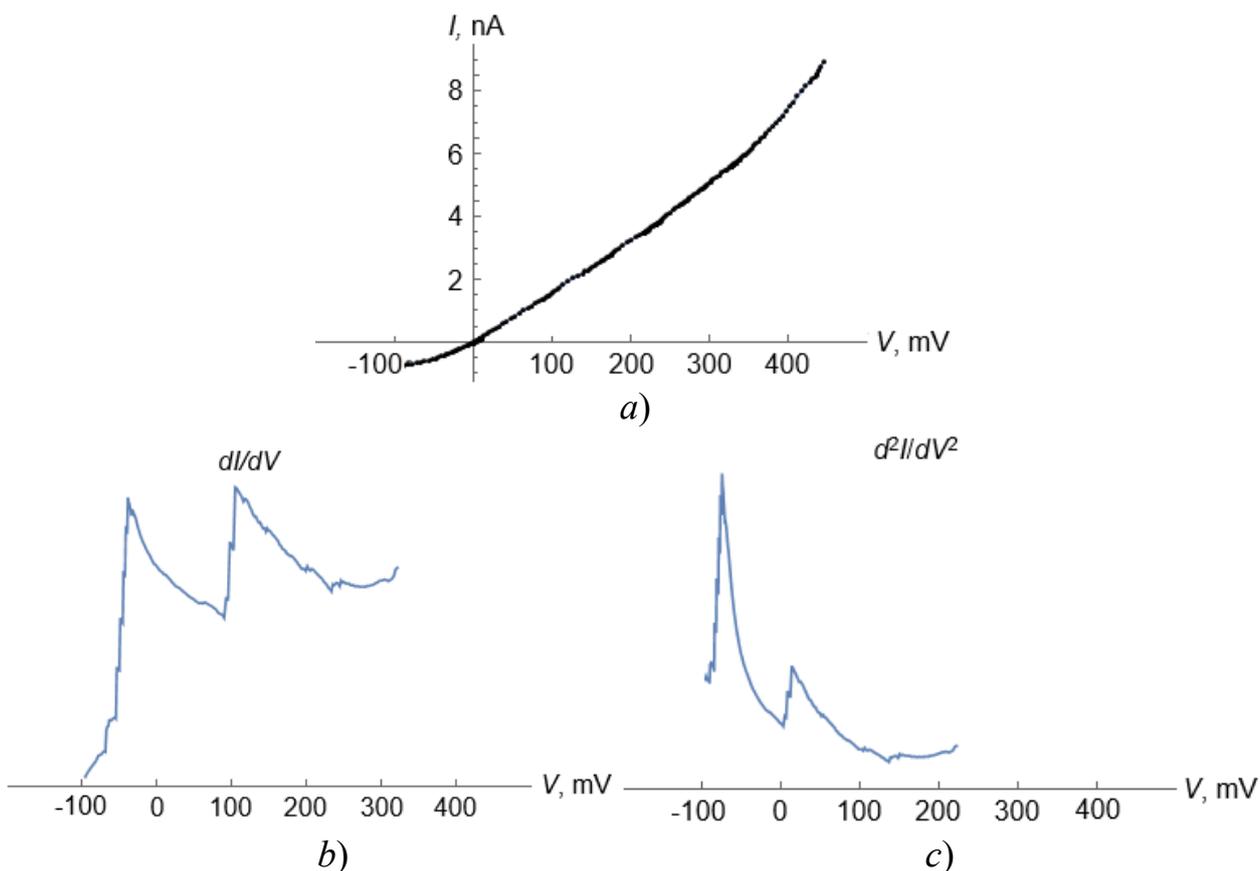
3-rasm. RuO₂ bilan LSSh da holatlar zichligining turli temperaturalarda (T , K) taqsimlanishi: (a) – 0; (b) – 300; (c) - 1000

Temperatura yanada ko‘tarilsa, 700 K atrofida silikatlarga xos struktura o‘tishlari yuz bera boshlaydi, atomlar orasidagi masofa oshib, kovaklarning to‘lqin funksiyalarining ustma-ustligi kamayadi va kiritma zonasi shishaning valent zonasidan ajralib, taqiqlangan zona o‘rtasiga tomon siljiydi. 1000 K atrofida silikatlarda struktura o‘tishlari yakunlanadi, kiritma zonasi endi siljimaydi (3c - rasimga qarang), natijada yarimo‘tkazgichlarga xos aktivatsiya o‘tkazuvchanligi paydo bo‘ladi. Bunda E_g ning qiymati LSSh ning tarkibiga qarab 1.5 eV gacha boradi va unda holatlar zichligi hisobga olmas darajada kamayadi, ya’ni psevdotirqish haqiqiy tirqishga aylanadi. 4-rasmda tasvirlangan legirlangan silikat shishada holatlar zichligining taqsimlanishi silikat shishaning optik xossalariga va Ru hamda Mn ning umumiy xossalariga tayanib taxmin qilingan edi.



4-rasm. RuO₂ va MnO₂ bilan legirlangan B34E silikat shishada holatlar zichligi (model)

Bu taxminni tajribada tasdiqlash uchun legirangan silikat shishada holatlar zichligini o'lchashning eng qulay usuli sifatida mikrokontakt spektroskopiyasi tanlandi. Ma'lum-ki, VAX ning birinchi hosilasi dI/dV mikrokontaktning elektr o'tkazuvchanligi Y ni beradi, ikkinchi hosilasi d^2I/dV^2 esa namunadagi holatlar zichligi $g(\mathcal{E})$ ga proporsional bo'ladi. Shunga ko'ra tajribada olingan $I(V)$ jadvalidagi sonlarga Wolfram Mathematica 11 dasturida ishlov berib, Y va $g(\mathcal{E})$ hisoblandi, bu kattaliklarning grafiklari chizildi (5-rasm).

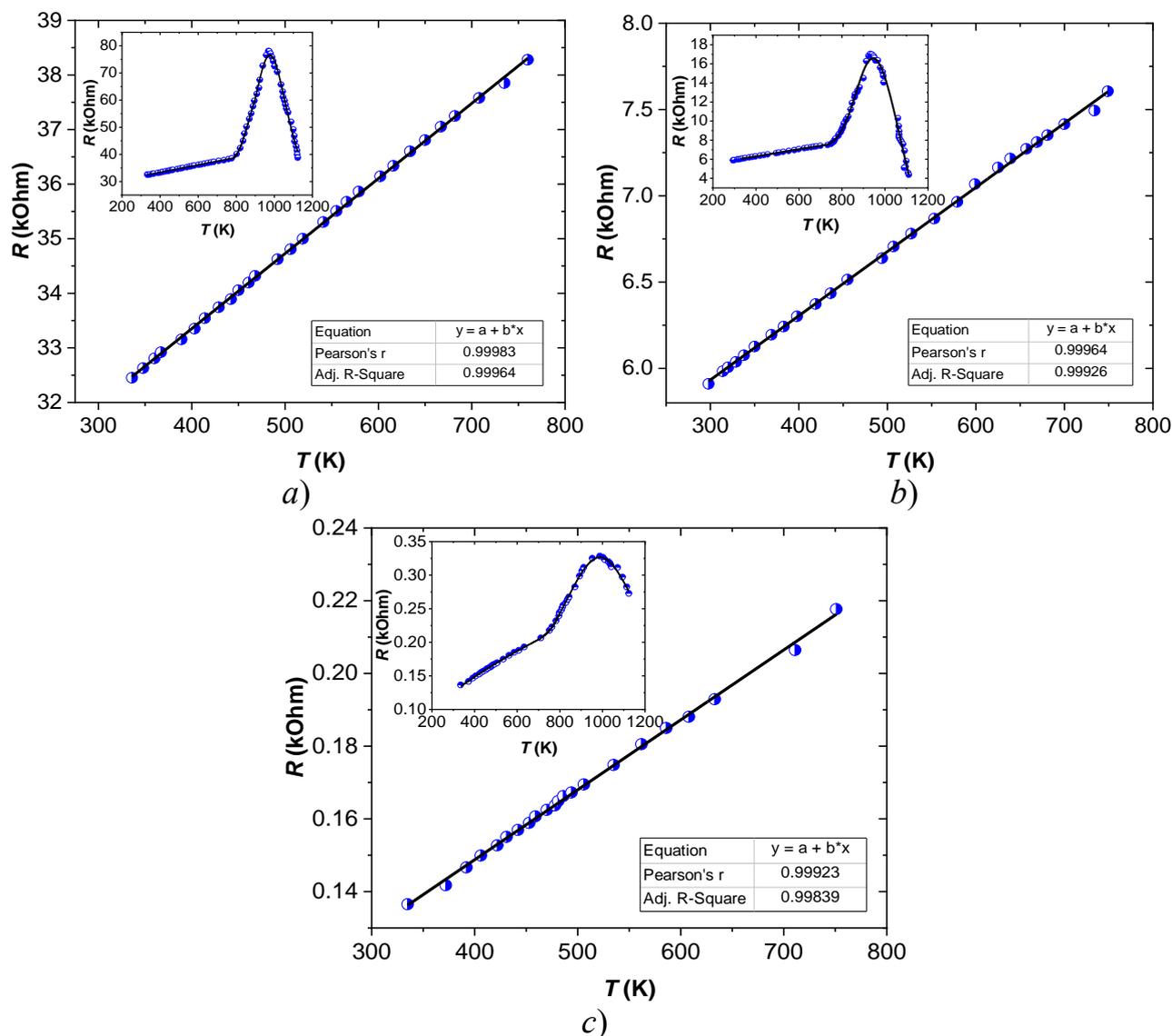


5-rasm. RuO_2 va MnO_2 bilan legirangan silikat shishaning a) past kuchlanishdagi volt-ampere xarakteristikasi (VAX); b) elektr o'tkazuvchanligi (VAX ning hosilasi); c) elektronlar holatlari zichligi (VAXning ikkinchi tartibli hosilasi)

4 va 5c-rasmlarni taqqoslashdan ularning o'xshashliklarini va farqini ko'rish mumkin. Jumladan, nazariy jihatdan RuO_2 hosil qilgan energetik sathlar shishaning valent zonasiga deyarli qo'shib turishi, MnO_2 zonasida esa undan ancha katta energiya tirqish bilan ajralishi lozim edi, tajribada bu sathlarning joylashuvi modelga mos keladi.

LSSH namunasini tayyorlash jarayonida pishirish davrida yuzaga keladigan fizik va kimyoviy jarayonlar, shuningdek silikatlarining tuzilmaviy o'zgarishlari mavjud maqolalarda yetarlicha o'rganilmagan. Xususan, LSSHni tayyorlashda kirishma miqdorining o'zgarishi, materialning ba'zi xususiyatlari, masalan, qarshilik (ρ) va Zeebek koeffitsiyenti (S) kabi xususiyatlarga katta ta'sir ko'rsatadi. Shu sababli, bu jarayonlarni batafsil o'rganish, LSSHning elektr o'tkazuvchanligini haroratga bog'liq ravishda o'zgarishini to'g'ri tushunish uchun juda muhimdir.

LSSh tarkibidagi birikmalarning yuqori haroratlarda yuzaga keladigan tuzilmaviy o'zgarishlari qarshilik (ρ) ni o'zgartiradi. Biz RuO₂ bilan legirlangan B34E silikat shishasida $T = 390-1040$ K oralig'ida $R(T)$ ning tegishli o'zgarishlarini kuzatdik (6-rasm).



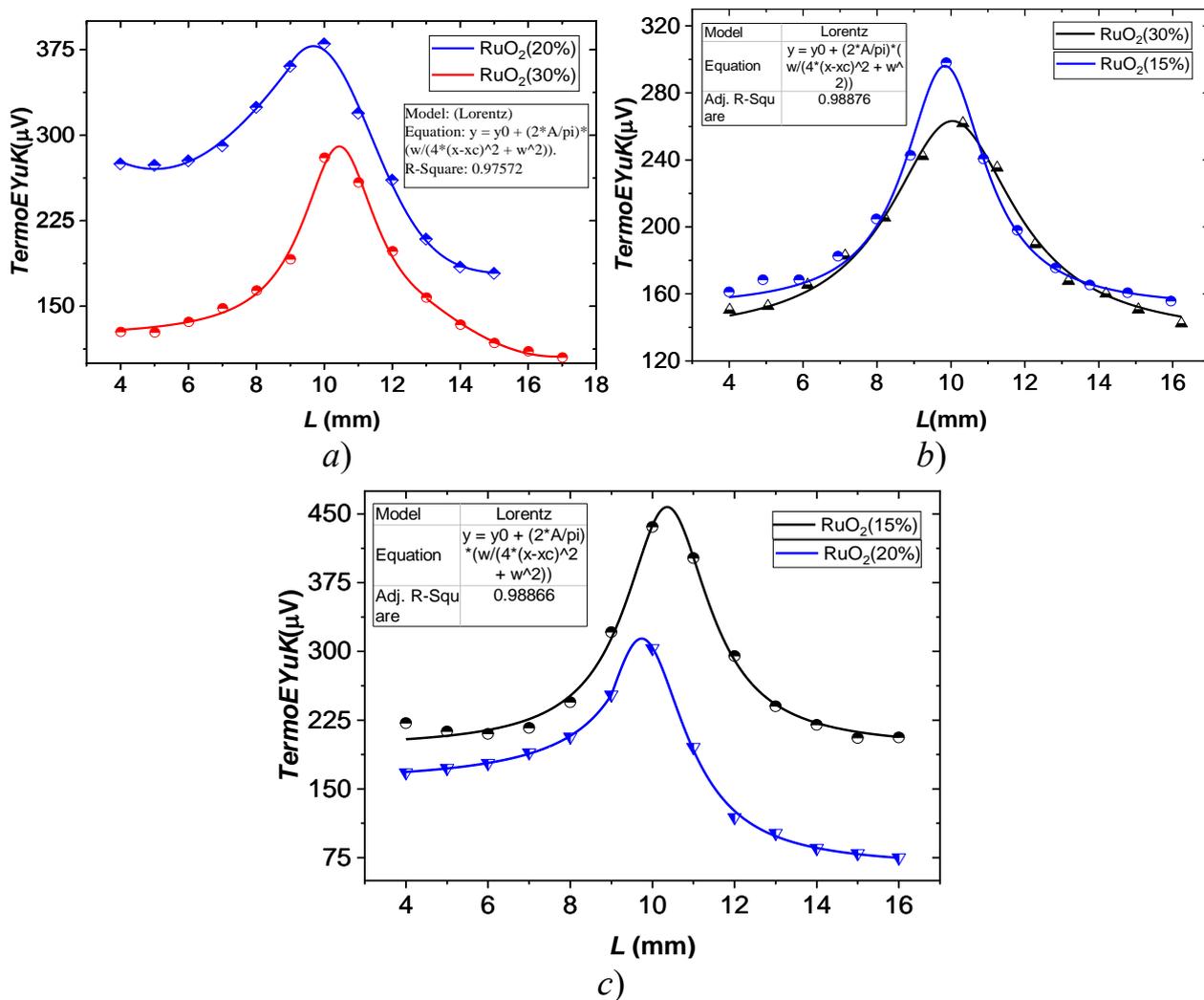
6-rasm. RuO₂ bilan legirlangan B34E shisha namunalarida qarshilikning temperatura bo'ylab o'zgarishi. Bunda RuO₂ ning konsentratsiyasi (massa %): a) 15, b) 20 va c) 30

Konsentratsiya ortgan sari o'tkazuvchi faza zarrachalari orasidagi masofa qisqaradi, bu esa zaryad tashuvchilarni bir zarrachadan boshqasiga o'tishini osonlashtiradi. Natijada, yuqori konsentratsiyalarda qarshilikning kamayishi kuzatiladi, past konsentratsiyalarda esa qarshilik yuqoriligicha qoladi.

Shuningdek, 6-rasmdan ko'rinib turibdiki, ma'lum bir harorat diapazonlarida (300-750K) qarshilik temperaturaga chiziqli bog'langan (juft korrelyatsiya koeffitsienti $R^2 > 0,99$).

Termoelektrik hodisalarning zamonaviy fizikadagi hal etilmagan muammolardan biri bu - termoelektrik yurutuvchi kuch (termoEYuK) $\Delta\varphi$ ning qayerda hosil

bo'lishidir. Keng tarqalgan qarashga ko'ra, termoEYUK (Seebeck effekti) $\Delta\varphi$ bir jinsli o'tkazgich hajmida harorat farqi (gradient) ΔT ta'sirida hosil bo'ladi: $\Delta\varphi = S \cdot \Delta T$. Biroq, ayrim tadqiqotchilar bunga zid fikr bildirishgan. Ushbu muammoni aniqlashtirish maqsadida, mazkur tadqiqotda termoEYUKning LSSh namunasi bo'ylab taqsimlanishini o'lchadik. Natijalar 7-rasmda keltirilgan.



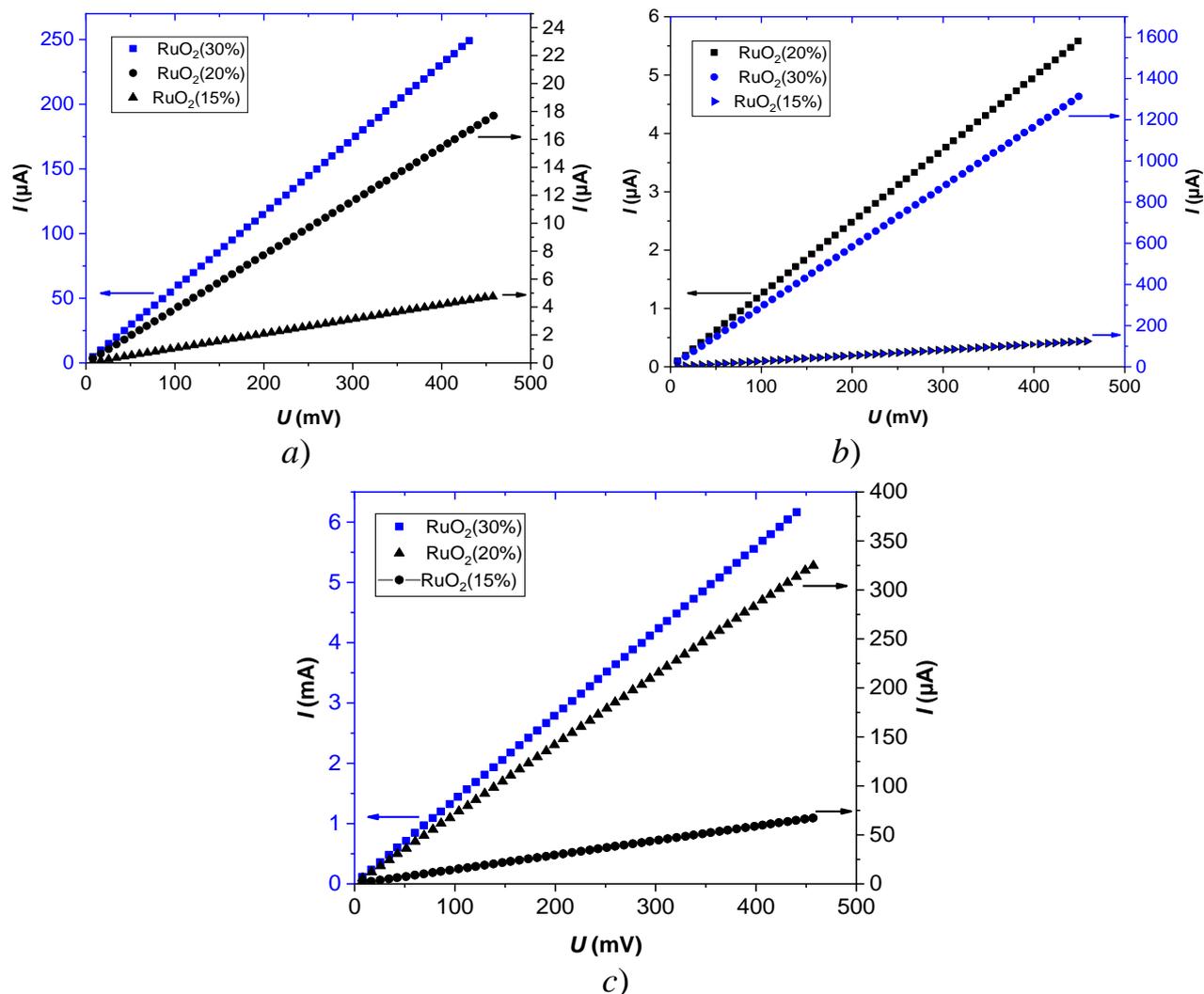
7-rasm. TermoEYuK ning namuna bo'ylab taqsimlanishi. a) B34E+RuO₂ (20 %, 30 %), b) B17+RuO₂ (15 %, 30 %) va c) PC5-1+RuO₂ (15 %, 20 %)

7-rasmdan quyidagi xulosalarga keldik: 1) LSShning termoEYuK koeffitsienti metall qatlammikidan ancha yuqori ekan; 2) RuO₂ miqdori ortishi bilan termoEYuK koeffitsienti kamayadi; 3) LSShning tarkibi bilan termoEYuK koeffitsienti o'rtasida aniq bog'lanish yo'q; 4) barcha namunalarda termoelementi bilan metall kontakt chegarasida termoEYuK maksimal qiymatga ega, ya'ni aynan shu chegarada termoEYuK paydo bo'ladi. Hosil bo'ladigan termoEYuK qiymati bir nechta asosiy omillarga bog'liq bo'lib, ular orasida materiallar orasidagi elektron tuzilma farqi, harorat gradienti (dT/dx), fazoviy chegaralarning molekulyar va kimyoviy tuzilishi, hamda aralashmadagi komponentlar nisbati alohida rol o'ynaydi. Ayniqsa, ruteniy oksidi (RuO₂) miqdori 20 % atrofida bo'lgan namunalarda eng yuqori termoelektrik samaradorlikni namoyon etdi. TermoEYuK ning tajribada aniqlangan taqsimoti

termoelektrik datchiklar yoki termoelektrik mikro generatorlar yaratishda muhim omil bo‘ladi.

Dissertatsiyaning to‘rtinchi bobi **“Legirlangan silikat shisha (qalin qatlamli rezistor) ning termoelektrik xossalriga deformatsiyaning ta’siri. Termoelektrik tenzodatchik”** deb nomlangan bo‘lib, bunda RuO₂ oksidi bilan LSSh namunalarda qarshilik va termoEYuKning bir o‘qli elastik deformatsiya tasirida o‘zgarish qonuniyatlari va ushbu namunalardan tenzodatchik sifatida foydalanish imkoniyatlariga bag‘ishlangan.

LSSh asosidagi namunalarning elektr o‘tkazuvchanligi va bu namunalarda omik kontakt hosil bo‘layotganligini tadqiq qilish uchun ushbu namunalarning volt-ampere xarakteristikasi(VAX) o‘rganildi. Tadqiqot natijalari 8-rasmda keltirilgan.



8-rasm. LSSh namunalarining VAX si. a) B17M+RuO₂ (15, 20 va 30%), b) B34E+RuO₂ (15, 20 va 30%) va c) PC5-1+RuO₂ (15, 20 va 30%)

Tajriba natijalari shuni ko‘rsatdiki, barcha namunalarning VAX grafigi to‘g‘ri chiziqli bo‘lib, ular ideal omik xususiyatga ega ekanligi kuzatildi. Eksperimental natijalarning chiziqliligi, ushbu namunalarni datchik sifatida qo‘llash imkoniyatlarini oshiradi.

Bir o'qli deformatsiyaning materialning elektr o'tkazuvchanligiga yoki deformatsiyaga sezgir bo'lgan boshqa xususiyatlariga ta'siri fan, texnika va tibbiyot sohalarida qo'llanilishi jihatidan juda muhimdir. Shu sababli, bir o'qli deformatsiyaning elektr va termoelektrik xossalarga ta'sirini o'rganish fundamental fan uchun ham, amaliy qo'llanmalar uchun ham katta ahamiyatga ega.

Ushbu tadqiqotda biz ruteniy oksidi bilan LSShning elektr o'tkazuvchanligi va termoEYuK xossalariining bir o'qli deformatsiya ta'sirida qanday o'zgarishini o'rgandik. Tadqiqot uchun maxsus LSSh namunasi tayyorlandi (1-jadval).

1-jadval

Legirlangan silikat shisha namunalarining tarkibi (mass. %)

Namu nalar	Shisha tarkibi								T_f/τ_f K/h	Ligatura (RuO ₂)
	SiO ₂	PbO	Al ₂ O ₃	BaO	CuO	MnO ₂	B ₂ O ₃	MgO		
B17	33	67							1773/1	30
B34E	27	67		4				2	1673/1	20
PC5-1	11	61.9	0.7		1.4	10	15		1623/1	30

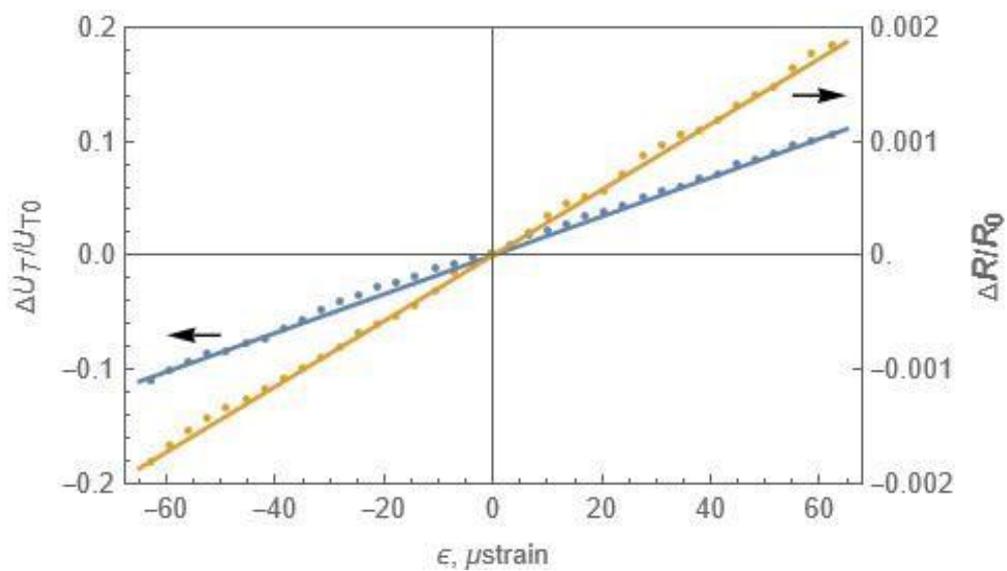
1 - jadvalda keltirilgan shisha tarkiblari uchun qarshilik va termoEYuK ning deformatsiyaga bog'liqligining o'lchash natijalari 8-rasmda ko'rsatilgan.

Ushbu grafiklardan quyidagi xulosalar chiqarildi:

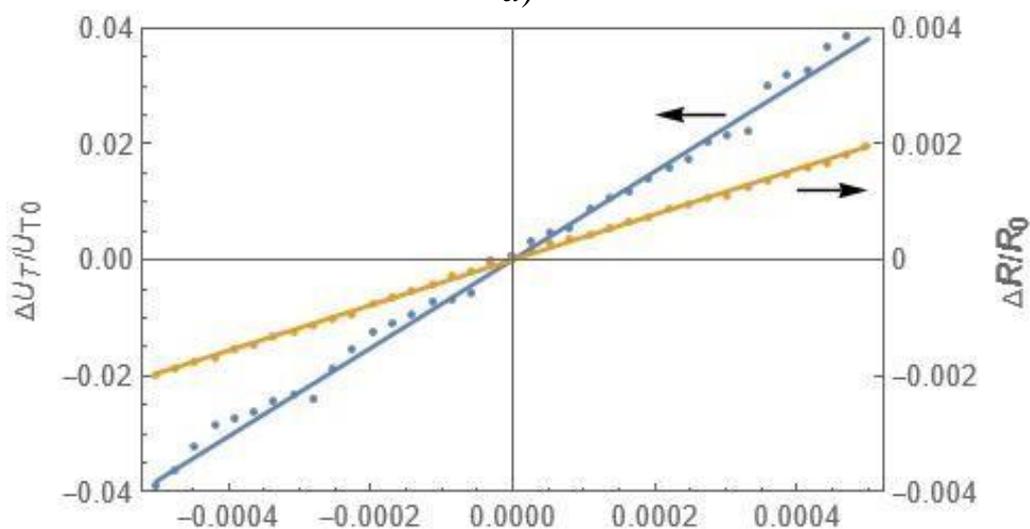
1. $R(\varepsilon)$ va $U_i(\varepsilon)$ bog'liqliklari yuqori aniqlik bilan chiziqli xarakterga ega.
2. GF_{UT} qiymati GF_R ga nisbatan 20-120 baravar katta.
3. RuO₂ ligatura miqdori kamaygani sayin GF_{UT} oshadi, ammo GF_R esa aksincha, kamayadi.
4. Boshlang'ich termoEYuK (U_{T0}) GF_{UT} bilan bog'liq emas, biroq boshlang'ich qarshilik (R_0) GF_R bilan to'g'ridan-to'g'ri bog'liq.
5. Shisha tarkibi GF_{UT} qiymatiga katta ta'sir ko'rsatadi (2-jadval), lekin bu bog'liqlikni aniq tushunish uchun qo'shimcha tadqiqotlar zarur.
6. TermoEYuK mexanik deformatsiyani aniqlashda qarshilikka qaraganda o'nlab baravar sezgirroq. Shu sababli, uni tenzodatchik sifatida ishlatish mumkin va bu parametr aniqroq ma'lumot olish imkonini beradi.

2-jadvalda esa qarshilik va termoEYuK ning boshlang'ich qiymatlari, qarshilikning deformatsiyaga bog'liqligi $R(\varepsilon)$ va termoEYuK ning deformatsiyaga bog'liqligi $U_i(\varepsilon)$ asosida hisoblangan tenzo sezgirlik qiymatlari hamda GF_R va GF_{UT} ning nisbatlari keltirilgan. Bu jadvaldagi GF_R va GF_{UT} ning qiymatlari quyidagi formula yordamida hisoblangan:

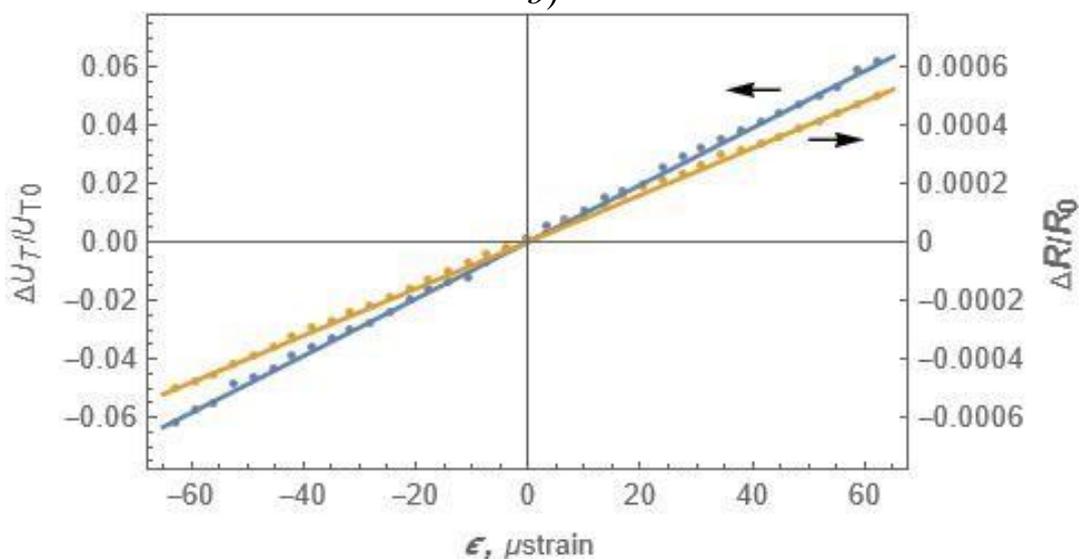
$$GF_R = \frac{\Delta R/R_0}{\varepsilon}, \quad GF_{UT} = \frac{\Delta U_T/U_{T0}}{\varepsilon} \quad (2)$$



a)



b)



c)

9-rasm. RuO₂ bilan LSSh namunalarda $R(\epsilon)$ va $U_t(\epsilon)$ grafigi. Bunda a) B17+RuO₂ (30%), b) B34E+RuO₂(20%) va c) PC5-1+RuO₂(30%)

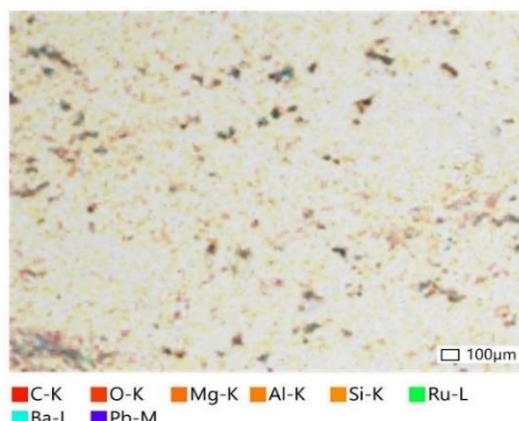
Namunalarning boshlang'ich qarshiligi R_0 , boshlang'ich termoEYuK U_{T0} , termoEYuK koeffitsienti S , qarshilik va termoEYuK boyicha tenzosezgirlik GF_R va GF_{UT} , ularning nisbati GF_{UT}/GF_R

Namunalar	R_0, OM	$U_{T0}, \mu\text{V}$	$S, \mu\text{V/K}$	GF_R	GF_{UT}	GF_{UT}/GF_R
B17	1199	306	9.3	29	1673	58
B34E	3646	217.1	6.6	31	661	21
PC5-1	166.6	1.184	0.036	7.9	973	123

Bizning tadqiqotlar shuni ko'rsatdiki, namunalarda ligatura zarrachalari bir-biri bilan bevosita tutashmagan. Bu xulosa energiya dispersion spektrometr yordamida o'tkazilgan tahlillar asosida chiqarilgan. B34E shisha namunasida asosiy elementlarning yuzadagi taqsimoti 10-rasmda ko'rsatilgan.

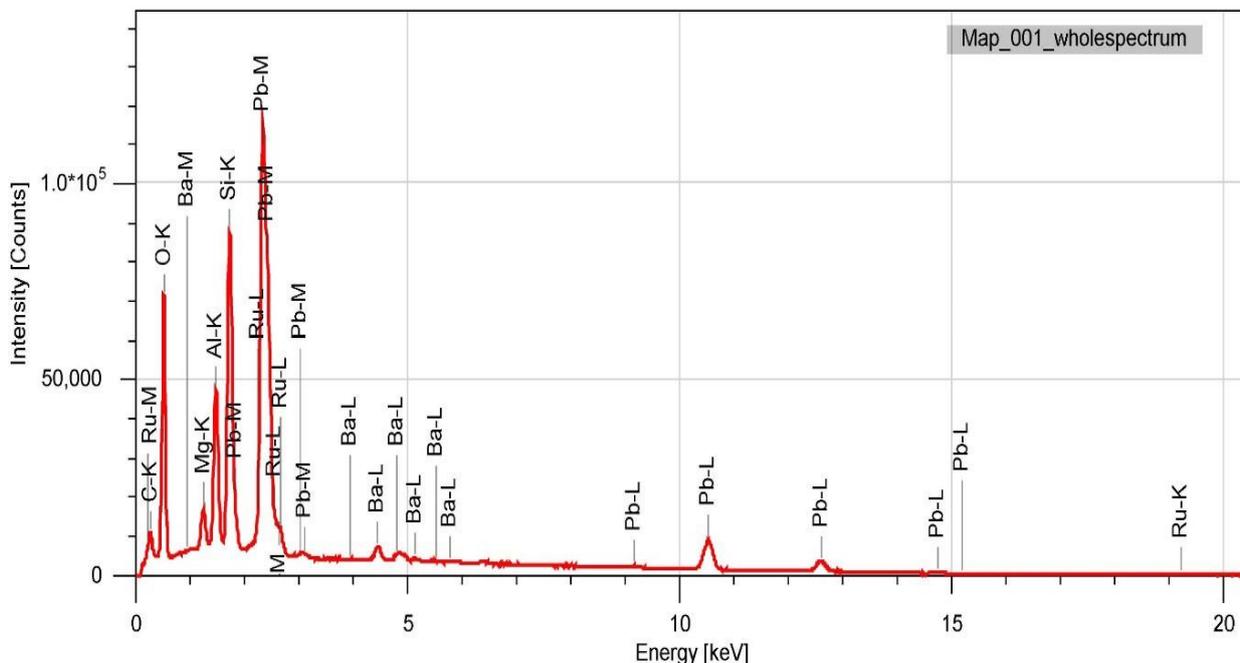
Bundan tashqari, mazkur namunaga tegishli to'liq energiya dispersion spektr (element tarkibi) 11-rasmda berilgan. Natijalarga ko'ra, energiya dispersion spektrometr yordamida aniqlangan legirlangan shisha tarkibi B34E shisha kompozitsiyaning 1-jadvaldagi dastlabki tarkibi bilan to'liq mos keladi.

10 va 11-rasmlar natijalari ushbu tadqiqotda ilgari surilgan gipotezani tasdiqlaydi. Tadqiqot shuni ko'rsatdiki, boshqariladigan deformatsiya natijasida materialning mikrotuzilmasi o'zgarib, RuO_2 bilan legirlangan silikat shishaning qarshilik va termoEYuK qiymatlariga ta'sir qiladi. Bu o'zgarish fazaviy modifikatsiya jarayonlariga o'xshash mexanizmlar orqali sodir bo'lishi mumkin. 10-rasmdagi tahlil natijalari shuni tasdiqlaydi: RuO_2 zarrachalari shisha matritsada bir xil taqsimlangan bo'lib, ular o'zaro bevosita tutashmagan. Bu esa LSShlarda elektr o'tkazuvchanlik faqat o'tkazuvchi zarrachalar orasidagi bevosita kontakt orqali emas, balki boshqa mexanizmlar bilan amalga oshishini ko'rsatadi. Elektr o'tkazuvchanlik asosan silikat nanokristallari bo'ylab zaryad tashuvchilarning sakrashi hamda pishirish jarayonida hosil bo'lgan kiritma zonasi orqali harakati (aktivatsion o'tkazuvchanlik) hisobiga yuzaga keladi.



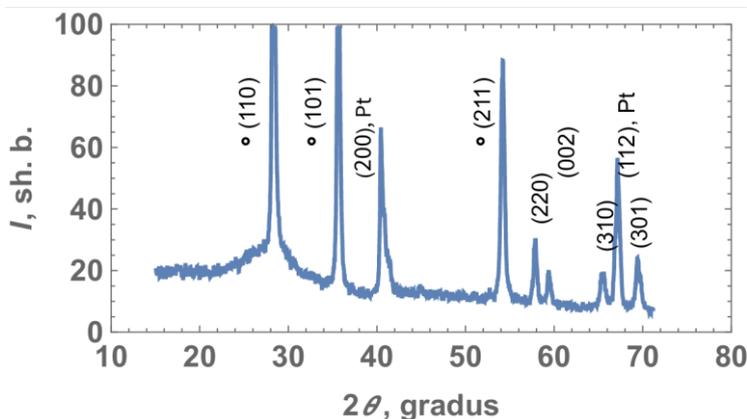
10-rasm. B34E shisha namunasiga tegishli yuzaning skanerlovchi elektron mikroskopdagi tasviri (elementlar taqsimoti)

RuO₂ zarrachalari bir-biridan uzoqda joylashgan va o‘zaro bevosita tutashmagan. Bundan tashqari, RuO₂ zarrachalarining bir-biri bilan bevosita kontaktda emasligi deformatsiya ta’sirida qarshilik va termoEYuK ning o‘zgarishi zarrachalar orasidagi kontakt maydonining o‘zgarishi bilan bog‘liq emasligini anglatadi. Buning o‘rniga, o‘zgarishlar atomlar orasidagi bog‘lanish masofasi va bog‘lanish burchaklarining o‘zgarishi natijasida yuzaga keladi. Ya’ni, elektr o‘tkazuvchanlik asosan legirlangan shishadagi atomlarning o‘zaro ta’siri orqali tartibga solinadi.



11-rasm. B34E shisha namunasining to‘liq energiya dispersion spektri (elementlar tarkibi)

B34E shisha namunasining fazaviy tarkibini o‘rganish maqsadida rentgen difraksiyon tahlil (XRD) usuli qo‘llanildi. Tadqiqotda 15 mass % miqdorda ruteniy dioksid (RuO₂) qo‘shilgan B34E shisha kukunida XRD tahlili o‘tkazildi. O‘lchovlar 2θ burchaklar oralig‘ida 10° dan 80° gacha CuK α nurlanishi (λ = 1.5406 Å) ostida amalga oshirildi (12-rasm).



12-rasm. B34E shisha namunasining XRD natijalari

B34E shisha namunasining XRD spektrida yangi aniq diffraksiyon cho‘qqilar paydo bo‘ldi. Bu cho‘qqilar ruteniy dioksidning tetragonal kristall strukturasi mos

keluvchi PDF karta (No. 88-0322) bilan to'liq moslashadi. Natijada, XRD tahlili namunada RuO_2 kristall fazasi hosil bo'lganini yaqqol ko'rsatdi. Bu holat shuni anglatadiki, RuO_2 ni shisha matritsaga qo'shish natijasida amorf struktura saqlanib qolgan bo'lsa-da, uning fonida aniq kristall zarrachalar - nanokristallar shakllangan. Bu esa olingan materialning fizik-kimyoviy xossalariga sezilarli ta'sir ko'rsatishi mumkin.

Legirlangan silikat shishada qarshilik va termoEYuK ning tenzo sezgirligi oddiy kontakt mexanizmi bilan bog'liq emasligini RuO_2 miqdori kamayganda GF_{UT} ning oshishi ham tasdiqlaydi. Biroq, ushbu tadqiqotda o'rganilgan kompozitsiyalar GF_{UT} ni maksimal qiymatga yetkazish uchun maxsus tanlanmagan. Bu shuni anglatadiki, legirlangan shishaning tarkibini takroriy tajribalar o'tkazish va eng maqbul kompozitsiyani tanlash orqali tenzo sezgirlikni yanada oshirish mumkin.

XULOSA

Ushbu dissertatsiyada ruteniy va marganes oksidlari bilan legirlangan silikat shishalarning energetik strukturalari, elektrotransport va termoelektrik xossalari tizimli ravishda nazariy va eksperimental asosda o'rganildi. Olib borilgan tadqiqotlar natijasida quyidagi ilmiy yangiliklar va natijalar olindi:

1. Legirlangan silikat shishada termoEYuK koeffitsientining bir o'qli deformatsiya ta'sirida o'zgarishi elektr o'tkazuvchanlikning bir xil sharoitdagi o'zgarishlariga nisbatan o'nlab marta katta bo'lishi mumkinligi tajribada ilk bora isbotlandi va kiritma zonasi bilan shishaning valent zonasi orasida hosil bo'luvchi psevdotirqishda holatlar zichligining taqsimlanishi orqali tushuntirildi.
2. Mexanik deformatsiyaning legirlangan silikat shishada taqiqlangan zona kengligiga ta'siri Kroning-Penni modeliga tayangan holda asoslandi.
3. Legirlangan silikat shishada valent zonasi bilan kiritma zonasi orasida psevdotirqish hosil bo'lishi mikrokontakt spektroskopiyasi yordamida ilk bora aniqlandi.
4. Ilk bor, legirlangan silikat shisha namunalarida bir o'qli deformatsiyaning termoEYuK ga ta'siri (GF_{UT}) o'lchandi va uning xuddi shu namunalarda qarshilikka deformatsiyaning ta'siridan (GF_R) 20-120 baravar yuqori ekanligi aniqlandi.
5. Ilk bor, termoEYuK ga deformatsiyaning ta'siri asosida o'ta sezgir tenzodatchiklar yaratish mumkinligi isbotlandi va termoelektrik tenzodatchikka ixtiro sifatida patent olish uchun talabnoma topshirildi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 ПО РИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ИНСТИТУТЕ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ**

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ УЗБЕКИСТАНА
ИМЕНИ МИРЗО УЛУГБЕКА**

ТУРСУНОВ МУХРИДДИН ЭГАМКУЛОВИЧ

**ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИИ НА ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
ЛЕГИРОВАННОГО СИЛИКАТНОГО СТЕКЛА
(ТОЛСТОПЛЕНОЧНОГО РЕЗИСТОРА)**

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

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

Ташкент – 2025

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистана за номером B2024.2.PhD/FM1115

Диссертация выполнена в Национальном университете Узбекистана имени Мирзо Улугбека.

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

Научный руководитель: **Абдурахманов Гулмураза**
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Муссаева Малика Анваровна**
доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Турсункулов Ойбек Муйдинович
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник

Ведущая организация: **Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова**

Защита диссертации состоится «_____» _____ 2025 г. в _____ часов на заседании Научного совета DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 при Институте ядерной физики (100124, г. Ташкент, пос. Улугбек, Институт ядерной физики; тел. (+99871) 289-31-41; e-mail: info@inr.uz).

С докторской диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института ядерной физики (регистрационный номер _____). (100124, г. Ташкент, поселок Улугбек, ИЯФ; тел. (+99871) 289-31-19).

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2025 г.
(Реестр протокола рассылки № _____ от _____ 2025 г.)

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

О.Р. Тожибоев
ученый секретарь Научного совета
по присуждению ученых степеней,
PhD ф.-м.н., старший научный сотрудник

С.Б.Игамов
председатель научного семинара при Научном
совете по присуждению ученых степеней,
д.т.н., старший научный сотрудник

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В последние годы изучение электро-транспортных и термоэлектрических свойств силикатных стекол, легированных оксидами металлов, приобретает особую значимость как для фундаментальной физики, так и для развития прикладных технологий. Материалы данного типа, изготавливаемые на основе толстоплёночной технологии, отличаются низкой себестоимостью, экологической безопасностью, высокой термостойкостью, стабильными электро-транспортными характеристиками и технологической простотой. В связи с этим в мировой практике активно развиваются устройства на основе силикатных стекол, легированных различными оксидами металлов, такие как термоэлектрические генераторы, тензорезистивные элементы, датчики температуры и давления. Кроме того, особенности взаимодействия структурных элементов в легированных силикатных стёклах, их способность управлять переносом носителей заряда и чувствительность к внешним воздействиям открывают широкие возможности для их применения в качестве функциональных элементов, стабильно работающих в различных измерительных системах. Все это усиливает научный и практический интерес к данным материалам и способствует дальнейшему расширению направлений исследований в данной области.

За последнее десятилетие в мировой науке активно ведутся исследования энергетических зон, легированных состояний, изменений ширины запрещённой зоны под воздействием деформации, а также туннельных и перколяционных механизмов проводимости в силикатных стёклах. Учёные США, Японии, Китая, Канады и Европы последовательно анализируют электрофизические и термоэлектрические свойства таких материалов. Однако степень изменения термоЭДС в силикатных стёклах, легированных RuO_2 и MnO_2 , под воздействием деформации, её микроструктурные причины, а также связь с энергетическими разрывами до настоящего времени изучены недостаточно полно. Поэтому проведение фундаментальных исследований в данном направлении является научно и практически актуальным.

В Республике Узбекистан в последние годы также активно развиваются научные исследования по изучению электрофизических и термоэлектрических свойств силикатных стекол, легированных оксидами металлов. В частности, в Национальном университете Узбекистана имени Мирзо Улугбека, Ташкентском государственном техническом университете имени Ислама Каримова, Институте ядерной физики Академии наук и других научных центрах проводятся исследования температурной зависимости удельного сопротивления, микроструктурных изменений, генерации термоЭДС в контактных зонах, формирования прозрачных проводящих структур и нанокластерных слоёв оксидов металлов. Рост потребности в импортозамещающих чувствительных датчиках, модернизация электроники и автоматизированных систем, а также

создание энергосберегающих устройств в промышленности страны усиливают практическую значимость данного направления исследования.

Исследования в этой области соответствуют целям и задачам, предусмотренным в Указах Президента Республики Узбекистан № УП-60 «О Стратегии развития нового Узбекистана на 2022-2026 гг.» от 28 января 2022 года, № УП-6097 «Концепция развития науки до 2030 года» от 29 октября 2020 года, Постановлении Президента Республики Узбекистан № ПП-4426 «О расширении кооперационных связей между отраслевыми предприятиями и развитии локализации» от 24 августа 2019 года, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Диссертационная работа выполнена в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий республики П. «Энергетика, энергосбережение и альтернативные источники энергии».

Степень изученности проблемы. Изучением электрофизических и термоэлектрических свойств легированных силикатных стекол занимались и занимаются многие учёные в мире, в том числе немецкие (Y.G. Magnus, K. Maurer, H. Schmidt, R. Müller, Joseph P. Heremans), британские (U. Thomson, A. Paul, J. Zarzycki), американские (G.E. Pike, C.H. Seager, Z.H. Meiksin, G.C. Kuczynski, J. Shelby, R. Brow, M. Tomozawa, J. MacKenzie), японские (T. Minami, M. Tatsumisago, Ken Kurosaki, Anek Charoenphakdee, Shinsuke Yamanaka), китайские (X. Guan, M. Wen, H. Li, J. Ou), итальянские (C. Meneghini, S. Mobilio, F. Pivetti, I. Selmi, M. Prudenziati, B. Morten), французские (D. Nassau, P. Richet), российские (N.V. Morozova, V.V. Shchennikov, S.V. Ovsyannikov, A.S. Gusev, S.V. Zaitsev, V.V. Osipov), словенские (M. Hrovat, D. Belavič, Z. Samaržija, J. Holc), индийские (D.P. Rai), белорусские (V. Ksenovich), узбекистанские (G. Abdurakhmanov, A. Dekhkonov, D. Toshmukhammedova, I. Nuritdinov, B. Umrzoqov, M. Mussayeva, A. O'roqov) и другие специалисты.

Проблема влияния деформации на электрическую проводимость и термоэлектрические свойства материалов изучается с середины XIX века. В последние годы проводятся последовательные исследования электрических и термоэлектрических характеристик силикатных стёкол, легированных оксидами металлов. Показано, что процессы деформации в таких материалах обусловлены не только геометрическими изменениями, но и перестройкой локальной структуры, диффузией носителей заряда и формированием энергетических состояний. Многие исследователи по всему миру разработали на основе легированных силикатных стёкол высокотемпературные электроды, толстоплёночные резисторы, прозрачные проводники, пьезо- и тензорезистивные элементы, а также чувствительные слои для газовых и датчиков давления. Опубликованы многочисленные научные результаты о распределении энергетических состояний электронов, туннельных механизмах проводимости между включениями, перколяционных порогах и пространственном распределении коэффициента Зеебека в силикатных стёклах,

легированных оксидами металлов. Для объяснения зависимости термоэлектрической чувствительности от температуры, структуры и деформации предложены микроструктурные модели.

Тем не менее комплексное влияние деформации на электрическую проводимость и термоэлектрические свойства толстоплёночных резисторов на основе легированных силикатных стёкол, в частности, пространственное распределение коэффициента Зеебека, а также связь электрической и термоэлектрической проводимости с энергетическими разрывами до сих пор полностью не раскрыты. Кроме того, отсутствует единое представление о механизме формирования включений и псевдощелей в силикатном стекле при введении оксидов металлов как легирующих добавок. Энергетическая плотность состояний в таких материалах также остаётся недостаточно изученной.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в соответствии с планом научно-исследовательских работ Национального университета Узбекистана в рамках прикладного проекта Uz-Ind-2021-78 “Термоэлектрические свойства и процессы самосборки силикатов, легированных металлическими оксидами” (2021 - 2023).

Целью исследования является выявление механизмов влияния одноосной упругой деформации на электрическую проводимость и термоэлектрические свойства легированного силикатного стекла.

Задачи исследования:

подготовка образцов легированного силикатного стекла с необходимым составом и контроль их состава;

определение структуры и фазового состава образцов методом рентгеновской дифракции (XRD);

экспериментальное исследование влияния деформации на электрическую проводимость;

определение зависимости коэффициента Зеебека от деформации;

определение фазового распределения термоЭДС;

установление связи изменений проводимости с энергетическими зонами;

оценка чувствительности термоэлектрического тензодатчика.

Объектом исследования является силикатное стекло, легированное оксидами рутения (RuO_2) и марганца (MnO_2).

Предметом исследования являются электрическая проводимость, термоэлектрические свойства легированного силикатного стекла и механизмы воздействия на них одноосной упругой деформации.

Методы исследований: технология нанесения толстоплёночных покрытий; рентгеновская дифракция (XRD); энергодисперсионная спектроскопия (EDS); испытания методом трёхточечного изгиба; измерение вольт-амперных характеристик (ВАХ) и определения коэффициента Зеебека; использование программных средств CorelDraw 2018, Компас 3D v.17, Wolfram Mathematica v.13 и Origin 2018 для обработки и анализа экспериментальных данных.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

установлено, что положение примесной зоны в запрещённой зоне силикатного стекла, легированного оксидом рутения, распределение плотности энергетических состояний в формирующейся псевдощели, а также смещение уровня Ферми в сторону валентной зоны являются ключевыми факторами, определяющими величину коэффициента термоЭДС;

установлено, что влияние деформации на коэффициент термоЭДС в легированном силикатном стекле существенно превосходит её влияние на электрическую проводимость (в 20-120 раз), что объясняется в рамках теории Мотта через изменение распределения плотности локализованных состояний;

определено методом микроконтактной спектроскопии распределение плотности энергетических состояний в силикатных стеклах, легированных оксидами рутения и марганца, и установлено формирование псевдощели в исследованных образцах;

установлено, что в основном термоЭДС в образцах легированного силикатного стекла возникает в области контакта легированного стекла с серебряным проводником, то есть вблизи границы двух разнородных материалов.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

установлено, что на основе измерения термоЭДС в силикатном стекле, легированном оксидами рутения и марганца и изготовленного по технологии толстых плёнок, возможно создание высокочувствительного к деформации датчика (чувствительность в 20-120 раз выше по сравнению с изменением сопротивления); лабораторный образец такого датчика был изготовлен и испытан.

Достоверность результатов исследования обеспечивается воспроизводимостью экспериментальных данных, подтверждённой сериями повторных измерений, выполненных с использованием современных высокоточных приборов (XRD, EDS, цифровые мультиметры, тепловизор и др.). Полученные результаты не противоречат современным научным представлениям, согласуются с известными закономерностями и хорошо описываются предложенной физической моделью исследуемых процессов.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость заключается в последовательном изучении электрических и термоэлектрических свойств легированных силикатных стёкол, изготовленных по технологии толстоплёночного нанесения, при воздействии деформации и температуры. Полученные результаты формируют научную основу для понимания чувствительности таких материалов к внешним воздействиям, целенаправленного управления их электрофизическими характеристиками и разработки сенсорных элементов нового поколения.

Практическая значимость состоит в том, что предложенные конструктивные и технологические решения открывают возможность создания импортозамещающих, локализованных датчиков, предназначенных для

практического применения в энергетике, транспорте и промышленной автоматизации.

Внедрение результатов исследования. На основе полученных результатов о влиянии деформации на термоэлектрические свойства легированного силикатного стекла (толстоплёночного резистора):

установленные ключевые факторы, определяющие величину коэффициента термоЭДС; а также данные о возникновении термоЭДС в области контакта двух разнородных материалов были использованы на физическом факультете Национального университета Узбекистана имени Мирзо Улугбека в рамках узбекско-белорусского совместного прикладного исследовательского проекта PL-4821091628 «Формирование наноструктурированных графеновых плёнок в прозрачных проводящих оксидах металлов для применения в фотоэлектрике и механизмы переноса зарядов в них» (письмо Национального университета Узбекистана имени Мирзо Улугбека № 01/11-7616 от 18 июня 2025 года). Использование научных результатов позволило объяснить изменение удельного сопротивления при его измерении в наноструктурированных графеновых плёнках проводящих оксидов металлов в зависимости от деформации, а также интерпретировать термоэлектрические свойства слоёв оксидов металлов;

определенная существенная чувствительность коэффициента термоЭДС к деформации, распределение плотности энергетических состояний в силикатных стеклах, легированных оксидами рутения и марганца, а также формирование псевдощели в исследованных образцах были использованы в Ташкентском техническом университете имени Ислама Каримова в рамках узбекско-турецкого совместного прикладного исследовательского проекта AL-202102215 «Интегрированная система с микрожидкостным каналом на основе Si с ферромагнитными нанокластерами для захвата циркулирующих раковых клеток» (письмо Ташкентского технического университета имени Ислама Каримова № 01/9-14-2398 от 8 сентября 2025 года). Использование научных результатов позволило применить лабораторный образец нового высокочувствительного термоэлектрического тензодатчика, основанного на изменении термоЭДС, для измерения и регулирования давления жидкости в микроканалах, а также для определения магнитных свойств нанокластеров.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 5 международных и республиканских научно-практических конференциях.

Публикация результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 9 научных работ, в том числе 4 статьи в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией для публикации основных научных результатов диссертаций, из них 2 в зарубежных научных журналах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованной литературы. Объем диссертации составляет 125 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении представлены анализ результатов, полученных различными исследователями по теме диссертации, обоснована актуальность и необходимость проводимого исследования, сформулированы цель и задачи работы, определены объект и предмет исследования. Показано соответствие темы диссертации приоритетным направлениям развития науки и технологий в Республике Узбекистан, изложены научная новизна и практические результаты исследования, обоснована их достоверность, раскрыто теоретическое и практическое значение полученных результатов. Также приведены сведения о внедрении разработок в практику, апробации работы, опубликованных материалах и структуре диссертации.

Первая глава диссертации **“Влияние деформации на электрическую проводимость различных материалов. Тензодатчик”** посвящена теоретическому и экспериментальному анализу влияния одноосной упругой деформации на электрическую проводимость и термоэлектрические свойства различных материалов - металлов, полупроводников и толстоплёночных резисторов. В главе рассмотрено влияние деформации на электрическую проводимость и коэффициент Зеебека, а также раскрыта взаимосвязь между этими изменениями и структурно-параметрическими трансформациями материалов, включая появление внедрённых уровней в энергетических зонах.

Также проанализированы фундаментальные исследования, экспериментальные методы и физические модели, посвящённые влиянию деформации на термоэлектрические явления. Особое внимание уделено факторам, способствующим повышению чувствительности электротранспортных свойств в условиях одноосной упругой деформации, линейной зависимости термоэлектрического напряжения от деформации и их взаимосвязи со структурными особенностями материалов. Показано, что в композиционных материалах на основе стекла решающую роль играют процессы диффузии, локальные структурные нарушения и энергетические внедрённые уровни.

В завершении главы, на основе анализа недостаточной изученности комплексного поведения электрических и термоэлектрических свойств легированных силикатных стёкол в условиях деформации, были сформулированы цель диссертации и научно-исследовательские задачи.

Вторая глава диссертации **“Технология изготовления и методы исследования образцов на основе легированного силикатного стекла”** посвящена процессу подготовки образцов на основе легированного силикатного стекла, а также экспериментальным установкам и методикам, использованным для исследования их физических свойств. В главе изложены технологические решения, применённые для анализа структурных, морфологических, электрических и термоэлектрических параметров синтезированных образцов.

В качестве исследуемых материалов были выбраны образцы силикатного стекла, легированные оксидами RuO_2 и MnO_2 , приготовленные по технологии

толстоплёночного нанесения. Их фазовый состав исследовался методом рентгеновской дифракции (XRD), а морфология - с использованием сканирующего электронного микроскопа с энергодисперсионной спектроскопией (EDS). Для изучения зависимости электрической проводимости и термоэлектрических свойств от деформации была разработана специальная установка трёхточечного изгиба.

Третья глава диссертации **“Примесная зона, энергетическая щель и электрическая проводимость в легированном силикатном стекле”** посвящена исследованию влияния деформации на электрическую проводимость и термоэлектрические свойства легированных силикатных стёкол.

В данной главе теоретически проанализированы механизмы изменения электрической проводимости и термоЭДС в условиях деформации на основе модели Кронинга-Пенни и механизма Мотта, описывающих процессы электротранспорта в твёрдых телах. Также экспериментально и теоретически обосновано влияние внедрённых энергетических уровней, фазовых превращений и плотности состояний, возникающих в структуре силикатного стекла в результате введения легирующих элементов, на электрическую проводимость. Кроме того, пространственное распределение термоЭДС по поверхности материала было определено с использованием специальной измерительной системы.

Развитие компьютерных технологий предоставляет возможность рассчитывать структуру, свойства и последствия механического воздействия на различные кристаллические вещества, основываясь на их химическом составе (с использованием программных комплексов, таких как WIEN2k, Quantum Espresso и др.). При этом важную роль играет выделение элементарной ячейки, состоящей из нескольких атомов, что позволяет проводить расчёты в разумные сроки.

Однако для аморфных, стеклообразных материалов такое выделение элементарной ячейки невозможно, что существенно усложняет ситуацию и делает моделирование практически недостижимым. В связи с этим при моделировании изменений свойств стеклообразных материалов под воздействием деформации приходится прибегать к упрощённым представлениям. Одной из таких наиболее простых моделей является модель Кронинга-Пенни.

В данной модели периодическое расположение атомов в пространстве формирует энергетические зоны, при этом деформация, изменяя межатомные расстояния, влияет на ширину запрещённой зоны. Если в запрещённой зоне присутствуют внедрённые уровни или подзоны, то под действием деформации изменяется их положение и ширина относительно основных зон, а также плотность состояний в этих зонах и их распределение по энергии. Для выполнения таких расчётов использовалось программное обеспечение “Wolfram Mathematica v.13”. С помощью программы был построен график зависимости относительного изменения ширины запрещённой зоны ΔE от относительной деформации $\Delta \varepsilon$ (рисунок 1). В расчётах моделировалось изменение параметра решётки от 0.500 нм до 0.499 нм (сжатие, относительная деформация $\varepsilon = -2 \cdot 10^{-3}$)

и от 0.500 нм до 0.501 нм (растяжение, $\varepsilon = 2 \cdot 10^{-3}$), при этом анализировалось, как изменяется запрещённая зона шириной 0.050 эВ, и по результатам был построен соответствующий график.

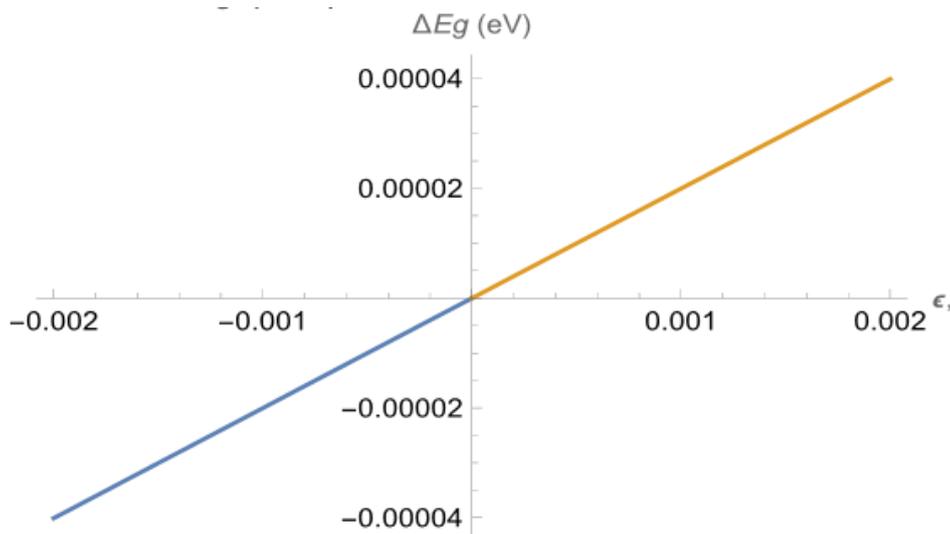


Рис. 1. Зависимость относительного изменения ширины запрещённой зоны от относительной деформации в модели Кронига-Пенни

Из рисунка 1 установлено, что в узком диапазоне деформаций (0-0,002) изменение ширины запрещённой зоны имеет линейный характер. Изменение ширины запрещённой зоны под воздействием деформации (рис. 1) соответственно влияет как на положение внедрённой зоны внутри этой области, так и на ширину псевдощели между внедрённой зоной и валентной зоной стекла (рис. 3). В результате изменяется плотность энергетических состояний в псевдощели: при растяжении образца плотность состояний уменьшается, и наоборот.

Плотность состояний электронов $N(E)$ является одним из ключевых факторов, определяющих все электрические свойства твёрдых тел, включая электрическую проводимость, фотоэлектропроводимость, коэффициент термоЭДС и другие характеристики.

Для большинства полупроводников функция $N(E)$ хорошо изучена, однако для легированного силикатного стекла (ЛСС) информация о плотности состояний практически отсутствует. Известно лишь, что Якобони и Рицци использовали выражение

$$g(\mathcal{E}) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m^*}{\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} \sqrt{\mathcal{E}} \quad (1)$$

только для теоретического расчёта электрической проводимости ЛСС.

По своим электрическим свойствам легированное силикатное стекло (ЛСС) представляет собой уникальный материал, не относящийся ни к диэлектрикам (полупроводникам), ни к металлам (рисунки 2).

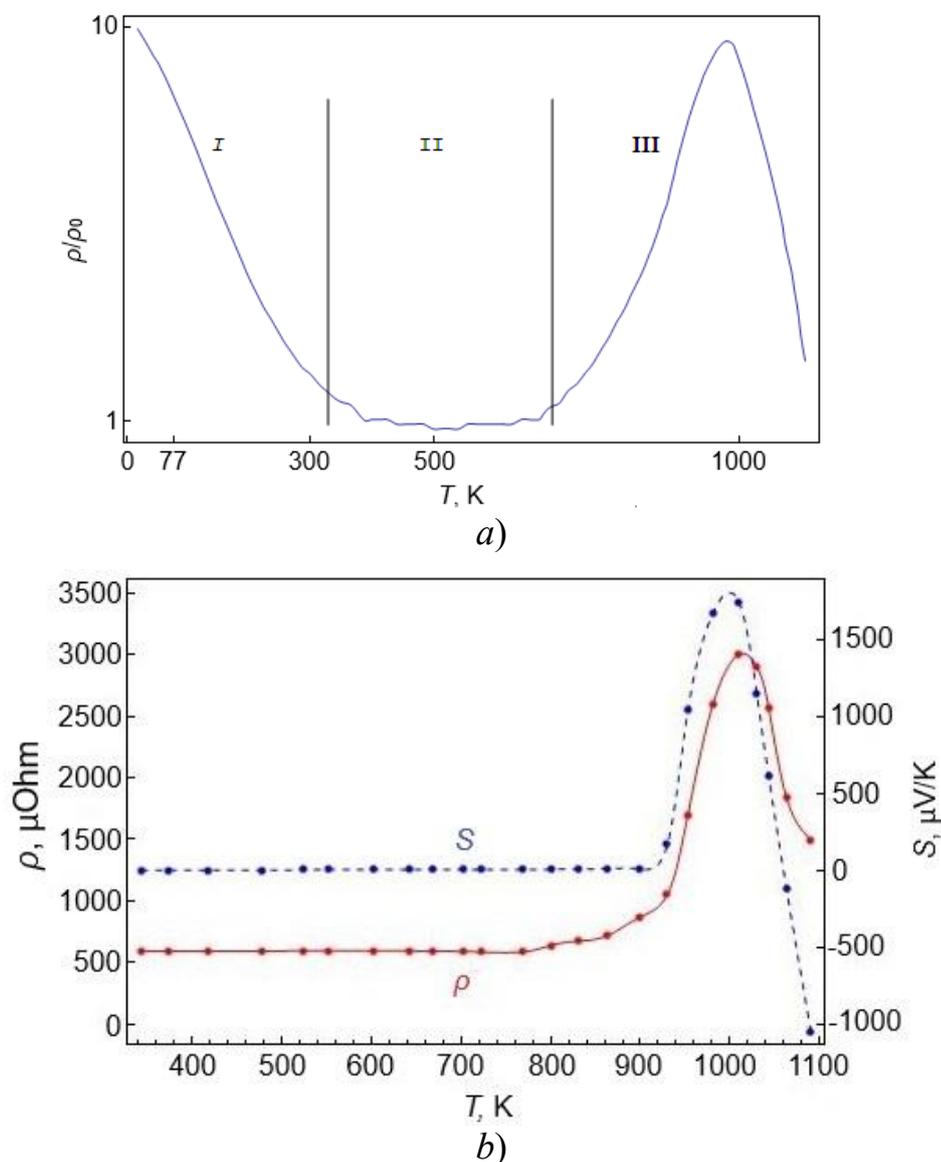


Рис. 2. Влияние температуры на удельное сопротивление ρ и коэффициент термоЭДС S в ЛСС: а) - условно в диапазоне от температуры гелия до 1100 К; б) - в эксперименте от 300 К до 1100 К. I, II и III соответственно области низких, средних и высоких температур

При низких температурах (область I) удельное сопротивление ЛСС подчиняется соотношению $\rho(T) \sim \exp(T_0/T)^\gamma$, $\gamma = 0.4-0.8$ (чаще всего $\gamma = 0,5$); вблизи комнатной температуры наблюдается минимум, после чего проявляется “металлоподобная” проводимость по закону ($\rho \sim T^\zeta$, $\zeta = 1-2$) (область II). При очень высоких температурах ($T > 700$ К) удельное сопротивление резко увеличивается (в 5-6 раз) и достигает максимума (область III), после чего, подобно полупроводникам, начинает уменьшаться по закону активации с активационной энергией $E_\sigma = 0.5-1.5$ eV в зависимости от состава стекла.

Минимум функции $\rho(T)$, наблюдаемый во II температурной области на рисунке 2, объясняется объединением зоны внедрённых уровней с валентной зоной стекла под воздействием электрон-фононного взаимодействия. Установлено, что зона внедрённых уровней смещается по температуре со

скоростью $(2-5) \cdot 10^4$ эВ/К. Соответственно, при $T = 0$ К зона внедрённых уровней расположена на расстоянии порядка $E_g \approx 300 \cdot (2-5) \cdot 10^{-4} = 0.06-0.15$ эВ выше края валентной зоны стекла (см. рисунок 3а).

С повышением температуры запрещённая зона стекла постепенно сужается из-за электрон-фононного взаимодействия. Однако это сужение - примерно 0,06-0,15 эВ - составляет лишь небольшую часть от полной ширины запрещённой зоны ($\sim 3,3$ эВ), поэтому оно не оказывает существенного влияния на проводимость. Главную роль играет смещение зоны внедрённых уровней: по мере роста температуры она приближается и при температуре около комнатной сливается с валентной зоной (рисунок 3б). Это приводит к тому, что в ЛСС появляется “металлоподобная” проводимость - концентрация дырок остаётся постоянной, а изменение проводимости с температурой связано только с рассеянием носителей заряда.

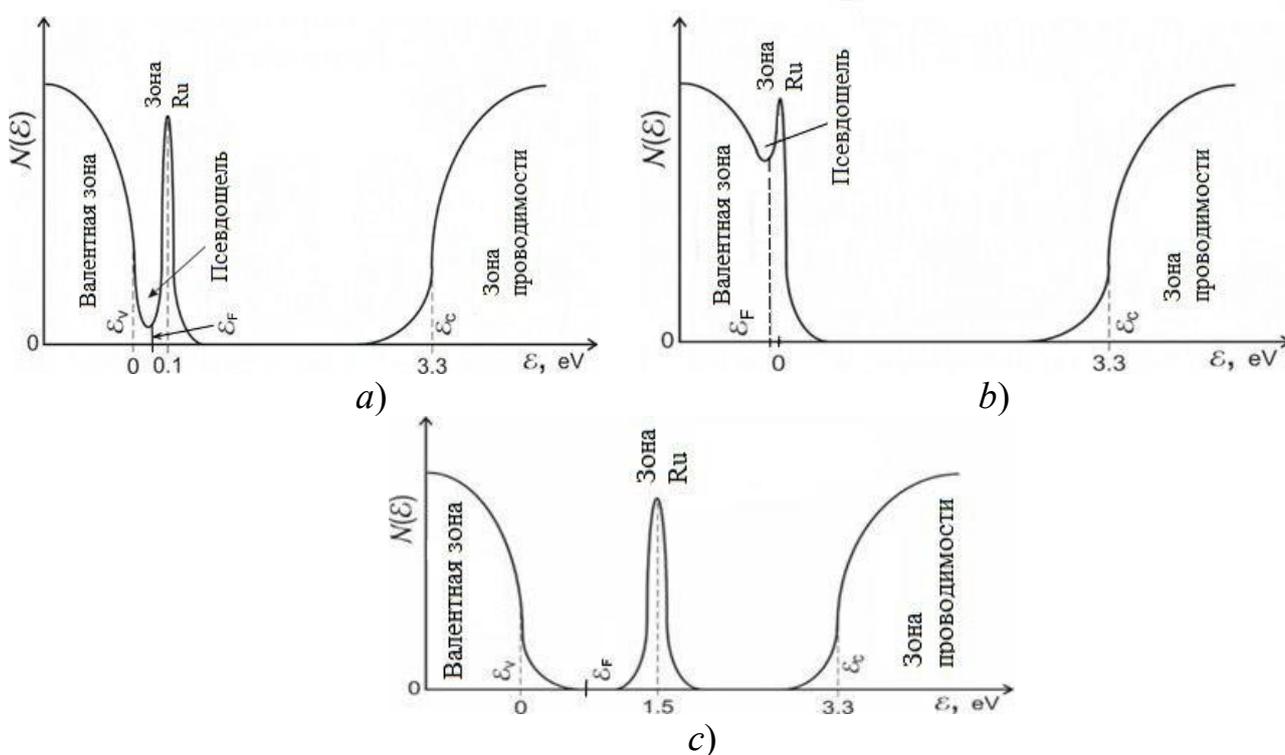


Рис. 3. Распределение плотности состояний в ЛСС, легированном RuO_2 , при различных температурах (T , К): а) 0 К; б) 300 К; в) 1000 К

При дальнейшем повышении температуры, примерно в области 700 К, в силикатных материалах начинают происходить характерные для них структурные переходы. Увеличивается межатомное расстояние, вследствие чего снижается перекрытие волновых функций дырок, и зона внедрённых уровней отделяется от валентной зоны, смещаясь в сторону середины запрещённой зоны. Около 1000 К структурные переходы в силикатах завершаются, и зона внедрённых уровней прекращает своё смещение (см. рисунок 3с). В результате в ЛСС проявляется проводимость, характерная для полупроводников с активационным механизмом переноса. При этом величина запрещённой зоны E_g может достигать до 1,5 эВ в зависимости от состава стекла, а плотность

состояний в этой области становится пренебрежимо малой - псевдощель превращается в истинную щель. Распределение плотности состояний в легированном силикатном стекле, представленное на рисунке 4, было предположено на основе оптических свойств силикатного стекла, а также общих характеристик элементов Ru и Mn.

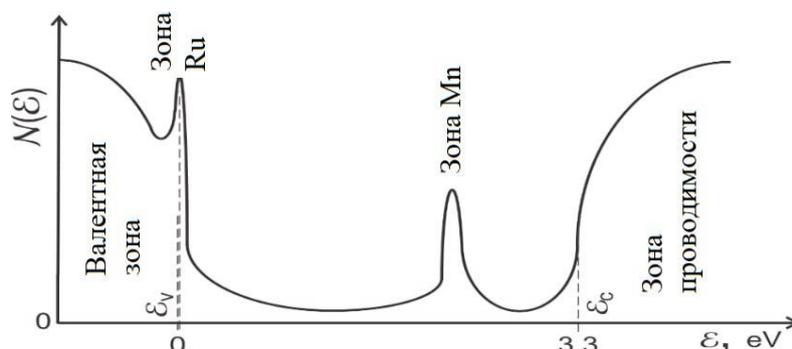


Рис. 4. Плотность состояний (модель) в силикатном стекле, легированном RuO₂ и MnO₂

Для экспериментального подтверждения указанного предположения в качестве наиболее удобного метода измерения плотности состояний в легированном силикатном стекле была выбрана микроконтактная спектроскопия. Как известно, первая производная вольт-амперной характеристики (ВАХ), dI/dV , соответствует электрической проводимости микроконтакта Y , а вторая производная d^2I/dV^2 пропорциональна плотности состояний в образце $g(\mathcal{E})$. Соответственно, численные значения, полученные из экспериментальной зависимости $I(V)$, были обработаны в программе Wolfram Mathematica 11, после чего рассчитаны величины Y и $g(\mathcal{E})$, и построены соответствующие графики (рисунок 5).

Сравнение рисунков 4 и 5с позволяет выявить как совпадения, так и отличия между модельным и экспериментальным распределением плотности состояний. В частности, с теоретической точки зрения энергетические уровни, формируемые RuO₂, должны быть практически слиты с валентной зоной стекла, тогда как зона, ассоциированная с MnO₂, должна быть отделена от неё более широкой энергетической щелью.

Экспериментальные данные подтверждают данную модель: расположение соответствующих уровней в образцах хорошо согласуется с предварительно построенной теоретической схемой. Физико-химические процессы, происходящие в процессе отжига при изготовлении образцов легированного силикатного стекла (ЛСС), а также структурные преобразования в силикатах, в существующих научных публикациях изучены недостаточно полно. В частности, изменение концентрации внедряемых компонентов в процессе синтеза ЛСС оказывает значительное влияние на ряд его свойств, таких как удельное сопротивление (ρ) и коэффициент Зеебека (S). В связи с этим детальное исследование указанных процессов имеет принципиальное значение для корректного понимания температурной зависимости электрической

проводимости ЛСС и целенаправленного управления его термоэлектрическими характеристиками.

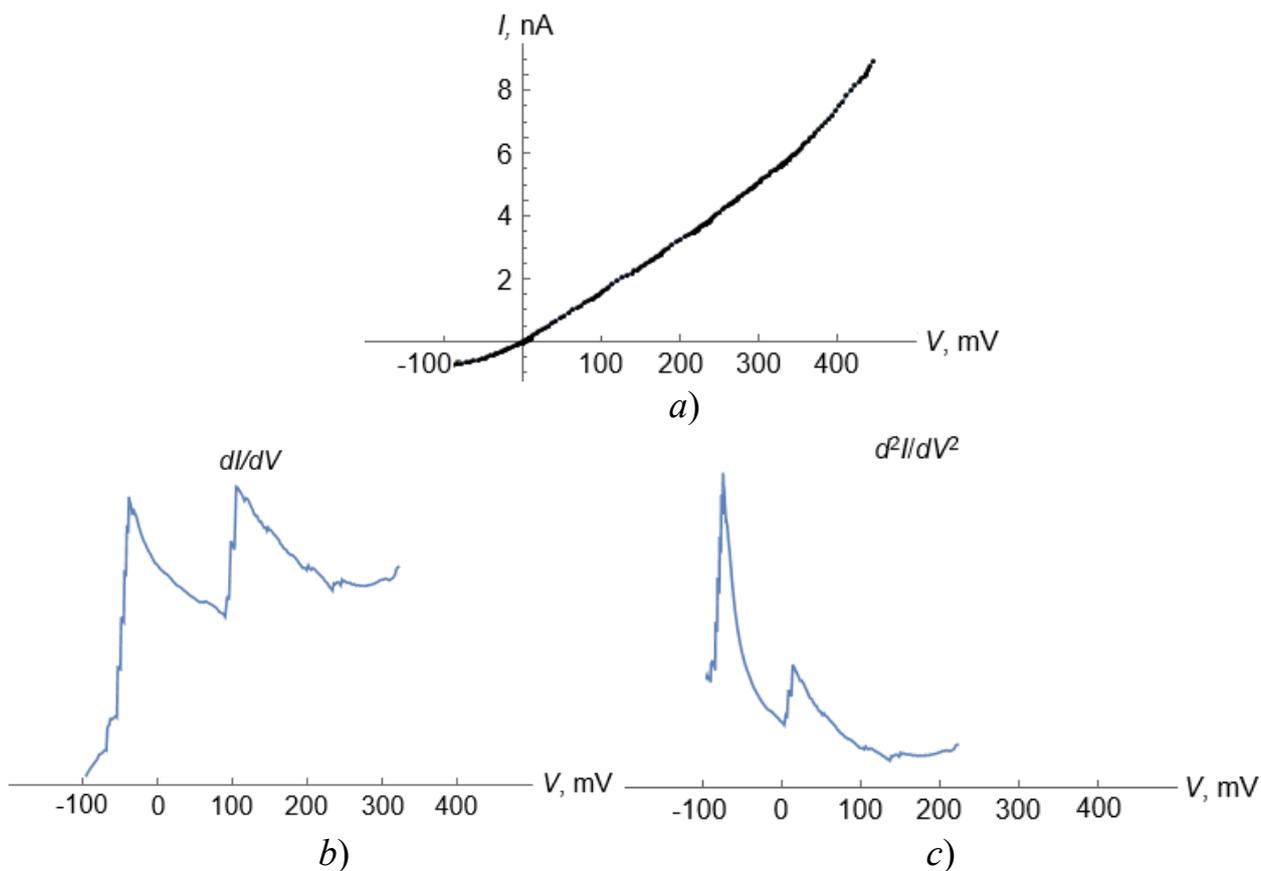


Рис. 5. Легированное RuO_2 и MnO_2 силикатное стекло: а) вольт-амперная характеристика (ВАХ) при низких напряжениях; б) электрическая проводимость (первая производная ВАХ); в) плотность электронных состояний (вторая производная ВАХ)

Структурные преобразования соединений, входящих в состав ЛСС, при повышенных температурах приводят к изменению удельного сопротивления ρ . В частности, в легированном RuO_2 силикатном стекле марки В34Е нами были зафиксированы соответствующие изменения сопротивления $R(T)$ в температурном интервале 390-1040 К (см. рисунок 6).

С увеличением концентрации RuO_2 уменьшается среднее расстояние между частицами проводящей фазы, что облегчает переход носителей заряда от одной частицы к другой. В результате на высоких концентрациях наблюдается снижение сопротивления, тогда как при низких концентрациях сопротивление остаётся высоким из-за недостаточной связанности проводящих путей в материале.

Кроме того, как видно из рисунка 6, в определённом температурном интервале (300-750 К) наблюдается линейная зависимость сопротивления от температуры, что подтверждается высоким коэффициентом парной корреляции $R^2 > 0,99$.

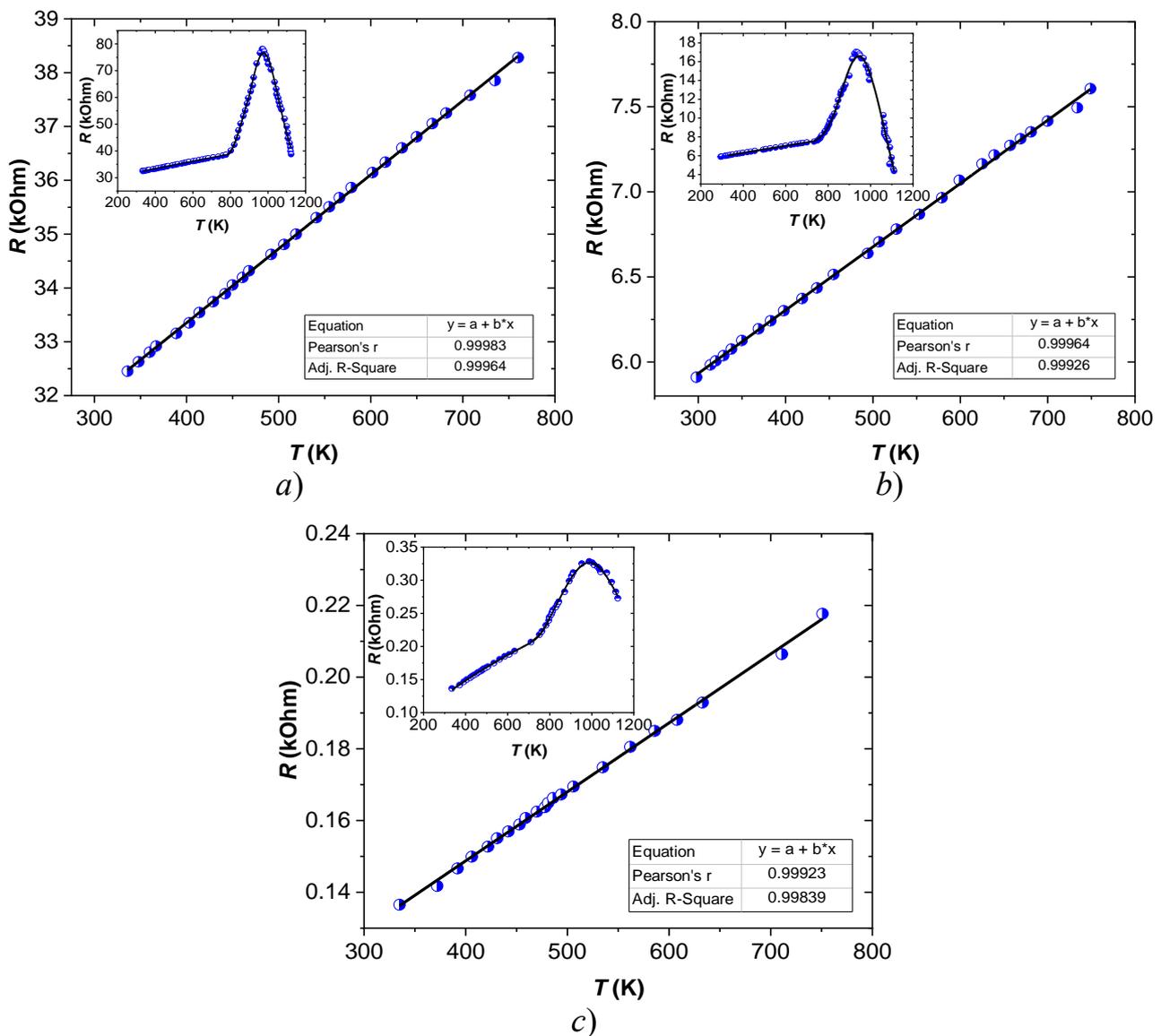


Рис. 6. Изменение сопротивления в зависимости от температуры для образцов стекла В34Е, легированных RuO_2 . Концентрация RuO_2 (мас. %): а) 15, б) 20 и в) 30

Одной из нерешённых проблем современной физики термоэлектрических явлений является вопрос о том, где именно возникает термоэлектродвижущая сила (термоЭДС) $\Delta\phi$. Согласно наиболее распространённой точке зрения, термоЭДС (эффект Зеебека) формируется внутри объёма однородного проводника под действием температурного градиента ΔT , и описывается выражением: $\Delta\phi = S \cdot \Delta T$, где S - коэффициент Зеебека. Однако некоторые исследователи считают, что термоЭДС возникает не в объёме проводника, а на его границах или контактах.

С целью уточнения данной проблемы в настоящем исследовании была проведена экспериментальная оценка распределения термоэлектродвижущей силы (термоЭДС) по длине образца ЛСС. Полученные результаты представлены на рисунке 7.

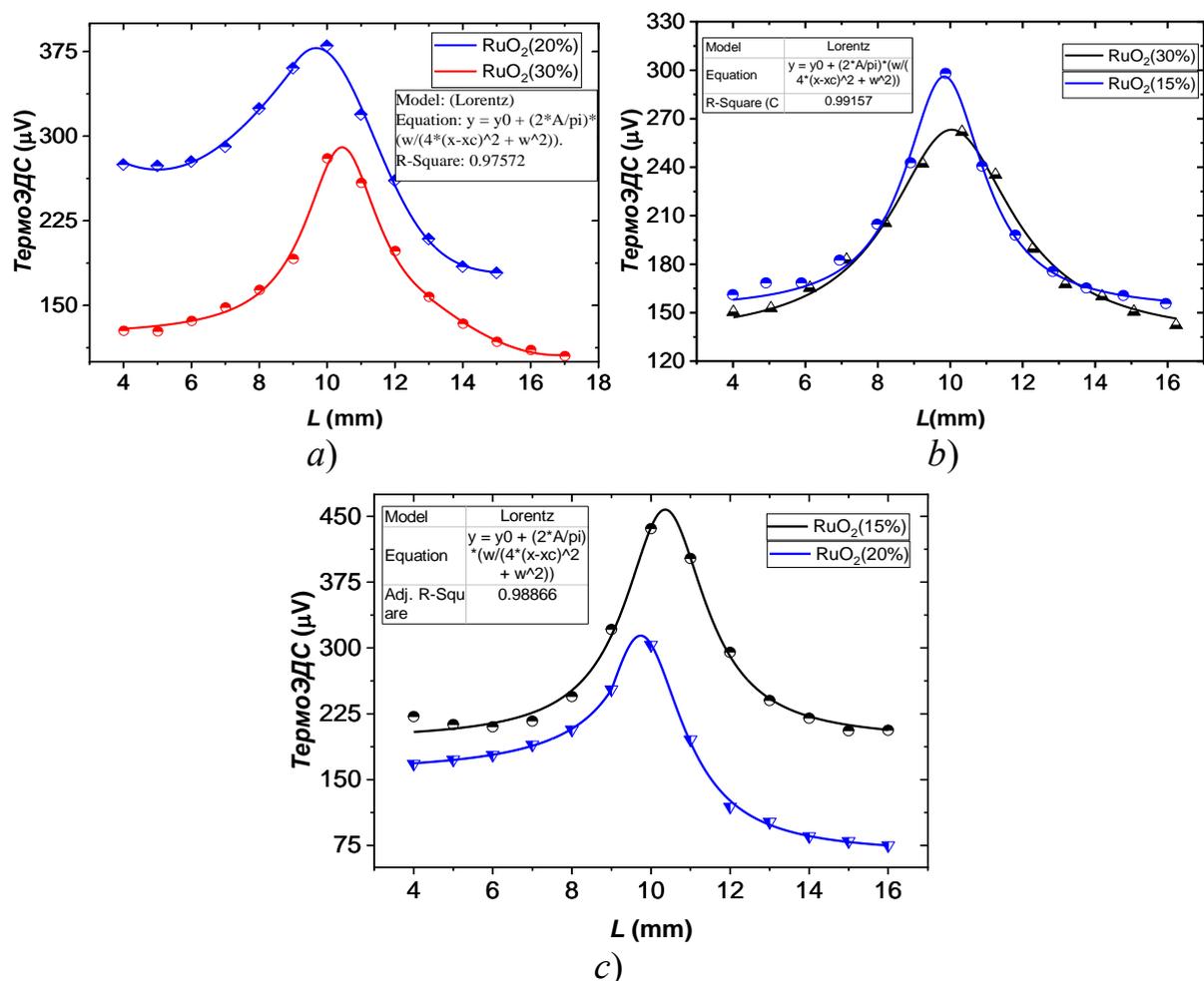


Рис. 7. Распределение термоЭДС по длине образца: а) V34E + RuO₂ (20 %, 30 %); б) V17 + RuO₂ (15 %, 30 %); в) PC5-1 + RuO₂ (15 %, 20 %)

Из анализа рисунка 7 были сделаны следующие выводы:

- 1) Коэффициент термоЭДС (Seebeck) в ЛСС значительно выше, чем в металлическом слое;
- 2) При увеличении содержания RuO₂ коэффициент термоЭДС уменьшается;
- 3) Чёткой зависимости между составом ЛСС и величиной термоЭДС не наблюдается;
- 4) Во всех образцах максимальное значение термоЭДС зафиксировано на границе между термоэлементом и металлическим контактом, то есть именно на этом интерфейсе и формируется термоЭДС.

Величина формирующейся термоЭДС определяется рядом ключевых факторов, среди которых особое значение имеют: различие в электронной структуре контактирующих материалов, температурный градиент dT/dx , молекулярные и химические особенности фазового интерфейса, а также соотношение компонентов в смеси. Особенно высокой термоэлектрической эффективностью обладают образцы с содержанием RuO₂ около 20%. Экспериментально выявленное распределение термоЭДС представляет собой важный аспект при проектировании термоэлектрических датчиков и микрогенераторов.

Четвёртая глава диссертации “Влияние деформации на термоэлектрические свойства легированного силикатного стекла (толстоплёночного резистора). Термоэлектрический тензодатчик” посвящена исследованию закономерностей изменения сопротивления и термоЭДС в образцах ЛСС, легированных оксидом RuO_2 , под действием одноосной упругой деформации, а также возможностям использования таких материалов в качестве тензодатчиков. Для изучения электрической проводимости образцов ЛСС и качества омических контактов были исследованы их вольт-амперные характеристики (ВАХ). Результаты экспериментов представлены на рисунке 8.

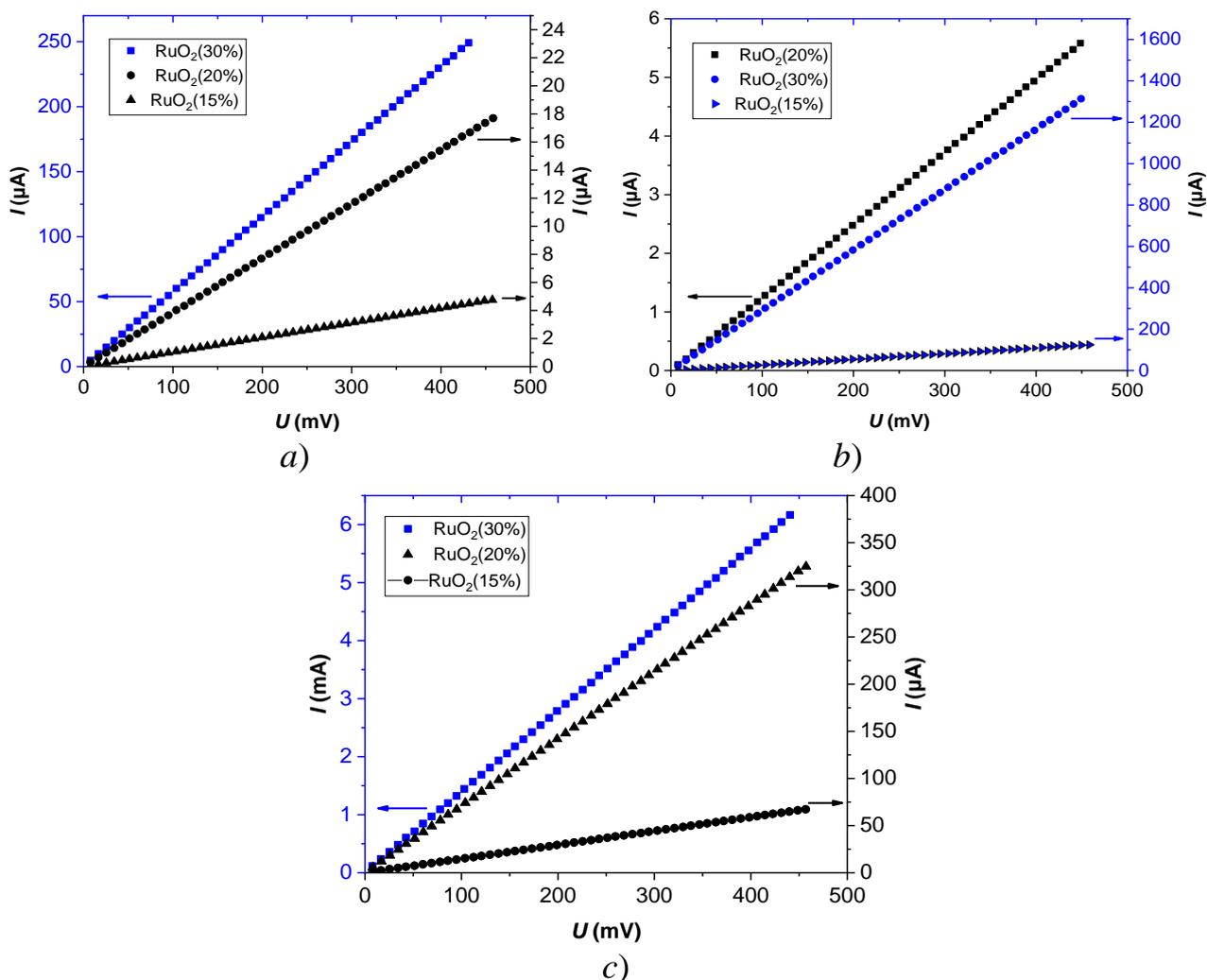


Рис. 8. Вольтамперные характеристики (ВАХ) образцов легированного силикатного стекла: а) V17M + RuO_2 (15 %, 20 %, 30 %); б) V34E + RuO_2 (15 %, 20 %, 30 %); в) PC5-1 + RuO_2 (15 %, 20 %, 30 %)

Как видно из рис. 8, ВАХ всех исследуемых образцов являются линейными, что указывает на наличие идеального омического контакта. Такая линейная зависимость между током и напряжением обеспечивает стабильность и воспроизводимость измерений, что делает данные материалы перспективными для применения в качестве чувствительных элементов датчиков.

Воздействие одноосной упругой деформации на электрическую проводимость материала, а также на другие физические свойства, чувствительные к деформации, имеет большое значение для практического применения в науке, технике и медицине. Поэтому изучение влияния такой деформации на электрические и термоэлектрические характеристики легированного силикатного стекла важно как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения.

В данном исследовании мы изучили, как изменяются электрическая проводимость и термоЭДС легированного силикатного стекла (ЛСС) под воздействием одноосной деформации. Для проведения экспериментов был подготовлен специальный образец ЛСС, легированный оксидом рутения (см. таблицу 1).

Таблица 1

Состав легированного силикатного стекла (мас. %)

Обра зец	Состав стекла								T_f/τ_f , К/ч	Лигатура (RuO ₂)
	SiO ₂	PbO	Al ₂ O ₃	BaO	CuO	MnO ₂	B ₂ O ₃	MgO		
В17	33	67							1773/1	30
В34Е	27	67		4				2	1673/1	20
РС5-1	11	61.9	0.7		1.4	10	15		1623/1	30

Результаты измерений зависимости сопротивления и термоэлектродвижущей силы (термоЭДС) от деформации для стеклосодержащих составов, представленных в таблице 1, приведены на рисунке 8.

На основании графиков были сделаны следующие выводы:

1. Зависимости $R(\varepsilon)$ и $U_i(\varepsilon)$ обладают выраженным линейным характером с высокой степенью точности.
2. Значение чувствительности по термоЭДС (GF_{UT}) в 20-120 раз превышает чувствительность по сопротивлению (GF_R).
3. С уменьшением содержания легирующей добавки RuO₂ коэффициент GF_{UT} возрастает, тогда как GF_R , наоборот, уменьшается.
4. Начальное значение термоЭДС (U_{T0}) не связано с GF_{UT} , в то время как начальное сопротивление (R_0) линейно зависит от GF_R .
5. Состав стекла оказывает значительное влияние на величину GF_{UT} (см. таблицу 2), однако для установления чёткой закономерности необходимы дополнительные исследования.
6. ТермоЭДС обладает на порядок большей чувствительностью к механической деформации по сравнению с сопротивлением. Это позволяет использовать данный параметр в качестве чувствительного элемента в тензодатчиках, обеспечивая более высокую точность измерений.

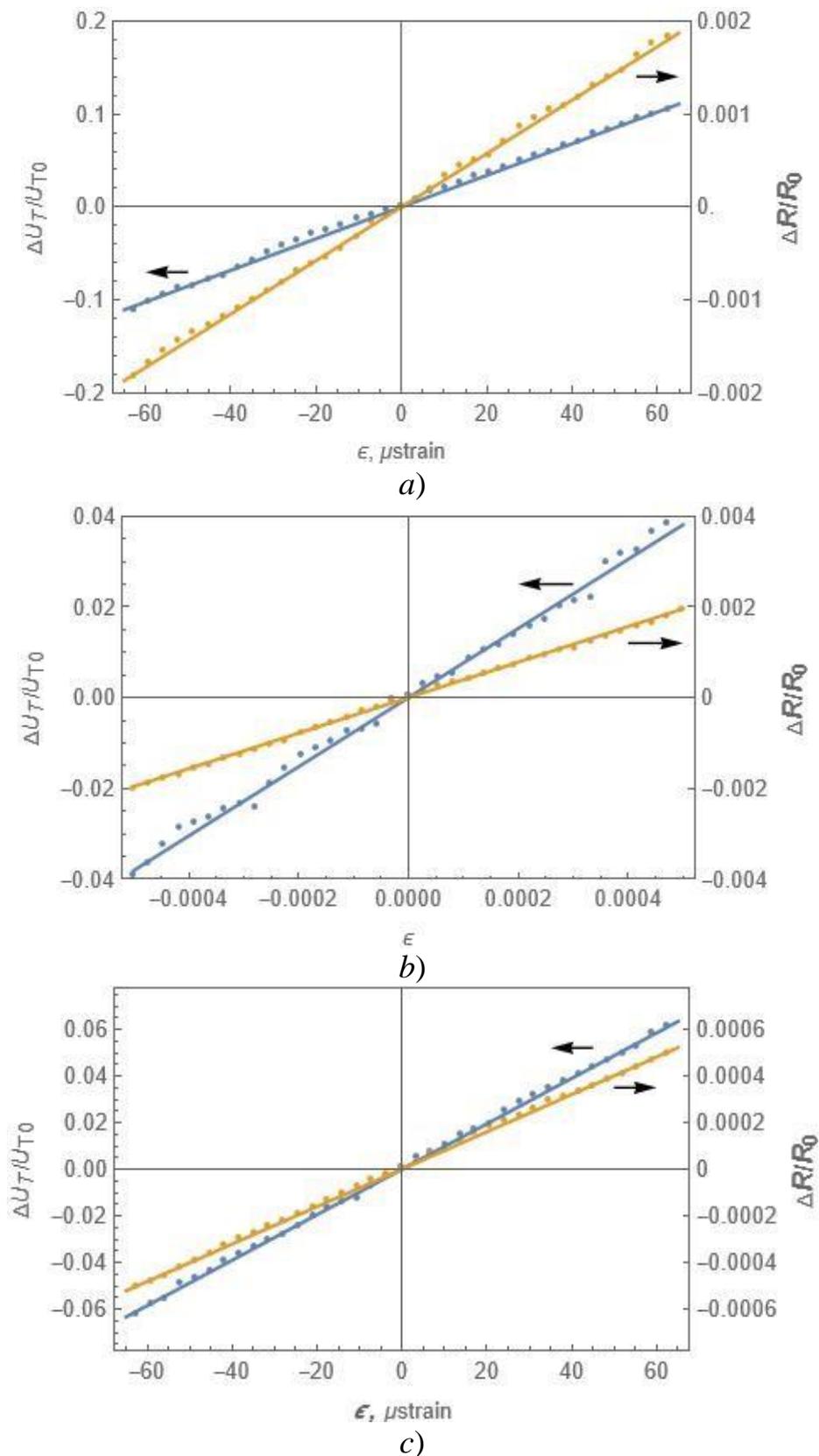


Рис. 9. Зависимости $R(\epsilon)$ и $U_t(\epsilon)$ в образцах ЛСС, легированных RuO_2 : а) $\text{B17} + \text{RuO}_2$ (30 %); б) $\text{B34E} + \text{RuO}_2$ (20 %); в) $\text{PC5-1} + \text{RuO}_2$ (30 %)

В таблице 2 приведены начальные значения сопротивления и термоЭДС, а также рассчитанные коэффициенты тензочувствительности - GF_R и GF_{UT} , полученные на основе зависимостей $R(\epsilon)$ и $U_t(\epsilon)$. Также указано их соотношение

GF_{UT}/GF_R . Значения коэффициентов GF_R и GF_{UT} были рассчитаны по следующим формулам:

$$GF_R = \frac{\Delta R/R_0}{\varepsilon}, \quad GF_{UT} = \frac{\Delta U_T/U_{T0}}{\varepsilon} \quad (2)$$

Таблица 2

Начальное сопротивление R_0 , начальная термоЭДС U_{T0} , коэффициент Зеебека S , тензочувствительность по сопротивлению (GF_R) и по термоЭДС (GF_{UT}), а также их соотношение GF_{UT}/GF_R для образцов

Образец	R_0 , Ом	U_{T0} , μV	S , $\mu V/K$	GF_R	GF_{UT}	GF_{UT}/GF_R
B17	1199	306	9.3	29	1673	58
B34E	3646	217.1	6.6	31	661	21
PC5-1	166.6	1.184	0.036	7.9	973	123

Наши исследования показали, что в образцах легирующие частицы не имеют прямого контакта друг с другом. Этот вывод был сделан на основе анализа, проведённого с использованием энергодисперсионной спектроскопии (EDS). Распределение основных элементов по поверхности стеклянного образца B34E представлено на рисунке 10.

Кроме того, полный энергодисперсионный спектр (отражающий элементный состав) данного образца представлен на рисунке 11. Согласно полученным результатам, состав легированного стекла, определённый с помощью энергодисперсионной спектроскопии, полностью соответствует исходной рецептуре стеклокомпозиции B34E, указанной в таблице 1.

Результаты, представленные на рисунках 10 и 11, подтверждают выдвинутую в данной работе гипотезу, именно, в результате управляемой деформации происходит изменение микроструктуры материала, что, в свою очередь, влияет на значения сопротивления и термоэлектродвижущей силы (термоЭДС) в силикатном стекле, легированном RuO_2 . Предполагается, что эти изменения происходят по механизмам, аналогичным фазовым переходам.

Как показано на рисунке 10, частицы RuO_2 равномерно распределены в стеклянной матрице и не образуют прямого контакта между собой. Это указывает на то, что в ЛСС электрическая проводимость осуществляется не только за счёт прямых контактов между проводящими частицами, но и за счёт других механизмов переноса.

Ведущими механизмами, по-видимому, являются: туннельный или хоппинг-перенос носителей заряда между нанокристаллами в силикатной матрице; активационная проводимость через примесную энергетическую зону, сформированную в процессе отжига.

Таким образом, электрическая проводимость в легированном силикатном стекле реализуется за счёт комплексного взаимодействия между

микроструктурными особенностями материала и его энергетическим состоянием.

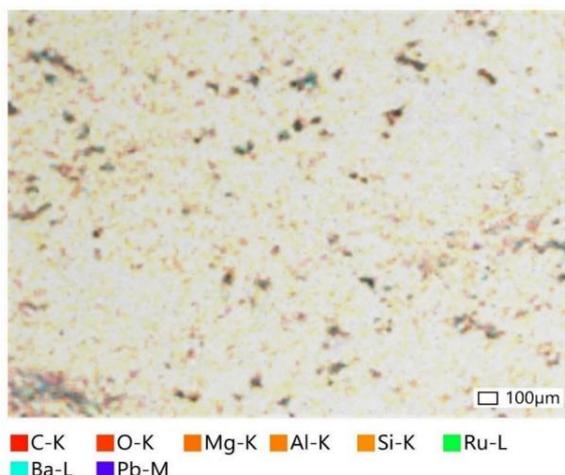


Рис.10. Изображение поверхности образца стекла В34Е, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа (распределение элементов). Частицы RuO_2 расположены на расстоянии друг от друга и не находятся в прямом контакте

Кроме того, отсутствие прямого контакта между частицами RuO_2 означает, что изменение сопротивления и термоЭДС под действием деформации не связано с изменением площади контакта между проводящими частицами. Вместо этого, наблюдаемые изменения обусловлены вариациями расстояний между атомами и изменениями углов химических связей в структуре материала.

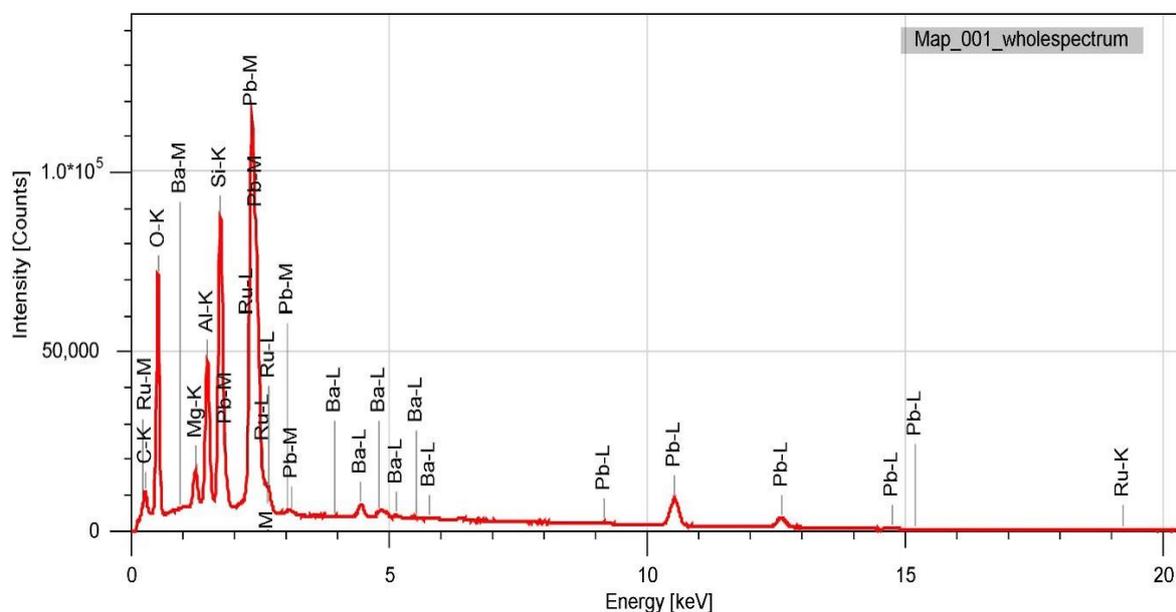


Рис.11. Полный энергодисперсионный спектр образца стекла В34Е (элементный состав)

Это указывает на то, что электрическая проводимость в легированном силикатном стекле в основном регулируется за счёт межатомных взаимодействий внутри аморфной матрицы, а не за счёт образования непрерывных токопроводящих путей между легирующими частицами.

Для изучения фазового состава стеклянного образца В34Е был использован метод рентгеновской дифракции (XRD). Анализ проводился на порошке стекла В34Е, легированного диоксидом рутения (RuO_2) в количестве 15 мас. %. Измерения осуществлялись в диапазоне углов 2θ от 10° до 80° с использованием $\text{Cu K}\alpha$ -излучения ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$). Полученные результаты представлены на рисунке 12.

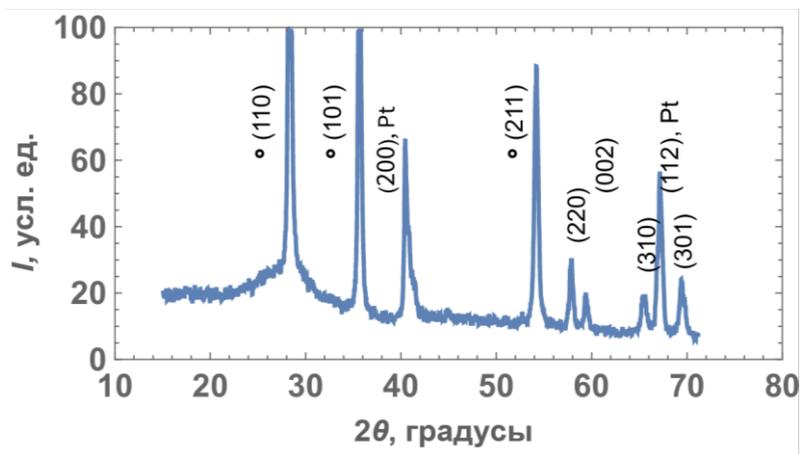


Рис.12. Результаты рентгенодифракционного (XRD) анализа образца стекла В34Е

2θ , град. I , усл. ед. В XRD-спектре образца стекла В34Е наблюдаются чётко выраженные дифракционные пики, которые полностью совпадают с эталонной картой PDF № 88-0322, соответствующей тетрагональной кристаллической структуре диоксида рутения (RuO_2).

Таким образом, рентгенодифракционный анализ достоверно подтверждает наличие в образце кристаллической фазы RuO_2 . Это свидетельствует о том, что при добавлении RuO_2 в стеклянную матрицу, несмотря на сохранение аморфной основы, в материале формируются дискретные кристаллические участки - нанокристаллы.

Наличие таких нанокристаллических включений может оказывать существенное влияние на физико-химические свойства полученного композитного материала.

О том, что тензочувствительность сопротивления и термоЭДС в легированном силикатном стекле не связана с простым контактным механизмом переноса, дополнительно свидетельствует наблюдаемое увеличение коэффициента $GF_{\text{УТ}}$ при снижении содержания RuO_2 .

Однако важно отметить, что составы, изученные в рамках данного исследования, не были специально оптимизированы для достижения максимального значения $GF_{\text{УТ}}$. Это означает, что существует потенциал для дальнейшего повышения тензочувствительности за счёт повторных экспериментов с варьированием состава легированного стекла и целенаправленного подбора его оптимальной композиции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследований, проведенных по теме диссертации на соискание ученой степени доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам на тему: «Влияние деформации на термоэлектрические свойства легированного силикатного стекла (толсто пленочного резистора)» представлены следующие выводы:

1. Впервые экспериментально доказано, что изменение коэффициента термоЭДС в легированном силикатном стекле под воздействием одноосной деформации может быть во много раз (на порядок и более) превышать изменения электрической проводимости в тех же условиях, и это объяснено через распределение плотности состояний в псевдощели, возникающей между внедрённой зоной и валентной зоной стекла;
2. Влияние механической деформации на ширину запрещённой зоны в легированном силикатном стекле обосновано на основе модели Кронига-Пенни;
3. Впервые методом микроконтактной спектроскопии обнаружено формирование псевдощели между валентной зоной и внедрённой зоной в легированном силикатном стекле;
4. Впервые измерено воздействие одноосной деформации на термоЭДС (GF_{UT}) в образцах легированного силикатного стекла и установлено, что это воздействие в 20-120 раз превышает влияние деформации на сопротивление (GF_R) тех же образцов;
5. Впервые доказана возможность создания высокочувствительных тензодатчиков на основе влияния деформации на термоЭДС, и подана заявка на патент на изобретение - термоэлектрический тензодатчик.

**SCIENTIFIC COUNCIL ON AWARDING OF SCIENTIFIC DEGREES
DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 AT INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS
NATIONAL UNIVERSITY OF UZBEKISTAN
NAMED AFTER MIRZO ULUGBEK**

TURSUNOV MUKHRIDDIN

**EFFECT OF DEFORMATION ON THE THERMOELECTRIC PROPERTIES
OF DOPED SILICATE GLASS (THICK-FILM RESISTOR)**

01.04.10 - Condensed matter physics

**DISSERTATION ABSTRACT
of the doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences**

Tashkent-2025

The theme of the dissertation of the doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences was registered by the Supreme Attestation Commission of the Ministry of higher education, science and innovations of the Republic of Uzbekistan under No. B2024.2.PhD/FM1115.

The dissertation was carried out at the National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek.

The abstract of the dissertation was posted in three (Uzbek, Russian, English (resume)) languages on the website of the Scientific Council at www.inp.uz and on the website of “ZiyoNet” Information and Educational Portal at www.ziyo.net.

Scientific supervisor: **Abduraxmanov Gulmurza**
doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor

Official opponents: **Mussaeva Malika Anvarovna**
doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Senior Researcher

Tursunkulov Oybek
Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Senior Researcher

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

The defense of the dissertation will be held on “___” _____ 2025, at ___ at the meeting of the Scientific Council No.DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 at the Institute of Nuclear Physics (Address: INP, Ulugbek settlement, 100124 Tashkent city. tel. (+99871) 289-31-41; fax (+99871) 289-36-65; e-mail: info@inp.uz).

The doctoral (PhD) dissertation can be looked through at the Information Resource Centre of the Institute of Nuclear Physics (registered under No. _____) Address: Institute of Nuclear Physics, Ulugbek settlement, 100124 Tashkent city. tel. (+99871) 289-31-19.

The abstract of dissertation was distributed on “___” _____ 2025.
(Registry record No. ___ dated “___” _____ 2025.)

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

O.R. Tojiboev
Scientific Secretary of the Scientific Council on Award
of Scientific Degrees, PhD Ph.-M.S.,
Senior Researcher

S.B.Igamov
Chairman of the Scientific seminar of the Scientific Council
on ward of Scientific Degrees, D.T.S., Senior Researcher

INTRODUCTION (abstract of the PhD dissertation)

The aim of the research work is to determine the mechanisms of the effect of uniaxial elastic deformation on the electrical conductivity and thermoelectric properties of doped silicate glass.

Tasks of the research work:

preparation of doped silicate glass samples with the required composition and verification of their composition;

determination of the structure and phase composition of the samples using X-ray diffraction (XRD);

experimental investigation of the effect of deformation on electrical conductivity;

determination of the dependence of the Seebeck coefficient on deformation;

analysis of the spatial distribution of the thermoelectromotive force (thermoEMF);

correlation of changes in conductivity with the electronic energy bands;

evaluation of the sensitivity of the thermoelectric strain sensor.

The object of research is silicate glass doped with ruthenium (RuO_2) and manganese (MnO_2) oxides.

The subject of research is the mechanisms of the effect of uniaxial elastic deformation on the electrical conductivity and thermoelectric properties of doped silicate glass.

The scientific novelty of the research is as follows:

it has been established that the position of the impurity level within the forbidden band of ruthenium-doped silicate glass, the distribution of the density of energy states in the forming pseudogap, as well as the shift of the Fermi level toward the valence band, are key factors determining the magnitude of the thermoEMF coefficient;

it has been found that the effect of deformation on the thermoEMF coefficient in doped silicate glass significantly exceeds its effect on electrical conductivity (by 20-120 times), which is explained within the framework of Mott's theory through changes in the distribution of localized state densities;

using the microcontact spectroscopy method, the distribution of energy state densities in silicate glasses doped with ruthenium and manganese oxides was determined, and the formation of a pseudogap in the investigated samples was established;

it has been shown that, in general, the thermoEMF in doped silicate glass samples arises mainly in the region of contact between the doped glass and a silver conductor, i.e., near the interface of two dissimilar materials.

Implementation of the research results. Based on the scientific results obtained on the effect of deformation on the thermoelectric properties of doped silicate glass (thick-film resistor):

the information on the value of the thermoEMF coefficient and the emergence of thermoEMF at the junction (contact) of two different conductors was used within the Uzbekistan-Belarus joint applied research project IL-4821091628, "Formation of nanostructured graphene films in transparent conductive metal oxides for photovoltaic applications and mechanisms of charge carrier transport in them," carried out at the

Faculty of Physics of the National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek (letter No. 01/11-7616 dated June 18, 2025). The use of these scientific results made it possible to explain the deformation-dependent change in resistivity during the measurement of specific resistance in nanostructured graphene films on transparent conductive metal oxides, as well as to clarify the thermoelectric properties of metal oxide layers;

the exceptionally high sensitivity of thermoEMF to deformation, the distribution of the density of electronic states in silicate glasses doped with ruthenium and manganese oxides, and the formation of a pseudogap in the studied samples were used within the Uzbekistan-Turkey joint applied research project AL-202102215, “Microfluidic channel integrated system with ferromagnetic nanoclustered Si for capturing circulating cancer cells,” conducted at the Tashkent State Technical University named after Islam Karimov (letter No. 01/9-14-2398 dated September 8, 2025). Use of the scientific results enabled the measurement of fluid pressure in microchannels using a laboratory prototype of a new high-sensitivity thermoelectric strain sensor based on thermoEMF variation, as well as the determination of the magnetic properties of nanoclusters.

The structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion, and a list of references. The total length of the dissertation is 125 pages.

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

I bo'lim (I часть, part I)

1. Abdurakhmanov G., Tursunov M.E., Dekhkanov A.T., Tashmukhamedova D. Impurity Bands and Density of State in Doped Silicate Glasses with Metal Oxides (RuO₂, CuO, MnO₂) // Physical Science International Journal. – India, 2023. – Vol.27. – No.6. – pp. 5-15 (№ 8. Chemical Abstracts CAS; IF=0,2)
2. Tursunov M.E., Abdurakhmanov G. The variation of resistance with temperature in thick-film resistors // O`zMU xabarleri. – Toshkent: O`zbekiston Milliy universiteti, 2024. – №3/2/1. – pp.505-508 (01.00.00. №8).
3. Турсунов М.Е., Абдурахманов Г., Деккханов А.Т., Ксенович В., Ташмухамедова Д., Вохидова Г., Rai Dibya Prakash. Влияние деформации на термоЭДС в силикатном стекле, легированном диоксидом рутения // Журнал технической физики. – Санкт-Петербург: ФТИ им. Иоффе, 2025. – №7. – С. 1375-1382 (01.00.00. № 20)
4. Tursunov M.E., Abduraxmanov G., Dexqonov A.T., Vohidova G., Toshmukhamedova D.A. Legirlangan silikat shisha namunalarida termoEYuKning fazoviy taqsimlanishi taqsimlanishi // NamDU ilmiy axborotnomasi. – Namangan: Namangan davlat universiteti, 2025. – № 6. – С. 29-33(01.00.00; №14).

II bo'lim (II часть, part II)

5. Tursunov M.E., Irkinov M.B., Abduraxmanov G. Termoelektrik materiallar parametrlarini o'lchash // Физика фанининг ривожиди истеъдодли ёшларнинг ўрни (РИАК-15): Республика илмий-амалий конференция ишлари тўплами. 22-23 апрел 2022 йил. – Тошкент: ЎзМУ, 2022. –103-105-бет.
6. Abduraxmanov G., Tursunov M.E., Axmadaliyeva B. Ruteniy va marganes oksidlari bilan legirlangan silikat shishada holatlarzichligi-tajriba // Fizika fanining rivojida iste'dodli yoshlarning o'rni: Respublika ilmiy amaliy konferentsiyasi to'plami. 28-29-aprel 2023-yil. – Toshkent: O`zMU, 2023. – 215-217-bet.
7. Tursunov M.E., Abduraxmonov G., Dexqonov A.T. Legirlangan silikat shishadan tayyorlangan, termoEYuK o'zgarishiga asoslangan tenzodatchik // Fizikada fundamental va amaliy tadqiqotlar: Xalqaro konferensiya materiallari, 24-25-may, 2024-yil. – Toshkent: O`zMU, 2024. –171-173-bet
8. Abdurakhmanov G., Tursunov M.E., Khudayberganov M., Dekhkonov A.T., Park K. Where is thermoemf located? // Fizikada fundamental va amaliy tadqiqotlar: Xalqaro konferensiya materiallari, 24-25-may, 2024-yil. – Toshkent: O`zMU, 2024. – 104-106-bet.
9. Abdurakhmanov G., Tursunov M.E., Ksenovich V., Dekhkonov A.T., Tashmukhamedova D., Vokhidova G. Effect of strain on the thermoEMF of silicate glass doped with ruthenium dioxide (thick-film resistor) // Yarimo'tkazgichlar

fizikasi, zamonaviy elektronika va energetikani fundamental va amaliy muammolari: Xalqaro konferensiya materiallari, 18-19 sentabr, 2024-yil. – Namangan: Namangan Muhandislik-qurilish instituti, 2024. – 123-131-bet.