

**O‘ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI QOSHDAGI
YARIMO‘TKAZGICHLAR FIZIKASI VA MIKROELEKTRONIKA
ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR
BERUVCHI DSc.03/2025.27.12.FM/T.01.06 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

FARG‘ONA DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI

XALILOV MUXAMMADMUSO MUXAMMADYUNUSOVICH

**“PbTe POLIKRISTALL YUPQA QATLAMLARNING STRUKTURAVIY,
OPTIK VA FOTOELEKTRIK XUSUSIYATLARI”**

01.04.10 - Yarimo‘tkazgichlar fizikasi

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

Toshkent - 2026

**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**

Xalilov Muxammadmuso Muxammadyunusovich

PbTe polikristall yupqa qatlamlarning strukturaviy, optik va fotoelektrik
xususiyatlari..... 3

Халилов Мухаммадмусо Мухаммадюнович

Структурные, оптические и фотоэлектрические свойства тонких
поликристаллических пленок PbTe 25

Xalilov Muxammadmuso Muxammadyunusovich

Structural, optical and photoelectric properties of thin polycrystalline PbTe
films 48

E'lon qilingan ishlar ro'xati

Список опубликованных работ

List of published works..... 51

**O‘ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI QOSHDAGI
YARIMO‘TKAZGICHLAR FIZIKASI VA MIKROELEKTRONIKA
ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR
BERUVCHI DSc.03/2025.27.12.FM/T.01.06 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

FARG‘ONA DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI

XALILOV MUXAMMADMUSO MUXAMMADYUNUSOVICH

**PbTe POLIKRISTALL YUPQA QATLAMLARNING STRUKTURAVIY,
OPTIK VA FOTOELEKTRIK XUSUSIYATLARI**

01.04.10 - Yarimo‘tkazgichlar fizikasi

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

Toshkent - 2026

Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) Dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2023.4.PhD/FM738 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya Farg'ona davlat texnika universitetida bajarilgan.

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

Ilmiy rahbar:

Otajonov Salim Madraximovich
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Rasmiy opponentlar:

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

Muzafarova Sultanpasha Anvarovna
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Yetakchi tashkilot:

Nukus davlat pedagogika instituti

Dissertatsiya himoyasi O'zbekiston Milliy universiteti qoshidagi Yarimo'tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti huzuridagi ilmiy darajalar beruvchi DSc.03/2025.27.12.FM/T.01.06 raqamli Ilmiy kengashning 2026 yil «12» 09 soat 12⁰⁰ da majlisida bo'lib o'tadi. (Manzil: 100057, O'zbekiston, Toshkent sh., Yangi Olmazor ko'chasi, 20-uy, Tel.: (+99871)248-79-94, faks: (+99871)248-79-92, e-mail: info@ispm.uz)

Dissertatsiya bilan Axborot - resurs markazida tanishish mumkin. (81 raqam bilan ro'yxatga olingan). Manzil: 100057, O'zbekiston, Toshkent shahri, Yangi Olmazor ko'chasi, 20-uy. Tel.: (+99871) 248-79-59; e-mail: info@ispm.uz).

Dissertatsiya avtoreferati 2026 yil «03» 09 kuni tarqatildi.
(2026 yil «03» 09 daqi 21 raqamli reestr bayonnomasi).



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

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

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

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasining qisqa mazmuni)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Hozirgi vaqtda jahon miqyosida yarimo'tkazgichli asbobsozlik sohasida yangi materiallarni olish usullarining jadal rivojlanishi tufayli yarim o'tkazgichlarning yupqa qatlamlarini o'rganishga qiziqish ularni amaliy qo'llanishining keng imkoniyatlariga bog'liq. Yupqa yarimo'tkazgichli plastinalar va ular asosidagi qurilmalarning o'lchamlarini kichrayishi, texnologik ishlab chiqarish imkoniyatlarining ortishi va bu fizik xususiyatlarning keng spektri yupqa qatlamlar materialshunosligi va yupqa qatlamlar elektronikasining rivojlanishiga turtki bo'ldi. Muhim vazifalardan biri $A^{IV}V^{VI}$ guruh yarimo'tkazgichli birikmalarining yupqa qatlamlaridagi yangi avlodini qurilmalarining, ayniqsa, infraqizil nurlanishlarni yutadigan yupqa PbS qatlamlaridan tayyorlangan yorug'likka sezgir elementlarning va PbTe birikmasidan tayyorlangan yupqa qatlamli issiqlik o'zgartirgichlarini yaratish va ishlash prinsiplarini o'rganish hisoblanadi.

Jahonda tor zonali yarimo'tkazgich materiallar, xususan PbTe asosidagi polikristall va monokristall yupqa qatlamlarning strukturaviy, optik, fotoelektrik hamda termoelektrik xossalarini takomillashtirishga qaratilgan ilmiy tadqiqotlarga alohida e'tibor qaratilmoqda. Ushbu yo'nalishda yupqa qatlamlarning kristall tuzilishi, stexiometrik tarkibi, nuqson markazlari va qo'shimcha fazalarining elektrofizik hamda optik parametrlariga ta'sirini aniqlash, tok tashuvchilar konsentratsiyasi va harakatchanligini boshqarish, termoelektr yurituvchi kuchni oshirish hamda yutilish spektrlarini boshqarish mexanizmlarini o'rganish ustuvor ilmiy yo'nalishlardan biri hisoblanadi. Shu bilan birga, Pb va Te ning qo'shimcha massaviy ulushlari hisobiga stexiometrik tarkibi buzilgan PbTe yupqa qatlamlarida taqiqlangan zona kengligining o'zgarishi holatlari, qo'shimcha energetik sathlarning hosil bo'lish qonuniyatlari, optik va fotoelektrik xossalarning o'zgarish mexanizmlarini kompleks o'rganish, shuningdek, yuqori sezgir tenzorezistiv elementlar yaratish imkoniyatlarini ilmiy asoslash dolzarb vazifalardan hisoblanmoqda.

Respublikamizda yarimo'tkazgich materiallar fizikasi, mikro- va nanoelektronika, tenzosezgir elektron qurilmalarni rivojlantirish bo'yicha izchil ilmiy tadqiqotlar olib borilmoqda. 2022–2026-yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasida yuqori sezgirlikka ega bo'lgan mahsulotlar ishlab chiqarish, elektrofizik xususiyatlarini kompleks o'rganish va amaliyotga joriy etish hamda ilm-fan natijalarini iqtisodiyot tarmoqlariga tatbiq etish bo'yicha muhim vazifalar belgilangan. Ushbu vazifalarni amalga oshirishda, xususan, PbTe polikristall yupqa qatlamlarining strukturaviy, optik va fotoelektrik xususiyatlarini chuqur tadqiq etish, ularning stexiometrik tarkibini boshqarish orqali termoelektrik va fotoelektrik parametrlarini yaxshilash, infraqizil diapazonda ishlovchi yuqori sezgir fotoqabul qilgichlar, tenzorezistiv datchiklar, hamda zamonaviy mikroelektronika uchun yangi funksional elementlarni yaratish muhim hisoblanadi.

Mazkur dissertatsiya tadqiqoti O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022 yil 28 yanvardagi "Yangi O'zbekistonni 2022-2026-yillarda rivojlantirish

strategiyasi to'g'risida"gi PF-60-son Farmoni¹, O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2021 yil 19 martdagi "Fizika sohasida ta'lim sifatini oshirish va ilmiy tadqiqotlarni takomillashtirish chora-tadbirlari to'g'risida"gi PQ-5032-son Qarori², O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2021 yil 2 martdagi "Elektrotexnika sanoatini yanada rivojlantirish va mahalliy mahsulotlarning raqobatbardoshligini oshirishga doir qo'shimcha chora-tadbirlar to'g'risida"gi Qaroriga asoslangan va boshqa me'yoriy hujjatlarda belgilangan vazifalarni ma'lum darajada bajarishga xizmat qiladi.

Tadqiqotning O'zbekiston Respublikasi fan va texnikasini rivojlantirishning ustuvor yo'nalishlariga muvofiqligi. Ushbu ilmiy-tadqiqot ishi O'zbekiston Respublikasi fan va texnikasini rivojlantirishning III "Energetika, energiya resurslarini tejash, transport, mashinasozlik va asbobsozlik; zamonaviy elektronika, mikroelektronika, fotonika, elektron asbobsozlik sohalarini rivojlantirish" ustuvor yo'nalishlariga muvofiq bajarilgan.

Muammoni o'rganilganlik darajasi: jahonning yetakchi olimlari Akihiro Ishida, Xoang Txi Xuan Thao, Seisuke Nakashima, Hidenari Yamamoto, Mamoru Ishikiriyamalar (Yaponiya) PbTe yupqa qatlamlari va PbTe asosidagi super panjaralarning termoelektrik xossalarini, R. Koler (Germaniya), K. Berxart, K. N. Chopra, D. M. Freyk, G. Kolfield, R. Lamberts, A.V.Kumar, A.K.Chaudhuri (Hindiston) kabi olimlar PbTe xalkogenid birikmalarining xossalarini chuqur o'rganishgan.

Ushbu yo'nalish bo'yicha MDH davlatlari olimlaridan G.Z.Bagieva, D.Sh.Abdinov, N.B.Mustafaev (Ozarbayjon) kabi olimlar tellur va qo'rg'oshin massaviy ulushi oshirilgan PbTe monokristallarining elektr xossalari, O.Xshanovska, T.Parashchuk, I.Horichoklar n - va p - tipidagi PbTe da termoelektrik xossalarini, X. M. Dashevskiy (Rossiya) PbTe yupqa yupqa qatlamlarining termoelektrik xususiyatlarini va ularning shogirdlari bosim o'tkazish orqali kremniyning xalkogenid birikmalarini va boshqa yarimo'tkazgichlarni deformatsiyalash yo'li bilan tenzosezgirlik xususiyatlarini samarali boshqarishga asoslangan turli tenzosezgir datchiklarni yaratish bo'yicha ilmiy izlanishlar olib bormoqdalar.

O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi olimlari akademik R.A.Mo'minov, Z.S.Zaynobiddinov, A.Mamadolimov, professorlar A.V.Karimov, A.Z.Rahmatov, S.X.Shomirzaev, B.A.Ataqulov, E.A. Abdullaev, Z.T.Azamatov, T.M.Roziqov, O.O. Mamatkarimov, D.M.Yodgarova va ularning shogirlari xalkogenid birikmalar va kremniy yarim o'tkazgichlarga bosim o'tkazish bilan ularning elektr va deformatsion xossalarini o'rganishga katta hissa qo'shgan.

Bugungi kungacha olib borilgan ko'plab tadqiqotlarga qaramay, yupqa qatlamlarda buzilgan stexiometriyaga ega polikristalli PbTe birikmalarini deformatsiyalanishi hodisalari va ularning tashqi omillar: optik va fotoelektrik xususiyatlarga ta'siri hali ham yetarlicha o'rganilmagan.

¹ O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022 yil 28 yanvardagi "Yangi O'zbekistonni 2022-2026-yillarda rivojlantirish strategiyasi to'g'risida"gi PF-60-son Farmoni

² O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2021 yil 19 martdagi "Fizika sohasida ta'lim sifatini oshirish va ilmiy tadqiqotlarni takomillashtirish chora-tadbirlari to'g'risida"gi PQ-5032-son Qarori

Dissertatsiya mavzusining dissertatsiya bajarilgan oliy ta'lim muassasasining ilmiy tadqiqot ishlari bilan bog'liqligi. Dissertatsiya tadqiqot ishi Farg'ona davlat universitetining ilmiy tadqiqot rejasi doirasida hamda 2012-2014 yillarda bajarilgan ITD-12-56 "Yarim o'tkazgichlardan termoelektrik materiallar olish" va 2018-2020-yillarda bajarilgan "Inert gaz muhitida yarimo'tkazgichli materiallarni olish texnologiyasi" loyihalari doirasida bajarilgan. Tadqiqotning bir qismi Rostov-Dondagi (Rossiya) Asboblarni nazorat qilish, o'lchash va diagnostika markazida o'tkazilgan.

Tadqiqotning maqsadi Polikristalli PbTe yupqa qatlamlarining strukturaviy, optik va fotoelektrik xususiyatlarini o'rganishdan iborat.

Tadqiqot vazifalari:

yuqori darajada buzilgan stexiometrik nisbatga ega polikristall PbTe(Te) va PbTe(Pb) yupqa qatlamlarni o'stirish texnologiyasini takomillashtirish va ularning elektr o'tkazuvchanligini tadqiq qilish;

polikristall PbTe(Pb) yupqa qatlamlaridagi tok tashuvchilari konsentratsiyasini Pb ning massaviy ulushi qiymatiga bog'liqligini aniqlash;

polikristall PbTe, PbTe(Te) va PbTe(Pb) yupqa qatlamlarning elektrofizik, optik, fotoelektrik xususiyatlarini kompleks tadqiq qilish orqali tenzosezgir elementlarni yaratish;

Pb va Te ning qo'shimcha massaviy ulushini kiritish natijasida hosil bo'lgan polikristall PbTe(Pb), PbTe(Te) yupqa qatlamlarini yutilish spektrini aniqlash;

Pb va Te ning massaviy ulushini ortishi natijasida polikristall PbTe(Pb), PbTe(Te) yupqa qatlamlarida yuzaga keladigan stexiometrik nisbat buzilishining taqiqlangan zona kengligiga ta'sirini o'rganish.

Tadqiqotning obyekti sifatida Pb va Te ning massaviy ulushi ortishi natijasida hosil bo'lgan PbTe(Pb), PbTe(Te) birikmalari hisoblanadi.

Tadqiqot predmeti polikristall PbTe yupqa qatlam namunalarining elektrofizik va optik xususiyatlarining deformatsiyaga, harorat jarayonlariga va superstexiometrik xlorli muhitda ishlov berishga bog'liqligidan iborat.

Tadqiqot usullari. Bu ishda polikristalli yupqa qatlamlarni o'stirishda VUP-4 qurilmasida termovakuum changlatish usulidan, polikristalli PbTe yupqa qatlamlarining sirt relefi morfologiyasini tadqiq qilish uchun atom-kuch mikroskopidan, Powder Cell-2.4 dasturi yordamida Ritveld usulida difraktogramмага ishlov berish hamda Xoll koeffitsienti usuli yordamida solishtirma qarshilik, harakatchanlik va konsentratsiyani aniqlash usullaridan foydalanilgan.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi:

ilk bor Te ning massaviy ulushi 2,8% ga oshirilganda polikristall PbTe(Te) yupqa qatlamlarining termoEYuKning qiymati 600 mKv/grad ga yetishi aniqlangan;

ilk bor Pb nung massaviy ulushi 3,2% ga oshirilganda, polikristall PbTe(Pb) yupqa qatlamlarida tok tashuvchilar konsentratsiyasi o'zining $2,5 \cdot 10^{18} \text{ sm}^{-3}$ ga teng maksimal qiymatiga erishishi aniqlangan;

ilk bor mos ravishda Te va Pb ning qo'shimcha massaviy ulushi kiritilgan polikristall PbTe(Te), PbTe(Pb) yupqa qatlamlariga asoslangan, 0.1÷0.4 eV yutilish

spektrlari diapazonida optik va fotoelektrik xususiyatlarini boshqarish imkonini beruvchi tenzorezistiv elementlar olingan;

ilk bor Pb va Te ning massaviy ulushini oshirilishi natijasida hosil bo'lgan, stexiometrik nisbati buzilgan polikristall PbTe(Pb) va PbTe(Te) yupqa qatlamlarining yutilish spektrlari $0,29 \div 0,33$ eV diapazonida ekanligi aniqlangan;

ilk bor Te nung massaviy ulushi 2,8% ga oshirilgan *p*-tipdagi polikristall PbTe(Te) yupqa qatlamlarining taqiqlangan zona kengligida erkin tellur mavjudligi bilan bog'liq bo'lgan va chegaraviy energiyasi $h\nu = 0,13$ eV ga teng qo'shimcha sath aniqlangan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

Dissertatsiyada ishlab chiqilgan, Te va Pb ning massaviy ulushini oshirish orqali hosil bo'lgan polikristall PbTe(Te) va PbTe(Pb) yupqa qatlamlarining termo- va tenzoelektr xususiyatlarini boshqarish usullaridan harorat, deformatsiya va charchoq yemirilishlari datchiklari uchun sezgir elementlar yaratishda foydalanish mumkin.

Tadqiqot natijasida olingan ma'lumotlarni tahlil qilish asosida $0,33 \cdot 10^{-3}$ dan $1,32 \cdot 10^{-3}$ gacha bo'lgan nisbiy birlik oralig'ida siklli deformatsiyalar diapazonda polikristall PbTe(Te) yupqa qatlam elementlariga asoslangan samarali yuqori sezgir bosim datchiklarini yaratish imkoniyati ko'rsatilgan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi zamonaviy o'lchash asboblaridan D2 - PHASER (Bruker, Germaniya) rentgen difraktometri, rentgen fazaviy tahlili (XRD — X-Ray Diffraction), Raman spektrometri (Bruker, Germaniya) va tadqiqot usullaridan foydalanishga, tajribadan olingan va hisoblangan ma'lumotlar boshqa mualliflarning natijalariga mos kelishiga, shuningdek zamonaviy fizik modellar asosida olingan natijalarning tavsifiga asoslangan. Tajribalar natijasida olingan ma'lumotlarning ishonchliligi mustaqil va bir-birlarini to'ldiradigan o'lchash va tahlil qilish usullari kompleksini qo'llash orqali ta'minlanadi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati: Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati turli deformatsiyalar ta'sirida polikristall PbTe yupqa qatlamlarning strukturaviy, optik va fotoelektr xossalari tadqiq qilish jarayonlari haqida fizik tushunchalarni kengaytirishdan iborat.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati shu bilan izohlanadiki, ular neft quvurlari va samolyotlar konstruksiyalarida, asbobsozlik va fanning boshqa sohalarida kichik deformatsiyalarda yoriqlarni aniqlash imkonini beradi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. O'tastexiometrik Te va Pb ning qo'shimcha massaviy ulushi oshirilgan PbTe(Te) va PbTe(Pb) polikristall yupqa qatlamlarining strukturaviy, elektrofizik, optik va fotoelektrik xususiyatlari bo'yicha olingan ilmiy natijalar asosida:

Neft va suv quvurlarida mikroyoriqlarni aniqlash uchun yuqori sezgir tenzodatchiklarni yaratishda qo'llanilgan. Jumladan, yuqori cho'zilish koeffitsiyentiga ega bo'lgan polikristall PbTe yupqa qatlamlari va ularning ko'p martalik siklli deformatsiyalar sharoitidagi barqarorlik xususiyatlari Rossiya Federatsiyasining Rostov-Don shahridagi Asbobsozlik nazorat va o'lchash diagnostika markazida muvaffaqiyatli sinovdan o'tkazilgan (Rossiya Federatsiyasi, Rostov-Don shahri, Asbobsozlik nazorat va o'lchash diagnostika markazi, 2023-

yil). Ilmiy natijalardan foydalanish siqilish va cho‘zilish deformatsiyalarida ichki kuchlanishning $1,0 \times 10^8$ din/sm² dan $2,8 \times 10^8$ din/sm² gacha o‘zgarish qonuniyatlarini aniqlash, qo‘rg‘oshinning superstexiometrik qo‘shilishi elektr o‘tkazuvchanlikka ta’sirini baholash hamda tellurning massaviy ulushi 2,8 % ga oshirilganda PbTe(Te) yupqa qatlamlarida termoEYuKning 600 μ V/grad gacha ortishini asoslash imkonini bergan. Natijada yuqori bosim ostida ishlaydigan neft va suv quvurlaridagi mikrodeformatsiyalarni qayd etuvchi yuqori sezgir tenzodatchiklarning metrologik ko‘rsatkichlarini yaxshilash imkonini bergan.

Yuqori sezgirlik koeffitsiyentiga ega bo‘lgan polikristall PbTe yupqa qatlamlarini olish usullari Namangan muhandislik-qurilish institutida bajarilgan F2- 71 “O‘ta yuqori chastotali elektromagnit maydonda deformatsiyalangan p–n birikmaning volt-amper xususiyatlariga yorug‘likning ta’sirini tadqiq qilish” (2017–2020-yillar) fundamental loyihasini bajarishda qo‘llanilgan (O‘zbekiston Respublikasi Oliy ta’lim, fan va innovatsiyalar vazirligi Oliy ta’limni rivojlantirish tadqiqotlari markazining 2026-yil 19-martdagi 02/01-01-190-son ma’lumotnomasi). Ilmiy natijalardan foydalanish elektr parametrlari yuqori barqarorlikka ega bo‘lgan aktiv sezgir elementlar asosida bosim va deformatsiyani o‘lchashga mo‘ljallangan tenzodatchiklarning tajriba namunalarini yaratish imkonini bergan.

PbTe(Te) va PbTe(Pb) polikristall yupqa qatlamlarining yuqori chastotali, optik va fotoelektrik xususiyatlari bo‘yicha olingan ilmiy natijalar “FOTON” aksiyadorlik jamiyatida infraqizil va yuqori chastotali diapazonlarda ishlovchi yuqori tenzosezgir datchiklarning aktiv elementlarini yaratishda joriy etilgan (“FOTON” aksiyadorlik jamiyatining 2025-yil 11-iyundagi 97-son ma’lumotnomasi). Ilmiy natijalardan foydalanish PbTe(Te) va PbTe(Pb) yupqa qatlamlarining yutilish spektrlarining qisqa to‘lqinli sohaga siljish qonuniyatlarini hamda dielektrikning yuqori chastotali xususiyatlarini aniqlash hamda, $0,33 \times 10^{-3}$ – $1,32 \times 10^{-3}$ nisbiy deformatsiyalar diapazonida ishlovchi yuqori sezgir bosim datchiklarining tajriba namunalarini yaratib, ularning elektrofizik va fotoelektrik parametrlari zamonaviy jahon analoglari darajasiga mos keladigan tenzodatchiklarni ishlab chiqarish imkonini bergan.

Tadqiqot natijalarini aprobatsiyasi. Tadqiqotning asosiy natijalari 7 ta xalqaro va 1 ta respublika ilmiy-amaliy anjumanlarida muhokama qilingan.

Tadqiqot natijalarining e’lon qilinganligi. Dissertatsiya mavzusi bo‘yicha asosiy natijalari 29 ta ilmiy nashlarda, jumladan O‘zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasi tomonidan dissertatsiyalarning asosiy ilmiy natijalarini chop etish uchun tavsiya etilgan ilmiy jurnallarda 3 ta maqola, Scopus bazasidagi jurnallarda 2 ta maqola, xorijiy xalqaro jurnalda 1 ta maqolalarda o‘z aksini topgan. Tadqiqot natijasida O‘zbekiston Respublikasi adliya vazirligi huzuridagi intellektual mulk agentligi tomonidan 2 ta dastur uchun guvohnoma olingan

Dissertatsiyaning tuzilmasi va hajmi. Dissertatsiya ishi kirish, xulosa, to‘rtta boblar va foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxatidan iborat. Dissertatsiya hajmi 118 sahifalarda, jumladan, 55 ta rasmlar va 13 ta jadvallarda keltirilgan.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Kirishda dissertatsiya tadqiqoti mavzusining dolzarbligi va ahamiyati asoslangan, tadqiqotning respublika fan va texnika rivojlanishining ustuvor yo'nalishlari bilan bog'liqligi aniqlangan, muammoni o'rganilganlik darajasi ochib berilgan, maqsad va vazifalar shakllantirilgan, tadqiqot ob'ektlari, predmetlari va usullari aniqlangan, tadqiqotning yangiligi bayon etilgan, natijalarni joriy etilishi va ishning aprobatsiyalanishi haqida qisqacha ma'lumotlar, shuningdek dissertatsiyaning tuzilmasi va hajmi haqida ma'lumotlar keltirilgan.

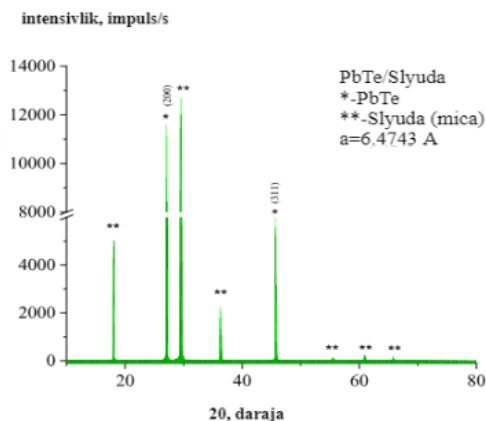
“Xalkogenid yarimo'tkazgichli yupqa qatlamlarning tenzo xossalari va deformatsion xossalari” birinchi bobida qo'rg'oshin xalkogenid yupqa qatlamlarining ishlab chiqarish xususiyatlari va optik xususiyatlarini tadqiq qilishga bag'ishlangan ilmiy adabiyotlar manbalari tahlil qilingan.

Te va Pb ning massaviy ulushi oshirilgan polikristall PbTe yupqa qatlamlarini olish jarayonlari, shuningdek, bu qo'shimchalar yupqa qatlamlarning optik va fotoelektr xususiyatlaridagi roli tahlil qilingan. Bu ma'lumotlarni identifikatsiyalanishi uzlukli, bu yupqa qatlamlarning optik parametrlari chuqur o'rganilmagan. Shuning uchun, tashqi ta'sirlarga barqaror bo'lgan tenzosezgir datchiklarni olish uchun bu parametrlarni identifikatsiyalash va aniqlash uchun polikristall PbTe yupqa qatlamlarining kompleks tadqiqotlarini o'tkazish maqsadga muvofiq. O'tkazilgan tahlil yakunlari bo'yicha bu dissertatsiya ishida olib borilgan tadqiqot maqsadlarini qo'yilishiga mantiqiy asoslarni berdi.

“O'zgaruvchan tarkibli qo'rg'oshin-tellurid yupqa qatlamlarini olish texnologiyasi” ikkinchi bobida o'ta stexiometrik tarkibga ega PbTe asosida polikristalli yupqa qatlamlar tayyorlash texnologiyasi va hosil bo'lgan yupqa qatlamlarning optik va fotoelektr xususiyatlarini aniqlash uchun deformatsion xarakteristikalarini o'lchash usullari keltirilgan, fotoo'tkazuvchanlik spektrlari va Xoll o'lchovlari bo'yicha usullardan foydalanilgan.

Polikristalli PbTe yupqa qatlamlarini olish uchun vakuum $(4-5) \cdot 10^{-6}$ mm sim. Ust.gacha yetadigan VUP-4 vakuum qurilmasi ishlatilgan. Taglik harorati tutgichning pastki qismiga qattiq biriktirilgan xromel-alyumel termojuft orqali nazorat qilindi. Olingan PbTe yupqa qatlamning tenzosezgirliigi, optik va fotoelektr xususiyatlarini solishtirish uchun taglik sifatida poliamid, lavsan, polikor, SiO₂-Si va sital (shisha keramika) ishlatilgan. Yarimo'tkazgichli materiallarni bug'lantirish uchun bir xil bug'lanish tezligini ta'minlaydigan 3 mm diametrli teshikka ega bo'lgan alund savatlari ishlatilgan.

Kondensatdagi u yoki bu komponent tarkibining oshishi yoki kamayishi uning tuzilmasi va elektrfizik xususiyatlarining o'zgarishiga olib keladi. PbTe, Te va Pb materialini bug'lantirish uchun bir xil darajada bir-birlaridan 1-2 mm masofada joylashgan ikkita bug'latgichlar ishlatilgan. Tajribadagi bunday tartibda joylashtirish PbTe, Te va Pb moddalarining taglik ustida bir tekis taqsimlanishiga yordam berdi. Taglikning $T_n=100-120^{\circ}\text{C}$ harorati va bug'lanish moslamasi harorati $T_u=720-780^{\circ}\text{C}$ haroratlar intervalida kondensatsiyalangan qatlamlar yaxshi yopishqoqlik, past qarshilik va barqaror elektr-mexanik va elektro-fizik



1-rasm. Slyuda tagligiga olingan polikristalli qo'rg'oshin telluridning difraktogrammasi

elektr va optik xususiyatlarini tadqiq qilish” uchinchi bobida buzilgan stexiometriyaga ega PbTe yupqa qatlamlarining strukturaviy, elektr va optik xususiyatlarining haroratga bog'liqligini kompleks tadqiq qilish natijalari keltirilgan. Bundan tashqari, bu qatlamlarning samarali singdiruvchanligi natijalari tahlil qilindi.

Rentgen- strukturaviy tahlillar va difraktometrda olingan natijalar 1,2 va 3-rasmlarda keltirilgan. 1-rasmda slyuda taglikda olingan kubik tizimning polikristall PbTe ning difraktogrammasi tasvirlangan. Powder Cell-2.4 dasturi yordamida Ritveld usulida difraktogrammaga ishlov berish ICSD ma'lumotlar bazasidan (№ 225) difraktogrammaga yaxshi mos kelishini ko'rsatdi. $2\theta = 28,7^\circ$ va 46° bo'lgandagi intensiv eng yuqori qiymatlar qo'rg'oshin telluridiga mos keladigan (200) va (311) sifatida ko'rsatilgan.

Bizning holda energiyalari 1-4 keV ga yaqin bo'lgan spektral liniyalar bir nechta Cd, Te, Fe, Si elementlarga ega. Agar qaralayotgan liniya Te ga tegishli bo'lsa, uning intensivligi Cd, Fe, Si elementlarning boshqa spektral liniyalaridan 4-5 marta katta bo'ladi.

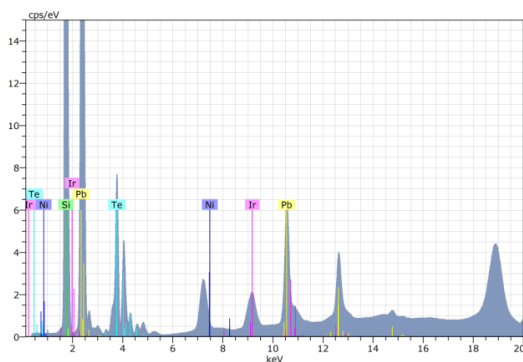
1-rasmdan ko'rinib turibdiki, yupqa qatlam polikristalli tuzilmaga ega, elementar yacheyka parametri emsa $a = 6,4743\text{\AA}$ bo'lib, adabiyotlar ma'lumotlaridan biroz farq qiladi.

Slyudadagi polikristall PbTe yupqa qatlamining difraktogrammasi D2- PHASER (Bruker, Germaniya) rentgen difraktometrda har bir nuqtada $\Delta 2\theta = 0,01^\circ$ qadam va $\tau = 0,1\text{ s}$ ma'lumotlarni to'plash vaqtiga ega Cu, Ka nurlanishidan ($K\alpha 1 = 1,54060\text{\AA}$ va $K\alpha 2 = 1,54443\text{\AA}$) foydalanish bilan olingan.

xususiyatlarga ega bo'ldi. Kondensatsiyalangan qatlamlar massaviy ulushlarini tortish natijalari shuni ko'rsatdiki. Te massaviy ulushi 4,8% gacha oshirilgan va Pb massaviy ulushi 3,2% gacha oshirilgan yupqa qatlam na'munalarda zaryad tashuvchilar konsentratsiyasini aniqlash uchun ishlatildi.

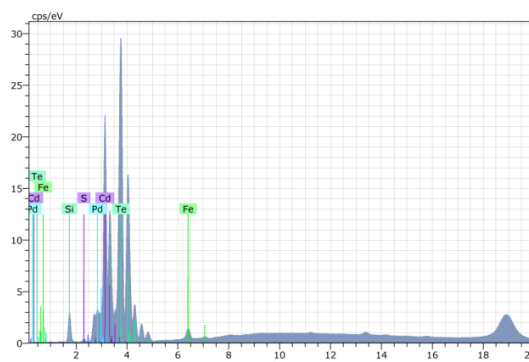
Dissertatsiyaning
“Polikristall PbTe yupqa qatlamlarining strukturaviy,

PbTe - shisha



2-rasm. Shisha taglikda olingan qo'rg'oshin telluridning difraktogrammasi

PbTe-SiO₂-Si

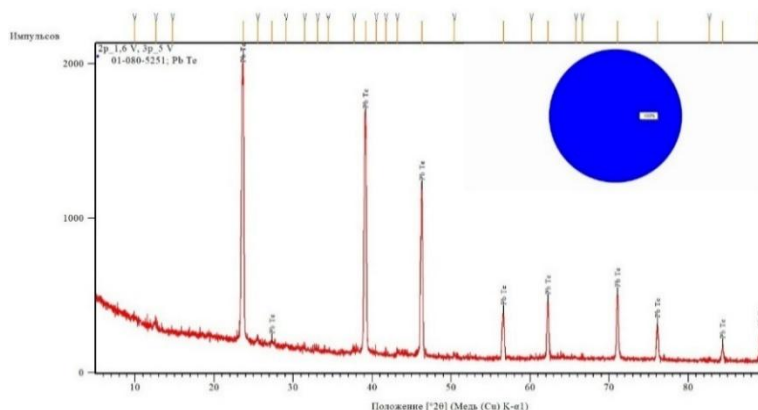


3-rasm. SiO₂-Si taglikda olingan qo'rg'oshin telluridning difraktogrammasi

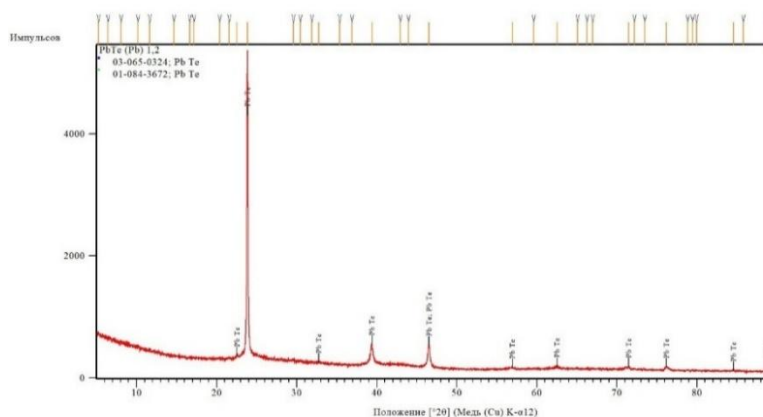
2 va 3-raslarda mos ravishda shisha va SiO₂-Si tagliklarda olingan shunday difraktogrammalardan biri keltirilgan. Kristal panjara elementar yacheykasining a chiziqli parametrini hisoblash uchun kub tizim formulasidan foydalanildi:

$$\frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} = \frac{1}{d^2}, \quad (1)$$

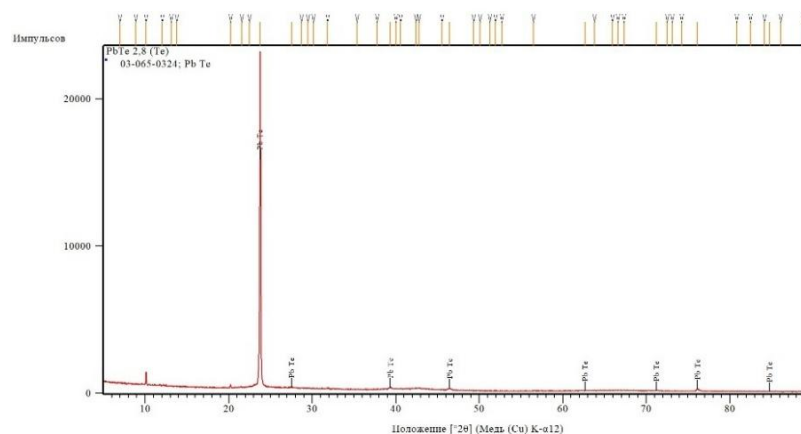
bu yerda h, k, l – Miller indeksleri, d – tekisliklararo masofa.



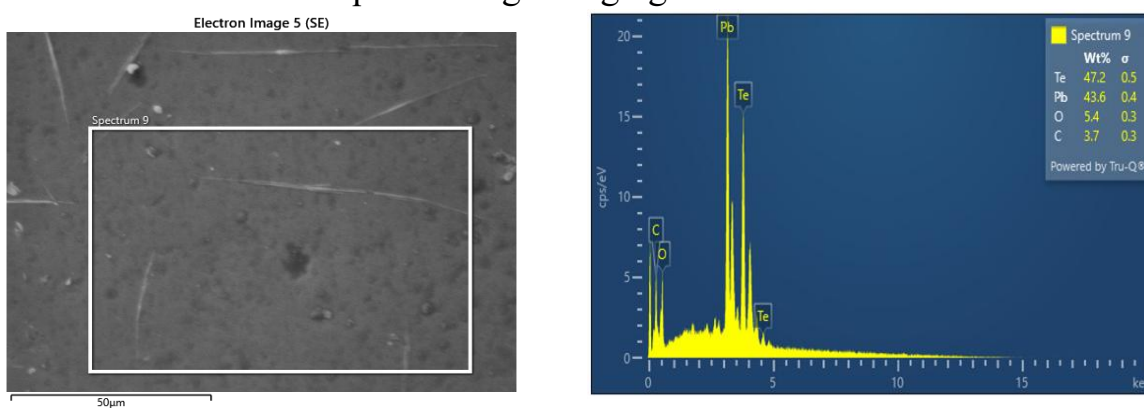
4-rasm. Boyitilmagan polikristall PbTe yupqa qatlamining difraktogrammasi.



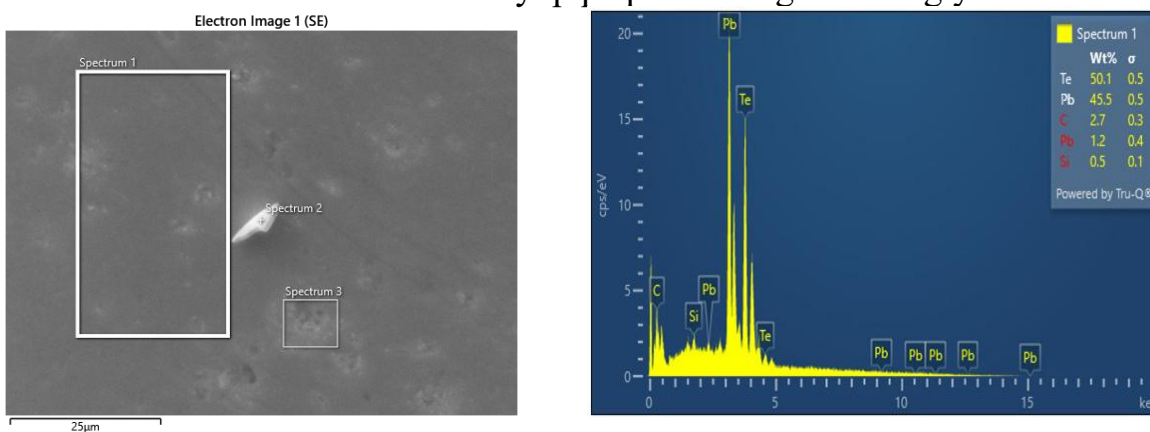
5-rasm. Pb ning massaviy ulushi 1,2% ga oshirilgan polikristall PbTe(Pb) yupqa qatlamining difraktogrammasi.



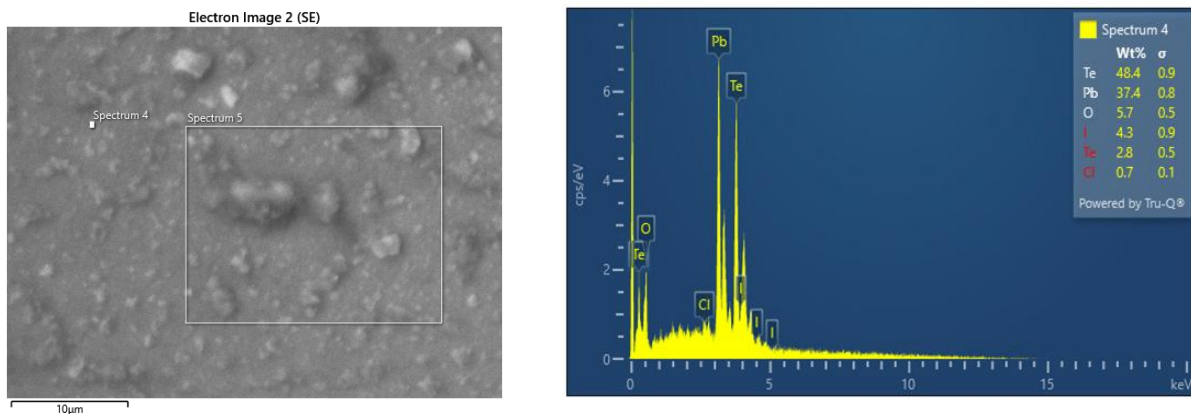
6-rasm. Te ning massaviy ulushi 2,8% ga oshirilgan polikristall PbTe(Te) yupqa qatlamining difragtogrammasi.



7-rasm. Polikristall PbTe yupqa qatlamining morfologiyasi.



8-rasm. Pb ning massaviy ulushi 1,2% ga oshirilgan polikristall PbTe(Pb) yupqa qatlamining morfologiyasi.



9-rasm. Te ning massaviy ulushi 2.8% ga oshirilgan polikristall PbTe(Te) yupqa qatlamining morfologiyasi.

Difragtogrammalarni taqqoslaganda bir biridan farqlanuvchi rentgen cho‘qqilarini kuzatish mumkin. Taqqoslash natijasida massaviy ulushi oshirilgan va oshirilmagan polikristall PbTe, PbTe(Te), PbTe(Pb) yupqa qatlam na‘munalarida kuzatilgan yangi cho‘qqilar quydagicha farq qilganligini kuzatish mumkin: $2\theta = 27^\circ, 35^\circ, 42^\circ, 50^\circ$ hosil bo‘lgan yangi cho‘qqilar PbTe yupqa qatlamlarida binar birikmalarning shakllanish bilan bog‘liqligi aniqlandi. Bregg qonuni yordamida birikmaning panjara doimiysi hisoblaganda $a = 6.4645 \text{ \AA}$ ga teng bo‘ldi va bu adabiyotlarda ko‘rsatilgan fundamental panjara doimisiga mos keladi.

Olingan natijalar rentgen strukturaviy taxlil PbTe boyitilgan xolatda Pb va Te atomlaridan iborat bo‘lgan birikmalar hosil bo‘lishini ko‘rsatdi. Bundan tashqari, PbTe na‘munasi Pb va Te ning massaviy ulushi oshirilganda PbTe panjarasining tugunlarida joylashib, PbTe atomlari bilan o‘zaro birikadi. Bu o‘z navbatida massaviy ulushi oshirilgan PbTe namunasining asosiy fundamental parametrlarini o‘zgarishiga olib keldi, hamda o‘ziga xos optik, fotoelektrik xususiyatlariga ega bo‘lgan yangi yarimo‘tgazgich materialini sintez qilganligini dalolat beradi.

Olingan rentgen natijalaridan shuni aniqladik, Pb ning massaviy ulushi 1.2% ga oshirilgan polikristall PbTe(Pb) yupqa qatlamlarning strukturasi yaxshilanib, termoEYuK hamda optik va fotoelektrik xususiyatlari barqarorlashganligini olingan natijalarda kuzatish mumkin. Te massaviy ulushi 2.8% ga oshirilgan PbTe(Te) namunalarida esa termoEYuK bo‘yicha yuqori barqarorlik kuzatildi.

Ta‘qiqlangan zonaning kengligini aniqlash uchun xona haroratida olingan $R(\lambda)$ qaytarish koeffitsientining IQ spektral egri chizig‘idan foydalanildi va Kubelka-Munk funksiyasi hisoblandi:

$$F(R) = (1 - R)^2 / 2R = \alpha / s \quad (2)$$

Keyin quyidagi tenglamadan foydalanildi:

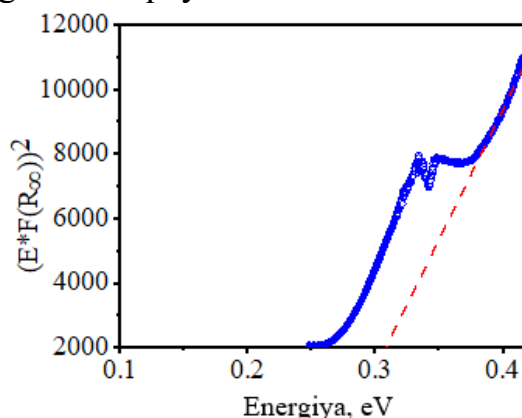
$$(h\nu\alpha)^{1/n} = A(h\nu - E_g) \quad (3)$$

bu yerda h – Plank domiysi, ν – chastota, A – proporsionallik koeffitsienti:

$$(h\nu \cdot F(R_\infty))^2 = F(R_\infty)(h\nu - E_g) \quad (4)$$

0,308 eVga teng bo'lgan E_g qiymati energiya o'qi bilan kesishgan joygacha urinmani approksimatsiyalash orqali olingan grafik 10-rasmda keltirilgan.

Shunday qilib, olingan E_g qiymati PbTe birikmaning tor zonali yarimo'tkazgich ekanligini tasdiqlaydi.



10-rasm. PbTe yupqa qatlam uchun $(E - F(R_\infty))^2$ funksiyaning E energiyaga bog'liqligi

Tajribalar ko'rsatdiki, qo'rg'oshin xalkogenidi yupqa qatlamlarining kislorod bilan o'zaro ta'sirlashishi hatto yupqa qatlamlar xona haroratida atmosfera havosida saqlansa ham, ularning xususiyatlarida sezilarli o'zgarishlarga olib keladi, chunki n-tipdan p-tipga o'tish tez bo'lib o'tadi (1-jadval). Bunda ishlov berish harorati 140°C, vaqt 8 soat bo'ldi. Bu haroratdan yuqori qizdirish yupqa qatlamlar xususiyatlarining qaytarilmas o'zgarishlariga olib keladi. Keyingi tadqiq qilingan yupqa qatlamlarda tellur massaviy ulushi 0,8 dan 4,8% gacha oshirildi.

Qo'rg'oshin massaviy ulushi 0,2 dan 3,2% gacha intervalda oshirilgan o'zgaruvchan tarkibiga ega yupqa qatlamlar namunalari tadqiq qilindi. Teng sharoitlarda qo'rg'oshin massaviy ulushi oshirilgan yupqa qatlamlarning elektr o'tkazuvchanligi tellur massaviy ulushi oshirilgan yupqa qatlamlarga qaraganda bir necha baravar yuqori bo'ldi. Eksperimental ma'lumotlarning natijalari 1-jadvalda keltirilgan.

1-jadval

Qo'rg'oshin massaviy ulushi 0,2 dan 3,2% gacha intervalda oshirilgan o'zgaruvchan tarkibiga ega yupqa qatlamlar namunalari

№ namuna	Pb ning massaviy ulushi oshirilgan. Massa%	PbTe – Pb			№ namuna	Pb – Te		
		$n \cdot 10^{-17},$ sm^{-3}	$R_x \sigma,$ $\text{sm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$	$\sigma,$ $(\text{Om} \cdot \text{sm})^{-1}$		$n \cdot 10^{-17},$ sm^{-3}	$R_x \sigma,$ $\text{sm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$	$\sigma, (\text{Om} \cdot \text{sm})^{-1}$
18	0	4,3	2,4	0,26	1	4,5	2,4	0,27
20	0,2	8,3	2,78	0,37	8	8,7	3	0,38
21	1,2	18,8	2,91	0,84	9	19,2	3,0	0,86
23	2,2	20,8	2,78	0,9	11	21,0	2,9	0,91
24	3,2	24,7	2,37	0,99	13	25,4	2,2	1,02

2-jadvalda issiqlik bilan ishlov berishdan oldin va keyin PbTe va Te birikmalarining bir vaqtning o'zida bug'lantirilishi natijasida olingan polikristall PbTe(Te) yupqa qatlamlarning elektr o'tkazuvchanlik qiymatlari keltirilgan.

Jadvaldan ko‘rinib turibdiki, issiqlik bilan ishlov berishda elektr o‘tkazuvchanligining kamayishi darajasi (2-7 marta) yupqa qatlamlar tarkibiga (Te massaviy ulushi oshirilganligiga) bog‘liq. Te massaviy ulushi oshirilganligi ortishi bilan σ o‘zgarishi o‘rtasida korrelyatsiya kuzatiladi. Tellur massaviy ulushi 2,8% oshirilgan polikristall PbTe(Te) yupqa qatlamlar issiqlik bilan ishlov berishga eng sezgir bo‘ldi.

2-jadval

Tellur massaviy ulushi 0 dan 4,8% gacha intervalda oshirilgan o‘zgaruvchan tarkibiga ega yupqa qatlamlar namunalari

№	Te massaviy ulushi oshirilganligi massa. %	σ , $\text{om}^{-1} \cdot \text{sm}^{-1}$		№	Te massaviy ulushi oshirilganligi massa. %	σ , $\text{om}^{-1} \cdot \text{sm}^{-1}$	
Namuna		Issiqlik bilan ishlov berishdan oldin	Issiqlik bilan ishlov berishdan keyin	Namuna		Issiqlik bilan ishlov berishdan oldin	Issiqlik bilan ishlov berishdan keyin
307	0	0,56	0,38	16	2,8	0,033	0,01
308		0,56	0,33	45		0,03	0,011
309		0,56	0,37	27		0,028	0,011
36	0,8	0,277	0,047	24	3,8	0,3	0,031
37		0,277	0,0192	35		0,11	0,017
38		0,2	0,05	44		0,11	0,019
17	1,8	0,156	0,062	47	4,8	0,189	0,035
25		0,14	0,062	19		0,14	0,035
28		0,14	0,041	18		0,125	0,031

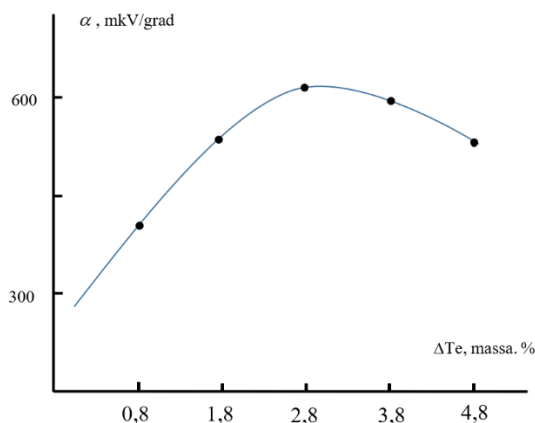
3-jadvalda Pb massaviy ulushi oshirilganligiga bog‘liq ravishda PbTe(Pb) yupqa qatlamlarining elektr o‘tkazuvchanligiga havodagi issiqlik bilan ishlov berishning ta’siri natijalari keltirilgan. Bu ma’lumotlar shuni ko‘rsatadiki, yupqa qatlamlarda ΔPb ortishi bilan issiqlik bilan ishlov berishda σ qiymatning o‘zgarishi sezilarli bo‘ladi.

3-jadval

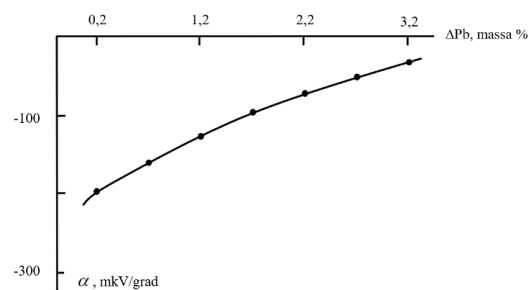
Pb massaviy ulushi oshirilganligiga bog‘liq ravishda PbTe(Pb) yupqa qatlamlarining elektr o‘tkazuvchanligiga havodagi issiqlik bilan ishlov berishning ta’siri natijalari

Namuna raqami	Pb massaviy ulushi oshirilganligi massa. %	σ , $\text{om}^{-1} \cdot \text{sm}^{-1}$		Namuna raqami	Pb massaviy ulushi oshirilganligi massa. %	σ , $\text{om}^{-1} \cdot \text{sm}^{-1}$	
		Issiqlik bilan ishlov berishgacha	Issiqlik bilan ishlov berishdan keyin			Issiqlik bilan ishlov berishgacha	Issiqlik bilan ishlov berishdan keyin
307	0	0,69	0,38	66	1,2	8,8	2,8

308		0,56	0,33	67		8,2	2,46
309		0,56	0,37	68		8,6	1,9
56		3,3	1,01	419		14,5	1,72
57	0,2	3,32	1,29	417	2,2	14,3	1,53
58		2,7	0,91	418		13,3	2



11-rasm. Tellur massaviy ulushi oshirilganligiga bog‘liq polikristall PbTe(Te) yupqa qatlamlaridagi issiqlik EyuKning o‘zgarishi



12-rasm. Qo‘rg‘oshin massaviy ulushi oshirilganligiga bog‘liq polikristall PbTe(Pb) yupqa qatlamlarda issiqlik EyuKi bog‘liqligi

Pb va PbTe birikmasidan bir vaqtning o‘zida bug‘lantirilishi natijasida olingan yupqa qatlamlarning elektr xususiyatlarini taqqoslash elektr o‘tkazuvchanligi va tashuvchilar konsentratsiyasi yaqin qiymatlarga ega ekanligini ko‘rsatadi. Har ikkala hollar uchun ham o‘ziga xos xususiyat shundaki, ko‘proq qo‘rg‘oshinga ega bo‘lgan namunalar yuqori elektr o‘tkazuvchanligiga ega bo‘ladi.

12-rasmda qo‘rg‘oshin massaviy ulushi oshirilganligi tarkibi ortishida PbTe(Pb) yupqa qatlamlaridagi α o‘zgariishlar tasvirlangan. Bu rasmdan ko‘rinib turibdiki, ΔPb moddaning ortishi issiqlik EyuKining pasayishiga olib keladi. $\Delta Pb < 0,2\%$ massaviy ulushi ega bo‘lgan yupqa qatlamlar uchun ma’lumotlarni olishga erishilmadi, chunki bunday qo‘rg‘oshin massaviy ulushi oshirilgan yupqa qatlamlarning xossalarni o‘lchash jarayonida vakuum kamerasidan havoga olingandan so‘ng, p-tipga aylandi.

2 va 3 jadvallarda hamda 11 va 12-rasmlarda ko‘rsatilganidan ko‘ra ko‘proq kiritilgan komponentlarning ortiqchaligi $\alpha\alpha$ va $\sigma\sigma$ qiymatlarning sezilarli o‘zgarishlarga olib kelmaydi. Ushbu komponentlarning PbTe birikmasidagi maksimal eruvchanligi qo‘rg‘oshin (Pb) uchun $3,3 \cdot 10^{-3} \%$ va tellur (Te) uchun $7,6 \cdot 10^{-3} \%$ qiymatni tashkil etadi; ularning ushbu chegaradan yuqori bo‘lgan ortiqcha miqdori esa ikkinchi faza shaklida ajralib chiqishi bilan izohlanadi.

Yupqa qatlamlarning elektr o‘tkazuvchanligining haroratga bog‘liqligini eksperimental tadqiq qilish shuni ko‘rsatdiki, $\sigma(T)$ aktivlashish xususiyatiga ega, bu yerda φ_{eff} elektr o‘tkazuvchanlikni aktivlashish energiyasi (ΔE_a) ma’nosiga ega bo‘ladi. Elektr o‘tkazuvchanlikni aktivlashtirish energiyasining yupqa qatlam

materialining tarkibiga bog'liqligi o'rganildi. 13- va 14-rasmlarda $\lg \sigma$ o'zgaruvchining $\frac{1}{T}$ qiymatga bog'liqlilari tasvirlangan. 13- va 14-rasmlardagi ma'lumotlarga ishlov natijasida olingan ΔE_a qiymatning yupqa qatlam tarkibiga eksperimental bog'liqligi 4-jadvalda keltirilgan.

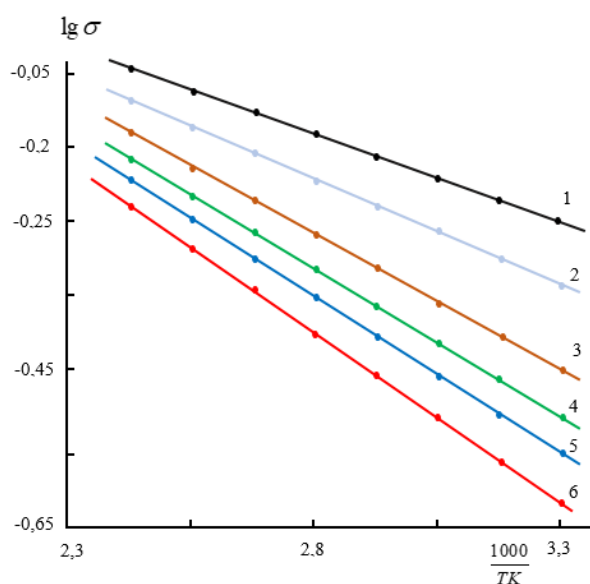
Bir tomondan, elektr o'tkazuvchanligi va aktivlashish energiyasi o'rtasidagi aloqalarning xarakteri, ikkinchi tomondan, materialning tarkibi har bir tarkibning bir nechta yupqa qatlamlarida bir necha bor tekshirildi.

4-jadval

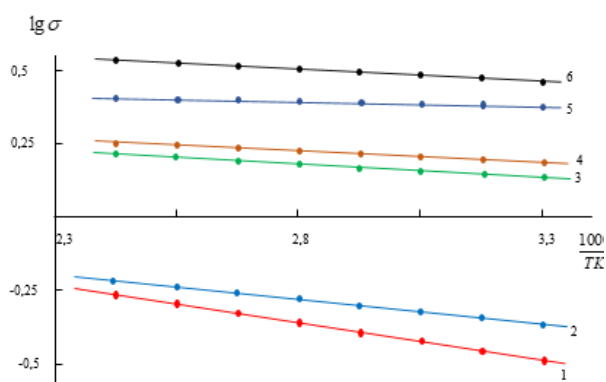
ΔE_a qiymatning yupqa qatlam tarkibiga eksperimental bog'liqligi

Te massaviy ulushi oshirilgan, massa. %	ΔE_a , eV	Pb massaviy ulushi oshirilgan, massa. %	ΔE_a , eV
0,8	0,085	0	0,080
1,8	0,090	0,2	0,090
2,8	0,095	1,2	0,040
3,8	0,105	2,2	0,015
4,8	0,12	3,2	-

Bir tomondan, elektr o'tkazuvchanligi va aktivlashish energiyasi o'rtasidagi aloqalarning xarakteri, ikkinchi tomondan, materialning tarkibi har bir tarkibning bir nechta yupqa qatlamlarida bir necha bor tekshirildi.



13-rasm. Te massaviy ulushi oshirilgan PbTe(Te) yupqa qatlamlarning elektr o'tkazuvchanligining haroratga bog'liqligi. ΔE_a massa. %: 1-0; 2-0.8; 3-1.8; 4-2.8; 5-3.8; 6-4.8

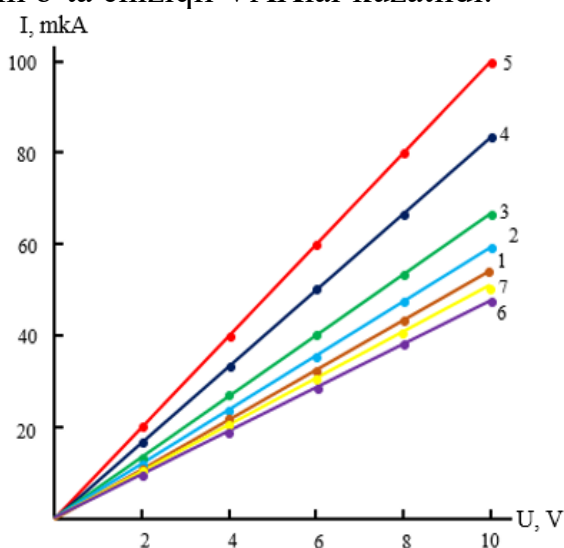


14-rasm. Pb massaviy ulushi oshirilgan PbTe(Pb) yupqa qatlamlar elektr o'tkazuvchanligining haroratga bog'liqligi. 1,3,5 – komponentlarni hamda 2, 4, 6- PbTe va Pb bilan bug'lantirish orqali olingan yupqa qatlamlar. ΔE_a massa. %: 1,2-2; 3,4-2; 5,6-2,2

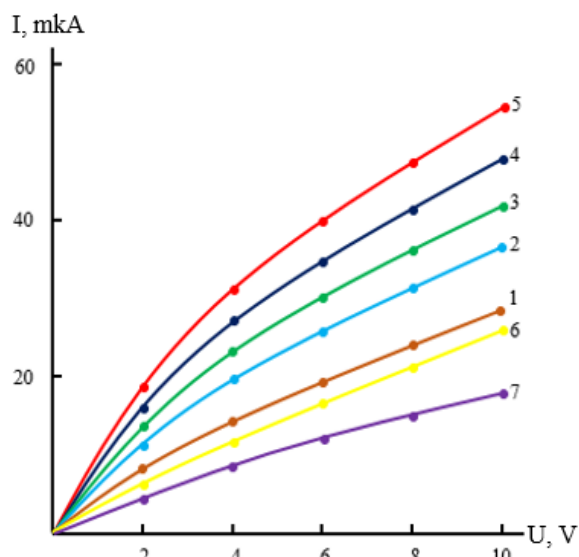
Haroratga bog'liq ravishda σ qiymatni o'zgarishining aktivlashish xarakteri yupqa qatlamlarga havoda issiqlik bilan ishlov berishdan keyin ham saqlanib qoladi, bunda ham qo'rg'oshin, ham tellurning massaviy ulushi oshirilgan yupqa qatlamlarning elektr o'tkazuvchanligining aktivlashish energiyasi ortadi.

Yupqa qatlamlarning volt-ampere xarakteristikalar (VAX) ma'lum darajada ularning elektr o'tkazuvchanligi mexanizmlarini baholash imkonini beradi.

15-rasmda n-tipdagi $0,33 \cdot 10^{-3}$ dan $1,32 \cdot 10^{-3}$ nisbiy birliklarga nisbiy deformatsiyalarda stexiometrik tarkibga yaqin bo'lgan o'tkazuvchanlikdagi PbTe birikmadan olingan yupqa qatlamli tenzorezistorlarning volt-ampere xarakteristikalar tasvirlangan. Tok tashuvchilarining konsentratsiyasi $4,28 \cdot 10^{17} \text{ sm}^{-3}$ ni tashkil etdi. Rasmdan ko'rinib turibdiki, tokning kuchlanishga bog'liqligi deformatsiyaning barcha darajalarida chiziqli xarakterga ega. Yupqa qatlamlar namunalarining qarshiligining o'zgarishining cho'zilish deformatsiyalanishga bog'liqligi nochiziqli ko'rinishga ega, ya'ni oldin qarshilikni ortishi, keyin esa pasayishi kuzatiladi. Qarshilikning kamayishi rasmdan aniq ko'rinib turibdi, $\varepsilon = 1,32 \cdot 10^{-3}$ nisbiy birlik bo'lganda namuna volt-ampere xarakteristikasining 7-to'g'ri chizig'i $\varepsilon = 0,33 \cdot 10^{-3}$ nisbiy birlik bo'lgandagi 6-to'g'ri chiziq ustida joylashgan. Namunaning volt-ampere xarakteristikasi, $\varepsilon = 0,33 \cdot 10^{-3}$ rel.un da olingan. Bug'lantirosh natijasida Te ning massaviy ulushi 1,8% gacha bo'lgan olingan bilan boyitilgan namunalarning PbTe(Te) birikmaning volt-ampere xarakteristikalar chiziqli shaklga ega bo'ldi. Tellur massaviy ulushi ortishi bilan tokning kuchlanishga bog'liqligi tabiati chiziqlik ko'rinishni oladi (16-rasm). Alohida komponentlardan olingan namunalar uchun ham chiziqli, ham nochiziqli, ham o'ta chiziqli VAXlar kuzatildi.



15-rasm. N-tipli polikristall PbTe yupqa qatlamining bir o'qli deformatsiyaning turli darajalarida VAXlari. 1 – deformatsiyasiz; 2-5 – siqilish; 6.7 – cho'zilish



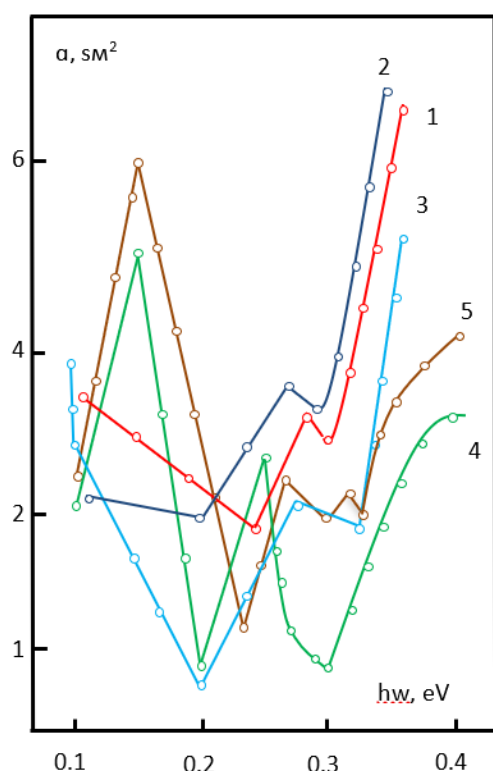
16-rasm. Te ning massaviy ulushi 2,8% ga oshirilganda PbTe(Te) yupqa qatlamning VAXlari. 1 – deformatsiyasiz; 2-5 – siqilish; 6.7 – cho'zilish

Yarimo'tkazgichlarning optik xususiyatlarini tadqiq qilish zonaviy tuzilmani tadqiq qilishning eng muhim usullaridan biri hisoblanadi, shuningdek fonon spektrining optik tarmoqlarining chastotalari va yarimo'tkazgichlarning boshqa

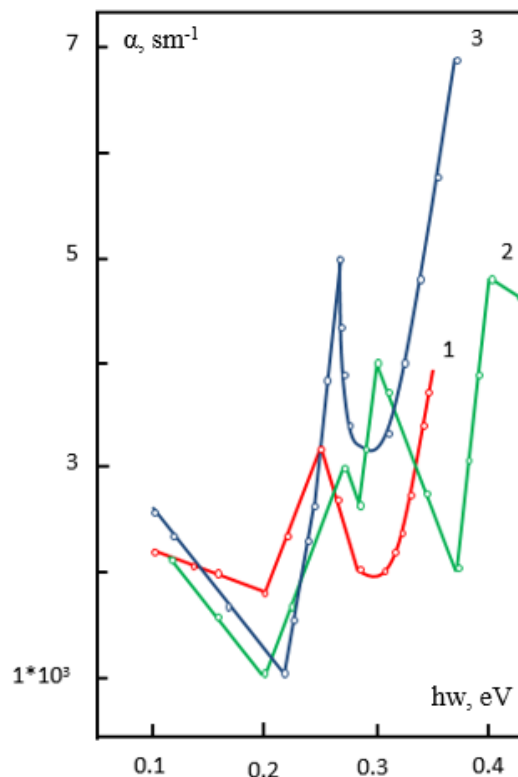
parametrlari haqida ma'lumotlarni beradi. Bir jinsli bo'lmagan yarimo'tkazgichlardagi elektromagnit to'liqlarning yutilishi va qaytishidagi qonuniyatlar bu bir jinslimasliklarning qaralayotgan hodisalarga ta'siri haqida ma'lumotlarni, shuningdek ularning tarkibi haqida ba'zi ma'lumotlarni berishi mumkin.

Qalinligi ~ 3 mkm bo'lgan ham n-tipdagi, ham p-tipdagi o'tkazuvchanlikdagi PbTe yupqa qatlam namunalarini olindi va xona haroratida spektrning IQ sohasida bu namunalarning yutish va qaytish koeffitsientlari tadqiq qilindi.

19- va 20-rasmlarda mos ravishda Te va Pb ning massaviy ulusi oshirilgan PbTe(Te), PbTe(Pb) yupqa qatlamlari namunalarining shaffofligini o'lchash natijasida olingan xona haroratida yutish spektrlari tasvirlangan. Rasmlardan ko'rinib turibdiki, tadqiq qilingan barcha yupqa qatlamlarning yutish spektrlari bir nechta polosalarga ega bo'ladi.



19-rasm. Te ning massaviy ulushi oshirilgan PbTe(Te) yupqa qatlamlarining yutish spektrlari. ΔTe massa. %: 1-0, 2-0.8, 3-1.8, 4-2.8, 5-3.8



20-rasm. Pb ning massaviy ulushi oshirilgan PbTe(Pb) yupqa qatlamlarining yutish spektrlari. ΔPb massa. %: 1-0.2, 2-0.2, 3-2.2

Yupqa qatlamlarning spektrlari, garchi umumiy xususiyatga ega bo'lsa-da, yutish polosalari holatlari bo'yicha farqlanadi. Bu polosalar shkala bo'yicha ($h\nu$) surilish va intensivlik bo'yicha ozgina o'zgarishlarga uchraydi. Aniqlangan o'zgarishlar yupqa qatlamlarning tuzilmasi va tarkibidagi ba'zi farqlarni ko'rsatadi, bu esa bunday yupqa qatlamlarning boshqa xususiyatlarining o'zgarishlari haqidagi ma'lumotlarga mos keladi.

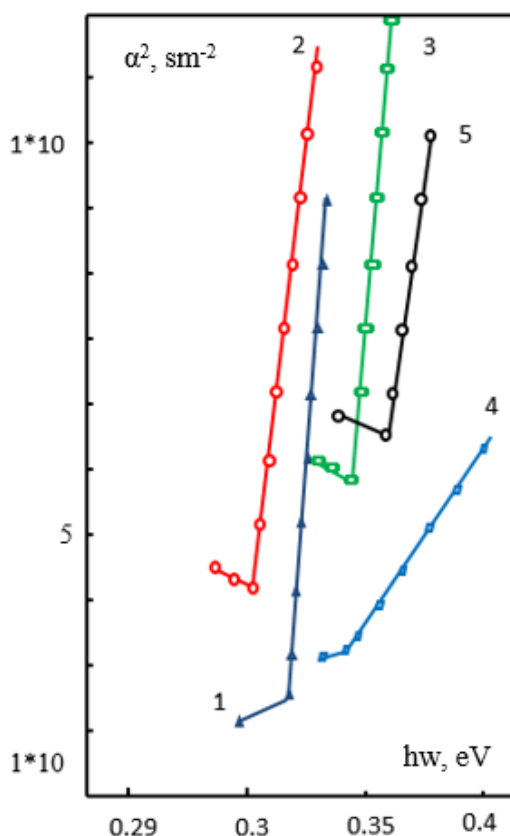
Rasmlardan ko'rinib turibdiki, $h\nu \approx E_g$ energiyada tashuvchilarning zonalar orasidagi o'tishi tufayli yutishning keskin ortishi kuzatiladi.

Fotonlarning yutilishi bilan bo‘lib o‘tadigan to‘g‘ri ruxsat etilgan o‘tishlar uchun $\alpha(\omega)$ yutish koeffitsientining spektral bog‘liqligi quyidagi ifoda bilan berilgan:

$$\alpha \sim (\hbar \nu - E_g)^{1/2}$$

21-rasmda turli tarkiblardagi PbTe yupqa qatlamlari uchun $\alpha^2(\omega)$ ni $\hbar\omega$ bog‘liqliklari keltirilgan. Ko‘rinib turibdiki, tajriba nuqtalari to‘g‘ri liniyalarga yaxshi mos keladi.

Te ning massaviy ulushi oshirilgan polikristall PbTe(Te) yupqa qatlamlari uchun absissalar o‘qida $\alpha^2(\omega)$ to‘g‘ri kesmalarning davom etishi bilan kesiladigan nuqtalar ΔTe moddasiga bog‘liq ravishda 0,29: 0,33 eV chegaralarda bo‘ladi. Pb ning massaviy ulushi 0,2 va 0,22 % oshirilgan polikristall PbTe(Pb) yupqa qatlamlarda $\alpha^2(\omega)$ absissalar o‘qida $\hbar\nu \approx 0,32$ eVni kesadi, bu PbTe monokristallarining optik ta‘qiqlangan zonasi kengligiga mos keladi. Pb ning massaviy ulushi 1,2% oshirilganda o‘zining yutish cheti qisqaroq to‘lqin uzunligi sohasiga suriladi.



21-rasm. ΔTe massa. %: 1-0; 2-0,8; 3-1,8; 4-2,8; 5-3,8; $\alpha^2(\hbar\nu)$ bog‘liqligi

Qo‘rg‘oshin va tellur atomlari bilan boyitilganligiga mos donor yoki akseptor (har doim ham ortiqcha atomlarning konsentratsiyasiga mos kelmaydigan) markazlarning shakllanishiga olib keladi. Kondensatga ko‘p miqdordagi aralashma atomlari kiritilganda, aralashma zonasi hosil bo‘ladi, u kichik sathlar uchun asosiy zonaning cheti bilan birlashadi. Ta‘qiqlangan zonada holatlar zichligi funksiyasining dumi paydo bo‘ladi.

Yuqorida ta‘kidlanganidek, Pb ning massaviy ulushi 1,2% oshirilgan polikristall PbTe(Pb) yupqa qatlamlarida (15-rasm), ichki yutishning cheti spektrning qisqaroq to‘lqin uzunligi sohasiga suriladi. Bu yupqa qatlamlar

qo'rg'oshin bilan boyitilish asosida legirlanganda yupqa qatlamdagi elektron gaz Pb bilan boyitilgan PbTe birikmada qisman hosil bo'ladi, elektronlar Konsentratsiyasi 10^{19} sm^{-3} ga yetishi mumkin va Fermi sathi o'tkazuvchanlik zonasida bo'lishi bilan tushuntirilishi mumkin. O'z yutish $h\nu > E_g + E_F - E_s$ (E_s – o'tkazuvchanlik zonasi tubi, E_F – Fermi energiyasi) fotonlar energiyasida boshlanadi. Fermi sathidan past bo'lgan holat egallaganligi sababli, tashuvchilarning o'tishi energiya Fermi sathidan yuqori bo'lgan holatlarda bo'lib o'tadi. Xuddi shu holat (Burshteyn-Moss samarasi) kuchli legirlangan n-PbTe namunalarida kuzatilgan.

Te ning massaviy ulushi oshirilgan polikristall PbTe(Te) yupqa qatlamlarining yutish spektrlarida $h\nu = 0,13 \text{ eV}$ yaqinida yutish zonasi kuzatiladi. P-tipga asoslangan PbTe(Te) namunalari uchun $\alpha(h\nu)$ spektrlarda kuzatiladigan uzun to'lqinli polosa PbTe valentlik zonasining noekvivalent ulushlari orasidagi optik o'tishlar nuqtai nazaridan tushuntirilishi mumkin, chunki PbTe valentlik zonasining og'ir va yengil tarmoqlari orasidagi energetik tirqish $0,1 - 0,12 \text{ eV}$ ga ($T = 300 \text{ }^\circ\text{K}$) teng. Yupqa qatlamlardagi Te ning massaviy ulushi ortishi bilan bu polosaning intensivligi oshadi, chunki tashuvchilar konsentratsiyasining ortishi bilan og'ir nimzonaning to'ldirilishi ortadi.

Te ning massaviy ulushi 2,8 va 3,8% oshirilgan p-tipdagi o'tkazuvchanlik namunalari spektrlarida yuqorida ko'rsatilgan polosalardan tashqari, $h\nu \approx 0,13 \text{ eV}$ chegaraviy energiyaga ega bo'lgan qo'shimcha polosalar mavjud. Bu maksimumlarning kelib chiqishi, ko'rinishidan, erkin tellurning mavjudligiga bog'liq. Tellurning yutish spektrlarida ko'rsatilganidek, $h\omega \approx 0,12 \text{ eV}$ energiya sohasida valentlik zonasining murakkab tuzilmasi tufayli yutish zonasi kuzatiladi.

Erkin tellurning paydo bo'lishi Te ning massaviy ulushi 2,8 % dan oshganda qiymatli PbTe(Te) yupqa qatlamlarda erimagan o'ta stexiometrik Te kristallitlar chegaralari bo'ylab ikkinchi faza ko'rinishida ajralishiga bog'liq.

“Tenzorezistorlarning parametrlarini va polikristalli PbTe yupqa qatlamlarining xarakteristikalarini tadqiq qilish” to'rtinchi bobda turli Te ning massaviy ulushi oshirilgan texnologik omillarga bog'liq ravishda polikristall PbTe(Te) yupqa qatlamlarning deformatsion xarakteristikalarini va tenzometrlarning parametrlarini tadqiq qilish natijalari keltirilgan.

Olingan yupqa qatlamlarga 80°C da 5 soat davomida havoda issiqlik bilan ishlov berildi. Bunda elektrondan teshikka o'tkazuvchanlik turining inverslanishi bo'lib o'tdi. III bosqichda olingan yupqa qatlamlarda issiqlik bilan ishlov berish jarayonida kislorodni adsorbsiyalanishining kuchli ta'siri kuzatildi. I va II bosqichlar bu namunalarining solishtirma qarshiligi 3-5 marta bo'ldi. Bu natijalarga ko'ra, aytish mumkinki, PbTe bug'lari bug'lanishning birinchi bosqichida tellurning eng ko'p ortqchaligiga ega bo'ladi. Namunaning 30-33% bug'langandan so'ng, bug'dagi Te ning massaviy ulushi oshirilganligi II bosqich bug'lanish shartlariga xos bo'lgan qiymatgacha kamayadi va barqarorlashadi. Bug'lanishning uchinchi bosqichida bug'dagi Te tarkibi kamayadi va qo'rg'oshin ortiqchaligi paydo bo'ladi.

Katta tenzosezgirlikni olish uchun namunaning 80-85% bug'lanishi yetarli bo'ladi. Shu bilan birga, yupqa qatlamlarda metall fazaning shakllanishiga bog'liq bo'ladigan noaktiv va shuntlash oraliqlari hosil qiladigan kondensatdagi material tarkibi kamayadi.

Tajribalar ko'rsatdiki, qatlamlarning tashqi ko'rinishi va tuzilmasi taglik haroratiga kuchli bog'liq. 50°C ga oldindan qizdirilmasdan kesilgan qatlamlarning yuzasi qora rangda olindi. Keyingi ortish namunalari sirt rangining qora rangdan kul rangga o'tishi bilan birga bo'ldi.

Harorat 50°C va undan yuqori ko'tarilganda, nafaqat tashqi ko'rinish, balki qatlamlarning fizik xususiyatlari ham o'zgaradi. Elektr o'tkazuvchanlik oshadi va differensial issiqlik EyuKi kamayadi. Yupqa qatlamlarning tenzosezgirliigi oldin ortadi, keyin esa kamayadi. 90 – 120°C intervalda olingan namunalari taglikka yaxshi yopishqoqlikka va barqaror elektromexanik xususiyatlarga ega. Yuqorida ko'rsatilgan T_n intervaldan taglik harorati ortishi bilan tenzosezgirlik kamayadi. Bu, ravshanki, yupqa qatlam tuzilmasining yaxshilanishi va tenzo xususiyatlari uchun mas'ul bo'lgan nuqsonlar sonining kamayishiga bog'liq.

Jadvallarda ko'rsatilganidek, $v_k=350-450$ Å/s kondensatsiya tezligi eng optimal interval hisoblanadi. Shu tarzda olingan qatlamlar yaxshi tenzometrik xususiyatlarga ega bo'ladi. N_k qiymatning keyingi oshishi elektr o'tkazuvchanlikning oshishiga va K qiymatning kamayishiga olib keladi. Bu, v_k qiymatning ortishida kondensatsiya energiyasining zichligi oshishi va kondensatsiyalanadigan atomlar energiyasining ortishi ularning migratsiyalanish qobiliyatini oshishiga yordam berishiga bog'liq. Sekin kondensatsiyalanadigan chegaralarga qaraganda yirik kristalli yupqa qatlamlarning o'sishi uchun qulay sharoitlar yaratiladi. Shunday qilib, katta v_k qiymatlarda olingan qatlamlar yanada mukammal tuzilmaga ega bo'lishi kerak. T_n qiymatni v_k qiymatga ta'sirini tadqiq qilish bo'yicha tajribalar natijalarini taqqoslash, kondensatsiya tezligining oshishi qatlamlarning xususiyatlari va tuzilishiga taglik haroratining oshishi bilan bir xil ta'sir qiladi, deb aytishga imkon beradi.

XULOSA

1. Ilk bor Te ning massaviy ulushi ortishi natijasida polikristall PbTe(Te) yupqa qatlamlarining elektr o'tkazuvchanligi n-tipdan p-tipga o'zgarishi kuzatildi va Te ning massaviy ulushi 2,8 % ni tashkil etganda termo-EyuK qiymati 600 mkV/grad gacha oshtishi aniqlandi.
2. Ilk bor stexiometrik nisbati buzilgan polikristall PbTe(Te) va PbTe(Pb) yupqa qatlamlarining elektr o'tkazuvchanligi va termoelektr yurituvchi kuchi ortishi aniqlandi, hamda PbTe ning elektr o'tkazuvchanlik ko'rsatkichidan 2 – 2,5 barobar yuqori ekanligi ko'rsatildi.
3. Ilk marotaba Pb ning massaviy ulushi 0.2 % ni tashkil etganda polikristall PbTe(Pb) yupqa qatlamlarining qarshiligi ta'minot kuchlanishi chastotasining ortishi bilan kamayishi, Pb ning massaviy ulushi 0.2 % dan oshganda esa qarshiligi ortishi kuzatildi.
4. Ilk bor Te ning massaviy ulushi 2,8 % va 3,8 % bo'lgan p-tip o'tkazuvchanlikka ega polikristall PbTe yupqa qatlamlarning spektrida $h\nu \approx 0,13$ eV chegaraviy energiyali qo'shimcha soha mavjudligi aniqlandi va bu Te ning valent sohasini murakkab tuzilishi bilan bog'liq ekanligi ko'rsatildi.

5. Birinchi marta Te ning massaviy ulushi 2,8 % bo'lgan polikristall PbTe(Te) yupqa qatlamlarning yutilish spektrida qo'shimcha $h\nu \approx 0,24$ eV ga teng sath aniqlandi va ushbu holat yupqa qatlamlarda kislorod mavjudligi bilan bog'liq ekanligi ko'rsatildi.
6. Ilk marotaba polikristalli PbTe yupqa qatlamlarda deformasiya ta'sirida zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasi 3-4 martaga, qalin qatlamlarda esa 1.5- 2 martaga ortishi, bu yupqa qatlamlarda mavjud bo'lgan potensial to'siqlarning ta'siriga bog'liqligi va deformasiya ta'sirida $R_x \sigma$ qiymatini keskin kamayishi bilan bog'liq ekanligi aniqlandi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.03/2025.27.12.FM/T.01.06 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ
ИНСТИТУТЕ ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ И МИКРОЭЛЕК-
ТРОНИКИ НАЦИОНАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА УЗБЕКИСТАНА**

**ФЕРГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

ХАЛИЛОВ МУХАММАДМУСО МУХАММАДИОНУСОВИЧ

**СТРУКТУРНЫЕ, ОПТИЧЕСКИЕ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
СВОЙСТВА ТОНКИХ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК PbTe**

01.04.10 – Физика полупроводников

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

Ташкент-2026

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Академии наук Республики Узбекистан за № B2023.4.PhD/FM738.

Диссертация выполнена в Ферганском государственном техническом университете.

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

Научный руководитель:

Отажонов Салим Мадрахимович,
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Зайнабидинов Сиражидин
доктор физико-математических наук, профессор,
академик АН РУз.

Музафарова Султанпаша Анваровна
доктор физико-математических наук, профессор

Ведущая организация:

Нукусский государственный педагогический институт

Защита диссертации состоится «18» 09 2026 года в 12⁰⁰ часов на заседании Научного совета DSc.03/2025.27.12.FM/T.01.06 по присуждению ученых степеней при Научно-исследовательском институте Физики полупроводников и микроэлектроники Национального университета Узбекистана (Адрес: 100057, Узбекистан, г. Ташкент, ул. Янги Алмазар, дом 20. Тел: (+99871) 248-79-94, факс (+99871) 248-79-92, e-mail: info@ispm.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре института (зарегистрирована за № 81) по адресу: 100057, Узбекистан, г. Ташкент, ул. Янги Алмазар, дом 20. Тел: (+99871) 248-79-92.

Автореферат диссертации разослан «03» 09 2026 г.
(реестр протокола рассылки № 81 от 03.09 2026 г.).



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

Ж. Ж. Хамдамов,
Ученый секретарь Научного совета
по присуждению ученых степеней, PhD, с.н.с.

Н.А. Тургунов
Председатель научного семинара
при Научном совете по присуждению
ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и необходимость темы диссертации. В мировом масштабе в настоящее время в связи с интенсивным развитием методов получения новых материалов в области полупроводникового приборостроения, интерес к изучению тонких слоев полупроводников обусловлен широкими возможностями их практического применения. Уменьшение размеров тонких полупроводниковых пластин и устройств на их основе, рост технологических возможностей производства и широкого спектра указанных физических свойств послужили толчком к развитию тонкослойного материаловедения и тонкослойной электроники. Одной из важных задач является создание и изучение принципов работы приборов нового поколения тонких слоев полупроводниковых соединений группы $A^{IV}B^{VI}$, особенно светочувствительных элементов из тонких слоев PbS, поглощающих инфракрасное излучение, и тонкослойных тепловых преобразователей из PbTe.

В мире уделяется особое внимание научным исследованиям, направленным на совершенствование структурных, оптических, фотоэлектрических и термоэлектрических свойств поликристаллических и монокристаллических тонких плёнок на основе узкозонных полупроводниковых материалов, в частности PbTe. В данном направлении приоритетными являются исследования, связанные с изучением влияния кристаллической структуры тонких плёнок, стехиометрического состава, дефектных центров и дополнительных фаз на их электрофизические и оптические параметры, управлением концентрацией и подвижностью носителей заряда, повышением термоэлектродвижущей силы (термоЭДС), а также исследованием механизмов управления спектрами поглощения. Наряду с этим актуальными научными задачами являются комплексное исследование закономерностей изменения ширины запрещённой зоны, формирования дополнительных энергетических уровней, механизмов изменения оптических и фотоэлектрических свойств в тонких плёнках PbTe с нарушенной стехиометрией за счёт дополнительного массового содержания Pb и Te, а также научное обоснование возможностей создания высокочувствительных тензорезистивных элементов.

В Республике Узбекистан последовательно развиваются научные исследования в области физики полупроводниковых материалов, микро- и нанoeлектроники, а также создания тензочувствительных электронных устройств. В Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022–2026 годы определены приоритетные направления, предусматривающие разработку высокочувствительных изделий, комплексное исследование их электрофизических характеристик, внедрение результатов научных исследований в производство и расширение применения инновационных технологий в различных отраслях экономики. В этой связи особую актуальность приобретает проведение фундаментальных и прикладных исследований структурных, оптических и фотоэлектрических свойств

поликристаллических тонких плёнок PbTe. Управление их стехиометрическим составом открывает возможности для целенаправленного улучшения термоэлектрических и фотоэлектрических параметров материала, что имеет важное научное и практическое значение. Полученные результаты могут служить основой для разработки высокочувствительных фотоприёмников инфракрасного диапазона, тензорезистивных датчиков нового поколения, а также функциональных элементов современной микро- и наноэлектроники.

Настоящее диссертационное исследование основано на Указе Президента Республики Узбекистан от 28 января 2022 года за № УП-60 «О стратегии развития нового Узбекистана на 2022 – 2026 годы»¹, Постановлении Президента Республики Узбекистан от 19 марта 2021 года за № ПП-5032 «О мерах по повышению качества образования и совершенствованию научных исследований в области физики»², Постановлении Президента Республики Узбекистан от 2 марта 2021 года за № ПП-5011 «О дополнительных мерах по дальнейшему развитию электротехнической промышленности и повышению конкурентоспособности отечественной продукции», и служит в определенной степени выполнению задач, определенных в других нормативно-правовых документах.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан. Данная исследовательская работа выполнена в соответствии с приоритетными направлениями III развития науки и технологий Республики Узбекистан «Энергетика энергоресурсосбережение, транспорт, машиностроение и приборостроение; развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники, электронного приборостроения».

Степень изученности проблемы. Ведущие ученые мира, такие как Akihiro Ishida, Hoang Thi Xuan Thao, Seisuke Nakashima, Hidenari Yamamoto, Mamoru Ishikiriya (Япония), глубоко исследовали термоэлектрические свойства плёнок PbTe и супрешеток на основе PbTe. Ученые K. Verxart, K. N. Chopra, D. M. Freyk, G. Kolfield, R. Lamberts, A.V.Kumar, A.K.Chaudhuri (Индия) провели всесторонние исследования свойств халькогенидных соединений PbTe.

Среди учёных стран СНГ в этом направлении выделяются Г.З. Багиева, Д.Ш. Абдинов, Н.Б. Мустафаев (Азербайджан), которые изучали электрические свойства монокристаллов PbTe с избытком теллура и свинца. Учёные О.Хшановская, Т.Паращук, И.Горичок исследовали термоэлектрические свойства PbTe n- и p-типа, а Х. М. Дашевский (Россия) – термоэлектрические характеристики тонких плёнок PbTe. Его ученики проводят научные исследования по созданию различных тензочувствительных датчиков на основе эффективного управления

¹ Указ Президента Республики Узбекистан от 28 января 2022 года за № УП-60 «О стратегии развития нового Узбекистана на 2022 - 2026 годы»

² Постановлении Президента Республики Узбекистан от 19 марта 2021 года за № ПП-5032 «О мерах по повышению качества образования и совершенствованию научных исследований в области физики»

тензочувствительностью халькогенидных соединений кремния и других полупроводников путём их деформации с использованием давления.

Учёные Академии наук Республики Узбекистан – академик Р.А.Муминов, З.С.Зайнабиддинов, А.Мамадолимов, профессора Д.М.Ядгарова, А.В.Каримов, А.З.Рахматов, С.Х.Шомирзаев, Б.А.Атакулов, Е.А.Абдуллаев, З.Т.Азаматов, Т.М.Рузиқов, О.О.Маматкаримов и их ученики внесли значительный вклад в изучение электрических и деформационных свойств халькогенидных соединений и кремниевых полупроводников при воздействии давления.

Однако, несмотря на многочисленные исследования на сегодняшний день, явления деформации поликристаллических $PbTe$ с искаженной стехиометрией в тонких слоях и их влияние на оптические и фотоэлектрические свойства под воздействием внешних факторов до сих пор остаются малоизученными.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного или научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация.

Диссертационная научно-исследовательская работа выполнена в рамках плана научных исследований Ферганского государственного университета, а также в процессе проектов ИТД-12-56 «Получение термоэлектрических материалов из полупроводников», выполненных в 2012-2014 годах и «Технология получения полупроводниковых материалов в среде инертного газа» в 2018-2020 годах. Часть исследования проведена в Центре приборного контроля, измерений и диагностики г. Ростов-на-Дону (Россия).

Цель исследования – изучение структурных, оптических и фотоэлектрических свойств поликристаллических тонких слоёв $PbTe$.

Задачи исследования:

усовершенствование технологии выращивания поликристаллических тонких слоёв $PbTe(Te)$ и $PbTe(Pb)$ с высокой степенью нарушения стехиометрического соотношения и исследование их электрической проводимости;

определение зависимости концентрации носителей электрического тока в поликристаллических тонких слоях $PbTe(Pb)$ от значения соответствующей массовой доли Pb ;

создание тензочувствительных элементов путём комплексного исследования электрофизических, оптических и фотоэлектрических свойств поликристаллических тонких слоёв $PbTe$, $PbTe(Te)$ и $PbTe(Pb)$;

определение спектра поглощения поликристаллических тонких слоёв $PbTe(Te)$ и $PbTe(Pb)$, полученных путём введения в них дополнительных массовых долей Te и Pb , соответственно;

изучение влияния нарушения стехиометрического соотношения, обусловленного увеличением массовых долей Te и Pb тонких слоёв $PbTe$ на ширину запрещенной зоны $PbTe(Te)$ и $PbTe(Pb)$.

Объектом исследования являются соединения PbTe(Pb) и PbTe(Te) , сформированные в результате увеличения массовой доли Pb и Te соответственно.

Предметом исследования является зависимость электрофизических, оптических свойств образцов PbTe от деформации, температурных процессов и обработки в сверхстехиометрической хлорной среде.

Методы исследования. В данной работе с методом коэффициента Холла были определены удельное сопротивление, подвижность и концентрация. При выращивании поликристаллических пленок использовался метод термовакуумного напыления на установке ВУП-4. Для исследования морфологии рельефа поверхности поликристаллических пленок PbTe использовался атомно- силовой микроскоп.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

впервые установлено, что при увеличении массовой доли Te на 2,8 %, значение термо-ЭДС в поликристаллических тонких слоях PbTe(Te) достигает 600 мкВ/град.

Впервые установлено, что при увеличении массовой доли Pb на 3,2 % концентрация носителей тока в поликристаллических тонких слоях PbTe(Pb) достигает своего максимального значения равного $2,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

Впервые получены тензорезистивные элементы на основе поликристаллических тонких слоёв PbTe(Te) и PbTe(Pb) , в которые соответственно введены дополнительные массовые доли Te и Pb, что позволяет управлять их оптическими и фотоэлектрическими свойствами в диапазоне спектров поглощения 0,1–0,4 эВ.

Впервые установлено, что спектры поглощения тонких поликристаллических слоёв PbTe(Te) и PbTe(Pb) с нарушенными стехиометрическими соотношениями, обусловленным увеличением массовых долей Te и Pb соответственно, находятся в диапазоне 0,29÷0,33 эВ.

Впервые определено, что в ширине запрещенной зоны поликристаллических тонких слоёв PbTe(Te) *p*- типа с увеличенной на 2,8% массовой долей Te, выявлен дополнительный уровень, связанный с наличием свободного теллура с пороговой энергией равной $h\nu=0.13$ эВ.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

Разработанные в диссертации методы управления термо- и тензоэлектрическими свойствами поликристаллических тонких слоёв PbTe(Te) и PbTe(Pb) путем введения в PbTe дополнительных массовых долей Te и Pb, могут быть использованы при создании чувствительных элементов датчиков температуры, деформации, усталостных разрушений.

На основе анализа экспериментальных данных показана возможность создания эффективных высокочувствительных датчиков давления циклической деформации в диапазоне от $0,33 \cdot 10^{-3}$ до $1,32 \cdot 10^{-3}$ отн.ед на основе PbTe(Te) .

Достоверность результатов исследования: Достоверность результатов исследования базируется на использовании современных измерительных приборов и методов, таких как рентгеновский дифрактометр

D2-PHASER (Bruker, Германия), рентгенофазовый анализ (XRD), Рамановская спектроскопия (Bruker, Германия); соответствии экспериментальных и расчетных данных с результатами других авторов, а также интерпретации полученных результатов на основе современных физических моделей. Надежность экспериментальных данных обеспечивается применением комплекса независимых и взаимодополняющих методов измерения и анализа.

Научная и практическая значимость результатов исследования:

Научная значимость результатов исследования заключается в расширении физического понимания процессов изучения структурных, оптических и фотоэлектрических свойств тонких пленок PbTe под воздействием различных деформаций.

Практическая значимость результатов исследований объясняется тем, что они позволяют обнаруживать трещины при малых деформациях в конструкциях нефтепроводов и самолетов, приборостроении и других областях науки.

Внедрение результатов исследования.

На основе научных результатов, полученных при исследовании структурных, электрофизических, оптических и фотоэлектрических свойств поликристаллических тонких плёнок PbTe(Te) и PbTe(Pb) с повышенным сверхстехиометрическим массовым содержанием Te и Pb:

Научные результаты были использованы при разработке высокочувствительных тензорезистивных датчиков для обнаружения микротрещин в нефтяных и водопроводных трубопроводах. В частности, поликристаллические тонкие плёнки PbTe с высоким коэффициентом тензочувствительности и их устойчивость в условиях многократных циклических деформаций были успешно испытаны в Центре приборостроения, контроля, измерений и диагностики г. Ростова-на-Дону Российской Федерации (Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, Центр приборостроения, контроля, измерений и диагностики, 2023 г.). Использование полученных научных результатов позволило установить закономерности изменения внутренних напряжений при деформациях сжатия и растяжения в диапазоне от $1,0 \times 10^8$ до $2,8 \times 10^8$ дин/см², оценить влияние сверхстехиометрического содержания свинца на электропроводность, а также обосновать повышение значения термоЭДС в тонких плёнках PbTe(Te) до 600 мкВ/К при увеличении массовой доли теллура до 2,8 %. Полученные результаты позволили повысить метрологические характеристики высокочувствительных тензодатчиков, предназначенных для регистрации микродеформаций в нефтяных и водопроводных трубопроводах, работающих в условиях высокого давления.

Методы получения поликристаллических тонких плёнок PbTe с высоким коэффициентом чувствительности были использованы при выполнении фундаментального проекта Ф2-71 «Исследование влияния света на вольт-амперные характеристики деформированного p–n-перехода в сверхвысокочастотном электромагнитном поле» (2017–2020 гг.), выполненного в Наманганском инженерно-строительном институте (справка

Центра исследований развития высшего образования Министерства высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан № 02/01-01-190 от 19 марта 2026 года). Использование научных результатов позволило создать экспериментальные образцы тензорезистивных датчиков давления и деформации на основе активных чувствительных элементов с высокостабильными электрическими параметрами.

Научные результаты, полученные при исследовании высокочастотных, оптических и фотоэлектрических свойств поликристаллических тонких плёнок PbTe(Te) и PbTe(Pb), внедрены в акционерном обществе «FOTON» при разработке активных элементов высокочувствительных тензодатчиков, работающих в инфракрасном и высокочастотном диапазонах (справка АО «FOTON» № 97 от 11 июня 2025 года). Использование научных результатов позволило установить закономерности смещения спектров поглощения тонких плёнок PbTe(Te) и PbTe(Pb) в коротковолновую область, определить их высокочастотные диэлектрические характеристики, а также разработать экспериментальные образцы высокочувствительных датчиков давления, функционирующих в диапазоне относительных деформаций $0,33 \times 10^{-3}$ – $1,32 \times 10^{-3}$. Полученные результаты создали научно-техническую основу для производства тензорезистивных датчиков, электрофизические и фотоэлектрические параметры которых соответствуют уровню современных мировых аналогов.

Апробация результатов исследования. Основные результаты исследований обсуждались на 4 международных и 7 республиках научно-практических конференциях.

Публикация результатов исследования. Результаты диссертационного исследования отражены в 29 научных публикациях, в том числе в 3 статьях, опубликованных в научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертаций, в 4 статьях в журналах, индексируемых в базе данных Scopus, а также в 1 статье в зарубежном международном научном журнале. В результате проведённого исследования получены 2 свидетельства на программы для ЭВМ, выданные Агентством по интеллектуальной собственности при Министерстве юстиции Республики Узбекистан.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, заключения, четырех глав, списка использованной литературы. Общий объём изложен на 118 страницах, включая 55 рисунков и 13 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введение обоснована актуальность и значимость темы диссертационного исследования, определена связь исследования с приоритетными направлениями развития науки и технологий в республике, раскрыта степень изученности проблемы, сформулированы цели и задачи, выявлены объекты, предметы и методы исследования, изложена новизна

исследования, приведены краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, а также сведения об объеме и структуре диссертации.

В первой главе **«Тензосвойства и деформационные свойства халькогенидных полупроводниковых пленок»** проанализированы источники научной литературы, посвященные исследованию особенностей получения, оптическим свойствам пленок халькогенидов свинца.

Проанализированы процессы получения тонких пленок PbTe с добавлением Te и Pb, а также роль этих добавок на оптические, фотоэлектрические свойства пленок. Выявление этих данных отрывочное, а оптические параметры этих пленок практически не изучены. Следовательно, целесообразно провести комплексные исследования поликристаллических пленок PbTe для идентификации и определения этих параметров с целью получения стабильных к внешним воздействиям тензочувствительных датчиков. По итогам проведенного анализа дано обоснование постановки задач исследований, выполненных в данной диссертационной работе.

Во второй главе **«Технология получения пленок теллурида свинца переменного состава»** приведены технология изготовления поликристаллических пленок на основе PbTe сверхстехиометрического состава и методики измерения деформационных характеристик для определения оптических и фотоэлектрических свойств полученных пленок, использованы методики по спектрам фотопроводимости и холловского измерения.

Для получения поликристаллических пленок PbTe использована вакуумная установка ВУП-4, которая достигает вакуум до $(4-5) \cdot 10^{-6}$ мм·рт·ст. Температура подложки контролировалась хромель – алюминиевой термопарой, которая жестко крепилась к нижней части держателя. В качестве подложки использован полиамид, лавсан, поликор, SiO₂-Si, ситалл для сравнения тензочувствительности, оптических, фотоэлектрических свойств, полученных PbTe. Для испарения полупроводниковых материалов, были использованы алуновы корзинки с диаметром отверстия 3мм, которые обеспечивали равномерную скорость испарения.

Увеличение или уменьшение количества того или иного компонента в конденсате приводит к изменению его структуры и электрофизических свойств. Для испарения материала PbTe, теллур и свинец использовали два испарителя расположенных на одинаковом уровне на расстоянии друг от друга 1-2 мм. Такое расположение в эксперименте способствовало равномерному распределению PbTe, Te и Pb по подложке. Слои, конденсированные в интервале температур подложки $T_n=100-120^{\circ}\text{C}$ и температур испарителя $T_u=720-780^{\circ}\text{C}$, обладали хорошей адгезией, меньшим сопротивлением и стабильными электромеханическими, электрофизическими свойствами. Результаты взвешивания показали, что тонкие слои содержали избыточные компоненты (согласно стехиометрии): теллур использовался для определения концентрации носителей заряда вес до 4,8% и свинец вес до 3,2%.

В третьей главе диссертации «Исследование структурных, электрических и оптических свойств тонких слоев поликристаллического теллурида свинца» приведены результаты комплексного исследования температурной зависимости структурных, электрофизических, оптических свойств пленок PbTe с нарушенной стехиометрией. Помимо этого, проанализированы результаты эффективной проницаемости этих слоев.

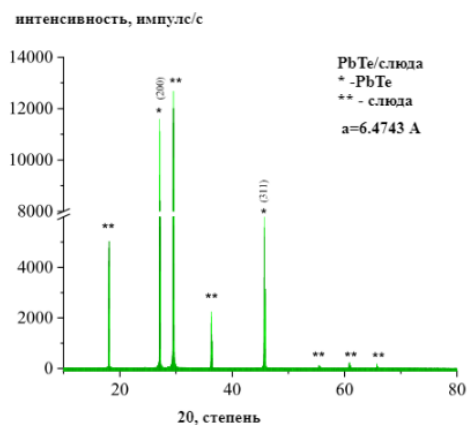
Как показали рентгеноструктурные анализы и полученные в дифрактометре результаты приведены на рис. 1, 2 и 3.

На рис. 1. Представлена дифрактограмма поликристаллического теллурида свинца PbTe кубической сингонии, полученная на подложке из слюды. Обработка дифрактограммы методом Ритвельда с помощью программы Powder Cell -2.4 показало хорошее совпадение с дифрактограммой из базы данных ICSD (№225). Интенсивные пики при $2\theta = 28,7^\circ$ и 46°

проиндексированы как (200) и (311), соответствующие теллуриду свинца.

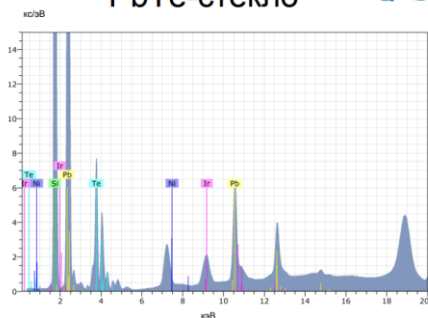
В нашем случае спектральные линии с энергией близкой к 1-4 кэВ имеют несколько элементов: Cd, Te, Fe, Si. Если рассматриваемая линия принадлежит Te, которые интенсивность в 4-5 раз больше, чем других спектральных линий элементов Cd, Fe, Si.

Рис.1. Дифрактограмма поликристаллического теллурида свинца на подложке слюда



структуру, а параметр элементарной ячейки $a = 6.4743\text{Å}$, что незначительно отличается от литературных данных.

PbTe-стекло



PbTe-SiO2-Si

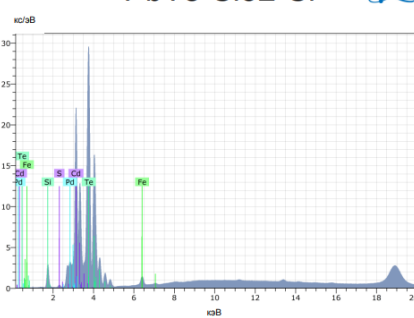


Рис.2. Дифрактограмма теллурида свинца, снятая на стеклянной подложке

Рис.3. Дифрактограмма теллурида свинца на подложке SiO2-Si

Дифрактограмма поликристаллической пленки PbTe на слюде была получена на рентгеновском дифрактометре D2-PHASER (Bruker, Германия) с использованием Cu K α -излучения ($K\alpha_1 = 1,54060\text{ Å}$ и $K\alpha_2 = 1,54443\text{ Å}$) с

шагом $\Delta 2\theta = 0,01^\circ$ и временем сбора данных $\tau = 0,1$ с в каждой точке. На рисунке 2, 3 приведена одна из таких дифрактограмм полученные на подложке стекло и SiO₂-Si соответственно. Для расчета линейного параметра a элементарной ячейки кристаллической решетки использовалась формула для кубической сингонии

$$\frac{h^2+k^2+l^2}{a^2} = \frac{1}{d^2}, \quad (1)$$

где h, k, l – индексы Миллера, d – межплоскостное расстояние.

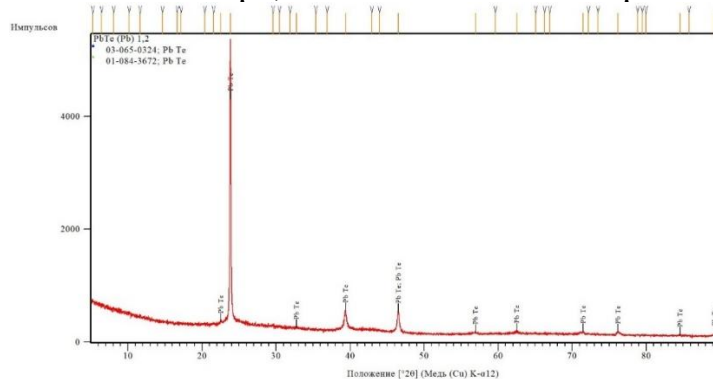


Рис. 4. Дифрактограмма поликристаллической плёнки нелегированного PbTe.

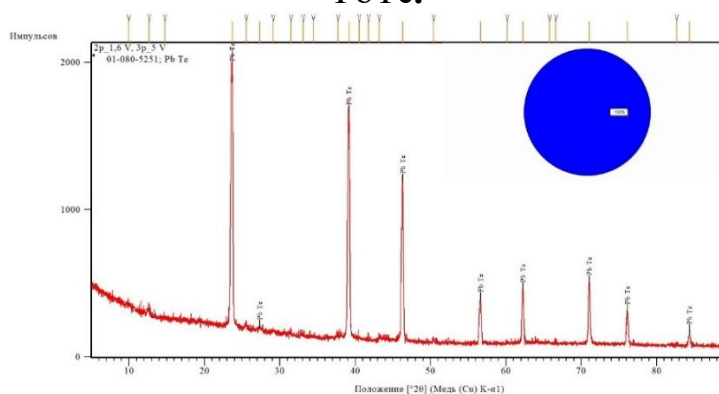


Рис. 5. Дифрактограмма поликристаллической тонкой плёнки PbTe(Pb) с увеличением массовой доли Pb на 1,2 %.

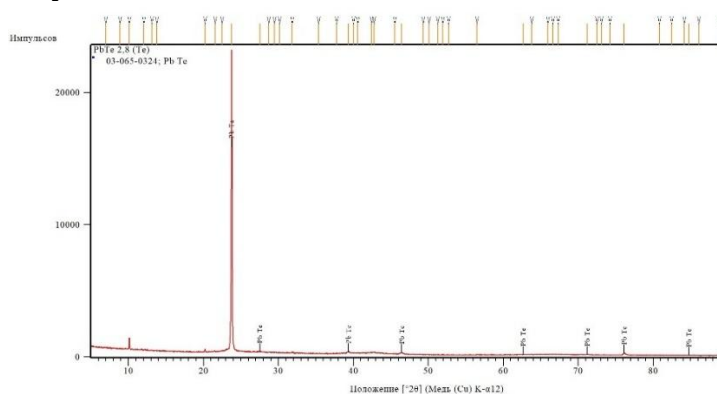


Рис. 6. Дифрактограмма поликристаллической тонкой плёнки PbTe(Te) с увеличением массовой доли Te на 2,8 %

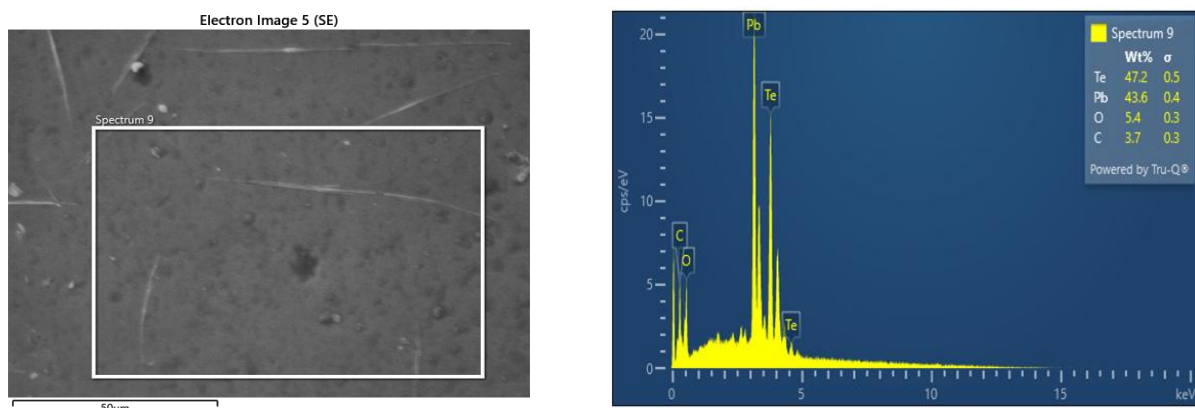


Рис. 7. Морфология поликристаллической тонкой плёнки PbTe.

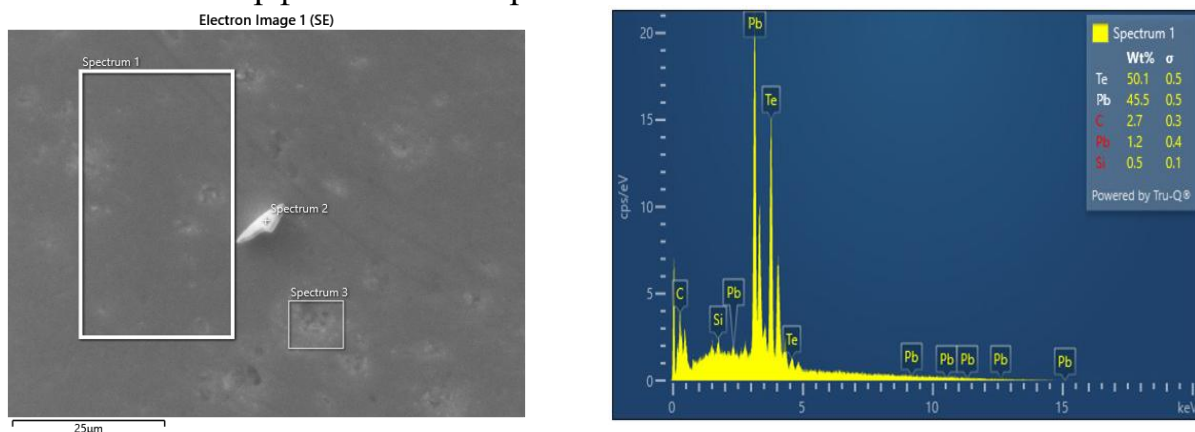


Рис. 8. Морфология поликристаллической тонкой плёнки PbTe(Pb) с увеличением массовой доли Pb на 1,2 %

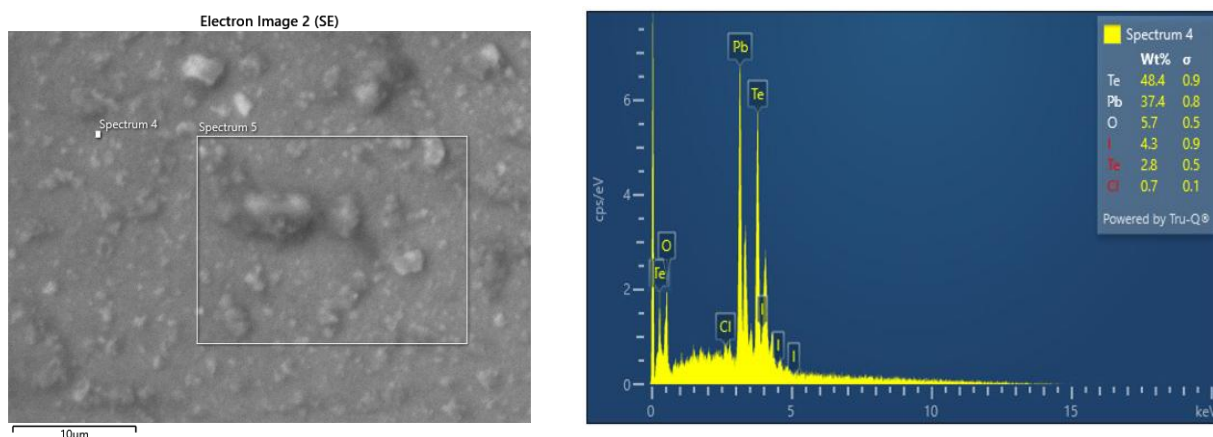


Рис. 9. Морфология поликристаллической тонкой плёнки PbTe(Te) с увеличением массовой доли Te на 2,8 %

При сравнении дифрактограмм можно наблюдать различающиеся между собой рентгеновские пики. В результате сравнительного анализа установлено, что в образцах поликристаллических тонких плёнок PbTe, PbTe(Te) и PbTe(Pb) с увеличенной и неувеличенной массовой долей наблюдаемые новые пики отличаются следующим образом: новые пики при $2\theta = 27^\circ, 35^\circ, 42^\circ, 50^\circ$ в тонких плёнках PbTe связаны с формированием бинарных соединений. С использованием закона Брэгга была рассчитана постоянная решётки соединения, которая составила $a = 6,4645 \text{ \AA}$, что хорошо

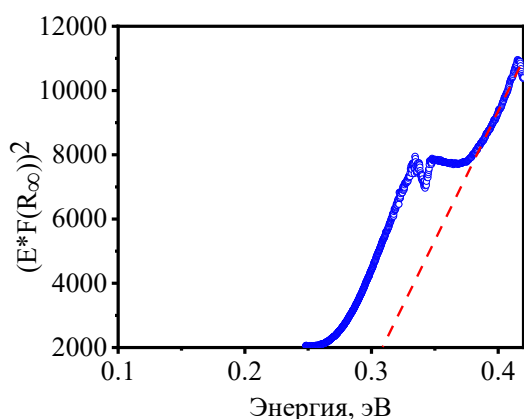


Рис.10. Зависимость функции $(E \cdot F(R_\infty))^2$ от энергии E для пленки PbTe

приводит к изменению основных фундаментальных параметров легированного образца PbTe, а также свидетельствует о синтезе нового полупроводникового материала, обладающего специфическими оптическими и фотоэлектрическими свойствами.

Из полученных рентгеновских результатов можно заключить, что при добавлении Pb в количестве 1,2 мас. % в PbTe его структура улучшалась, а термоэлектрические, оптические и фотоэлектрические свойства стабилизировались, что наблюдается в полученных данных. В образцах PbTe, легированных теллуром в количестве 2,8 мас. %, наблюдалась высокая стабильность по термоэлектрическим показателям.

Для определения ширины запрещенной зоны мы воспользовались ИК-спектральной кривой коэффициента отражения $R(\lambda)$, полученной при комнатной температуре, и была рассчитана функция Кубелки-Мунка:

$$F(R) = (1 - R)^2 / 2R = \alpha / s \quad (2)$$

Далее мы воспользовались уравнением

$$(h\nu\alpha)^{1/n} = A(h\nu - E_g) \quad (3)$$

где h – постоянная Планка, ν – частота, а A – коэффициент пропорциональности:

$$(h\nu \cdot F(R_\infty))^2 = F(R_\infty)(h\nu - E_g) \quad (4)$$

Соответствующий график показан на рис.10. Величина E_g , равная 0.308 эВ, была получена аппроксимируя касательную до пересечения с осью энергий.

Таким образом, полученная величина E_g подтверждает, что PbTe является узкозонным полупроводником.

Как показали эксперименты, взаимодействие пленок халькогенидов свинца с кислородом даже при выдержке пленок в атмосферном воздухе при комнатной температуре приводит к существенным изменениям их свойств, так как быстро приходит переход из n -типа в р-тип (таблица 1). При этом температура обработки равнялась 140°C, время- 8 часам. Нагревание выше

согласуется с фундаментальным параметром решётки, приведённым в литературных источниках.

Полученные результаты рентгеноструктурного анализа показали, что в легированном состоянии PbTe происходит образование соединений, состоящих из атомов Pb и Te. Кроме того, установлено, что при увеличении массовой доли Pb и Te в образце PbTe они занимают узлы кристаллической решётки PbTe и взаимодействуют с атомами PbTe. В свою очередь, это

этой температуры приводит к необратимому изменению свойств пленок. В последующих исследованных тонких плёнках массовая доля теллура была увеличена от 0,8 до 4,8 %.

Исследованы образцы тонких плёнок переменного состава с увеличением массовой доли свинца в интервале от 0,2 до 3,2 %.

При равных условиях электрическая проводимость тонких плёнок с увеличенной массовой долей свинца оказалась в несколько раз выше, чем у тонких плёнок с увеличенной массовой долей теллура. Результаты экспериментальных данных приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Образцы тонких плёнок с переменным составом, в которых массовая доля свинца увеличена в интервале от 0,2 до 3,2 %.

№ образцов	Массовая доля Pb увеличена. вес. %	PbTe - Pb			№ образцов	Pb - Te		
		$n \cdot 10^{-17}, \text{см}^{-3}$	$R_x \sigma, \text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	$\sigma, (\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$		$n \cdot 10^{-17}, \text{см}^{-3}$	$R_x \sigma, \text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	$\sigma, (\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$
18	0	4,3	2,4	0,26	1	4,5	2,4	0,27
20	0,2	8,3	2,78	0,37	8	8,7	3	0,38
21	1,2	18,8	2,91	0,84	9	19,2	3,0	0,86
23	2,2	20,8	2,78	0,9	11	21,0	2,9	0,91
24	3,2	24,7	2,37	0,99	13	25,4	2,2	1,02

В таблице 2 приведены значения электропроводности поликристаллических тонких слоёв PbTe(Te), полученных в результате одновременного испарения соединений PbTe и Te до и после термической обработки. Из таблицы видно, что степень уменьшения электрической проводимости (в 2–7 раз) при термической обработке зависит от состава тонких плёнок (увеличения массовой доли Te). Наблюдается корреляция между ростом массовой доли Te и изменением σ . Поликристаллические тонкие плёнки PbTe(Te) с увеличением массовой доли теллура на 2,8 % оказались наиболее чувствительными к термической обработке.

Таблица 2.

Образцы тонких плёнок с переменным составом, в которых массовая доля теллура увеличена в интервале от 0 до 4,8 %.

№ образца	Массовая доля Te увеличена. вес. %	$\sigma, \text{ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$		№ образца	Массовая доля Te увеличена. вес. %	$\sigma, \text{ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$	
		До термо обра ботки	После тармо обра ботки			До термо обра ботки	После тармо обра ботки
307	0	0,56	0,38	16	2,8	0,033	0,01
308		0,56	0,33	45		0,03	0,011
309		0,56	0,37	27		0,028	0,011

36	0,8	0,277	0,047	24	3,8	0,3	0,031
37		0,277	0,0192	35		0,11	0,017
38		0,2	0,05	44		0,11	0,019
17	1,8	0,156	0,062	47	4,8	0,189	0,035
25		0,14	0,062	19		0,14	0,035
28		0,14	0,041	18		0,125	0,031

В таблице 3 приведены результаты влияния термической обработки на электропроводность тонких плёнок PbTe(Pb) в атмосфере воздуха в зависимости от увеличения массовой доли Pb. Эти данные показывают, что в тонких плёнках при увеличении ΔPb изменение значения σ при термической обработке становится более выраженным.

Таблица 3.

Результаты влияния термической обработки на воздухе на электропроводность тонких плёнок PbTe(Pb) в зависимости от увеличения массовой доли Pb.

Номер образца	Избыток Pb вес. %	σ , $\text{ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$		Номер образца	Избыток Pb вес. %	σ , $\text{ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$	
		До термо обра ботки	После тармо обра ботки			До термо обра ботки	После термо обра ботки
307	0	0,69	0,38	66	1,2	8,8	2,8
308		0,56	0,33	67		8,2	2,46
309		0,56	0,37	68		8,6	1,9
56	0,2	3,3	1,01	419	2,2	14,5	1,72
57		3,32	1,29	417		14,3	1,53
58		2,7	0,91	418		13,3	2

Сопоставление электрических свойств пленок, полученных из компонентов и из соединения PbTe под пылением свинца, показывают, что электропроводность и концентрация носителей имеют близкие значения. Характерным для обоих случаев является то, что образцы, содержащие больше свинца, обладают большей электропроводностью

На рис. 12 показан изменение α в пленках PbTe(Pb) при увеличении содержания избытка свинца. Как видно, из этого рисунка, увеличение ΔPb приводит к уменьшению термоэдс. Данных для пленок с $\Delta Pb < 0,2\%$ получить не удалось, т.к. при таком содержании избытка свинца пленки после извлечения из вакуумной камеры на воздух в процессе измерения переходили в p - тип.

Как показано в таблицах 2 и 3, а также на рисунках 11 и 12, дальнейшее увеличение избытка вводимых компонентов не приводит к существенным

изменениям значений α и σ . Максимальная растворимость этих компонентов в соединении PbTe составляет для свинца (Pb) $3,3 \cdot 10^{-3} \%$ и для теллура (Te) $7,6 \cdot 10^{-3} \%$; их избыточное количество выше этого предела объясняется выделением в виде второй фазы.

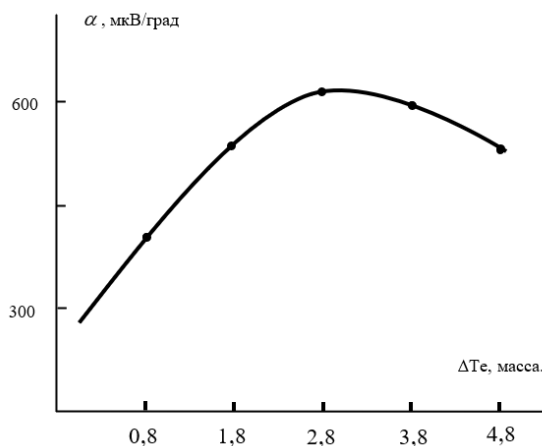


Рис.11. Изменение термо-ЭДС в поликристаллических тонких плёнках PbTe(Te) в зависимости от увеличения массовой доли теллура.

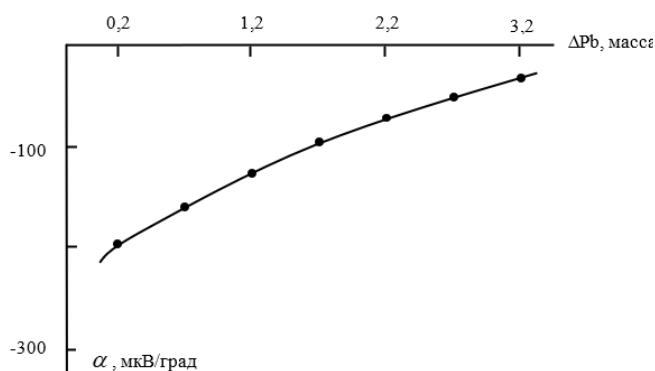


Рис. 12. Зависимость термо-ЭДС в поликристаллических тонких плёнках PbTe(Pb) от увеличения массовой доли свинца.

Экспериментальное исследование температурной зависимости электропроводности пленок показало, что $\sigma(T)$ носит активационный характер, где $\varphi_{эфф}$ будет иметь смысл энергии активации электропроводности (ΔE_a). Нами изучена зависимость энергии активации электропроводности от состава материала пленки. На рис. 13. и 14. представлены зависимости $\lg \sigma$ от $1/T$. Экспериментальные зависимости ΔE_a от состава пленок, полученные обработкой данных рис. 13. и 14, представлены в таблице 4.

Таблица 4.

Экспериментальная зависимость значения ΔE_a от состава тонкой плёнки

Избыток Te, вес. %	$\Delta E_a, \text{ эВ}$	Избыток Pb, вес. %	$\Delta E_a, \text{ эВ}$
0,8	0,085	0	0,080
1,8	0,090	0,2	0,090
2,8	0,095	1,2	0,040
3,8	0,105	2,2	0,015
4,8	0,12	3,2	-

Характер связи между электропроводностью и энергией активации, с одной стороны, и состав материала, с другой - был неоднократно проверен нами на нескольких пленках каждого состава.

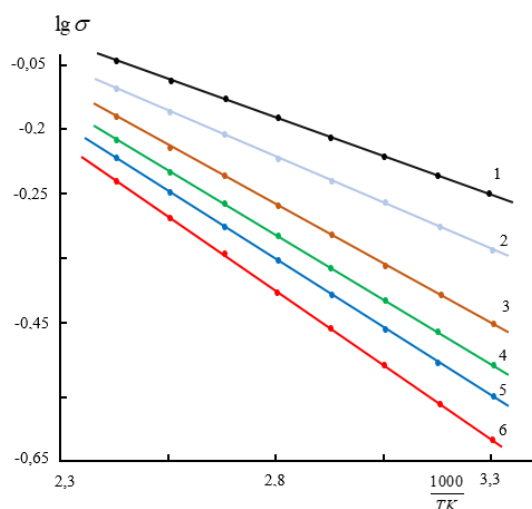


Рис.13. Температурная зависимость электропроводности тонких плёнок PbTe(Te) с повышенной массовой долей Te. вес. %: 1-0; 2-0,8; 3-1,8; 4-2,8; 5-3,8; 6-4,8

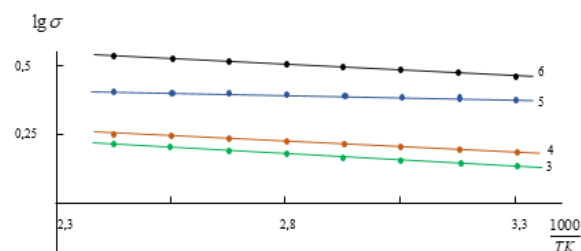


Рис.14. Температурная зависимость электропроводности тонких плёнок PbTe(Pb) с повышенной массовой долей Pb. 1,3,5 - пленки полученные испарением компонентов 2, 4, 6-испарением PbTe-Pb. ΔPb вес. %: 1,2-0,2; 3,4-1,2; 5,6-2,2

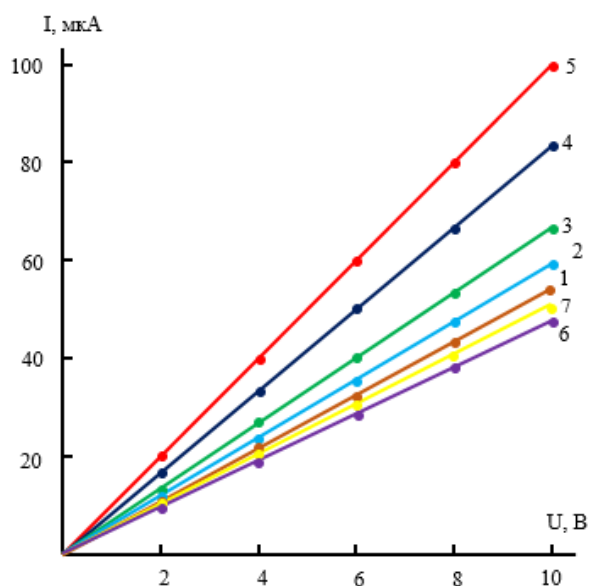


Рис.15 ВАХ пленки n-PbTe при различных уровнях одноосной деформация. 1- без деформации; 2-5- сжатие; 6,7- растяжение

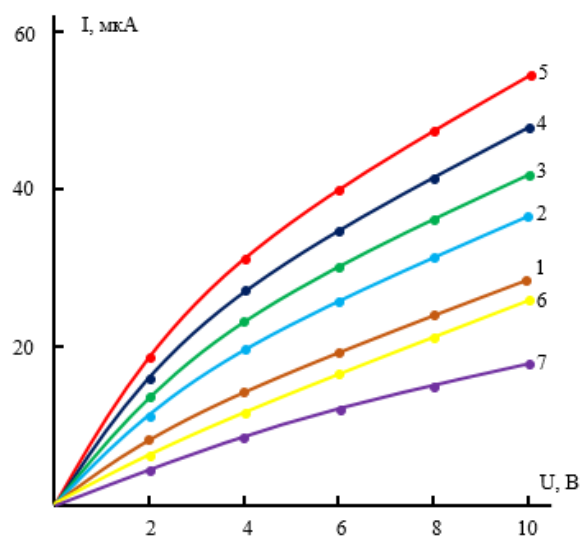


Рис.16. При увеличении массовой доли Te до 2,8% вольт - амперные характеристики тонких плёнок PbTe(Te). 1- без деформации; 2-5- сжатие; 6,7- растяжение

Активационный характер изменения σ с температурной сохраняется и после термообработки пленок на воздухе, при этом энергия активации электропроводности пленок, как с избытком свинца, так и теллура

возрастает. Вольтамперные характеристики (ВАХ) пленок позволяют в определенной степени судить о механизмах их электропроводимости.

Исследование оптических свойств полупроводников является одним из важнейших методов изучения зонной структуры, а также дает сведения о частотах оптических ветвей фононного спектра и других параметрах полупроводников. В неоднородных полупроводниках закономерности в поглощении и отражении электромагнитной волны могут дать информацию о влиянии этих неоднородностей на рассматриваемые явления, а также некоторые сведения об их составе.

Нами получены пленочные образцы PbTe как n-, так и p- типа проводимости толщиной ~ 3 мкм, и исследованы коэффициенты поглощения и отражения этих образцов в ИК области спектра при комнатной температуре.

На рисунках 19 и 20 представлены, соответственно, спектры поглощения при комнатной температуре, полученные в результате измерения прозрачности образцов тонких плёнок PbTe(Te) и PbTe(Pb) с повышенной массовой долей Te и Pb. Как видно из рисунков, спектры поглощения всех исследованных тонких плёнок имеют многополосный характер.

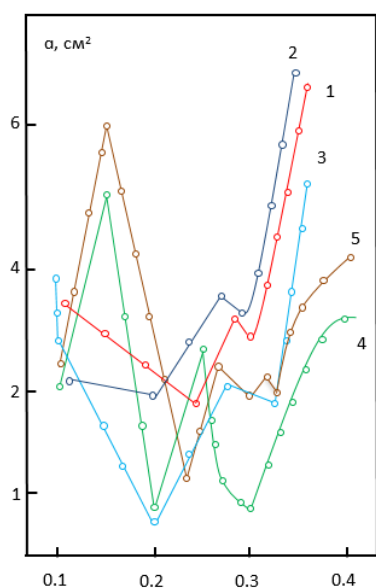


Рис.19. Спектры поглощения плёнок PbTe с избытком Te. ΔTe вес. %: 1-0; 2-0,8; 3-1,8; 4-2,8; 5-3,8.

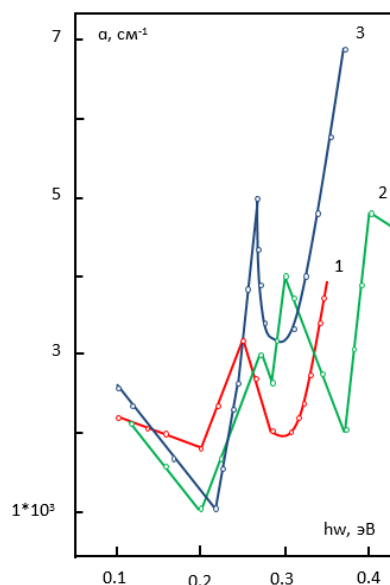


Рис.20. Спектры поглощения пленок PbTe с избытком Pb. ΔPb вес. %: 1-0,2; 2-1,2; 3-2,2.

Спектры пленок, хотя и имеют общий характер, но отличаются по положению полос поглощения. Эти полосы испытывают сдвиг по шкале ($\hbar\omega$) и небольшие изменения по интенсивностям. Обнаруженные изменения указывают на некоторые различия в структуре и составе пленок, что находится в согласии с данными изменений других свойств таких пленок.

Из рисунков видно, что при энергии $\hbar\nu \approx E_g$ наблюдается резкое возрастание поглощения, обусловленное переходом носителей между зонами. Спектральная зависимость коэффициента поглощения $\alpha(\omega)$ для прямых разрешенных переходов, происходящих с поглощением фотона дается выражением:

$$\alpha \sim (\hbar\nu = E_g)^{1/2}$$

На рисунке 21 представлены зависимости $\alpha^2(\omega)$ от $\hbar\omega$ для тонких плёнок PbTe различного состава. Видно, что экспериментальные точки хорошо аппроксимируются прямыми линиями.

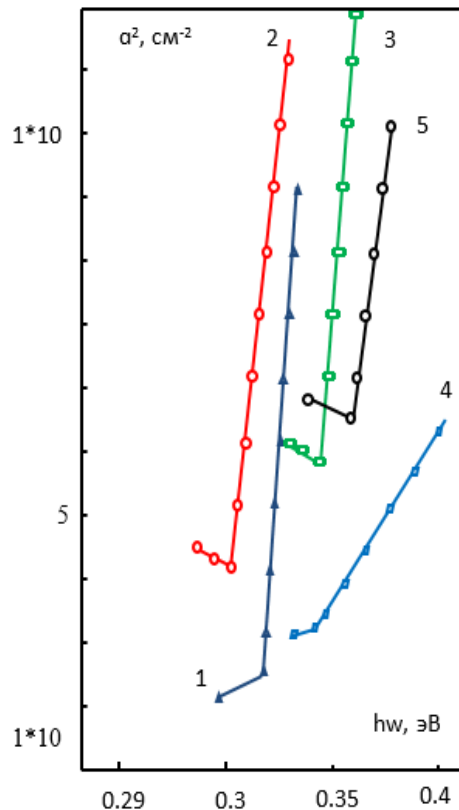


Рис.21. Зависимость $\alpha^2(\hbar\nu)$ ΔTe вес. %: 1-0; 2-0.8; 3-1.8; 4-2,8; 5-3,8.

Для поликристаллических тонких пленок PbTe(Te) с увеличенной массовой долей Te точки отсечения на оси абсцисс при экстраполяции линейных участков $\alpha^2(\nu)$ находятся в пределах 0,29–0,33 эВ в зависимости от ΔTe. В поликристаллических тонких пленках PbTe(Pb) с увеличенной массовой долей Pb на 0,2% и 0,22%, функция $\alpha^2(\nu)$ отсекает на оси абсцисс значение $\hbar\nu \approx 0,32$ эВ, что соответствует ширине оптической запрещенной зоны монокристаллов PbTe. При увеличении массовой доли Pb на 1,2 % край собственного поглощения смещается в область более коротких длин волн.

Избыток атомов свинца и теллура приводит к образованию соответствующего (не всегда совпадающего с концентрацией избыточных атомов) количества донорных или акцепторных центров. При введении в конденсат большого количества атомов примесей образуется примесная зона, которая для мелких уровней сливается с краем основной зоны. В запрещенной зоне появляется хвост функции плотности состояний.

В случае пленок PbTe с избытком свинца весом 1,2 %, как отмечалось выше (р, край собственного поглощения сдвигается в более коротковолновую область спектра. Это, видимо, можно объяснить тем, что при легировании пленок избытком свинца электронный газ в пленке частично вырождается в PbTe с избытком Pb концентрация электронов может достигать 10^{19}см^{-3}) и уровень Ферми находится в зоне проводимости. Собственное поглощение

начинается при энергии фотонов $h\nu > E_g + E_F - E_c$ (E_c - дно зоны проводимости, E_F - энергия Ферми). Так как состояние под уровнем Ферми заняты, переход носителей осуществляется на состояния с энергией больше фермиевской. Такую же ситуацию наблюдало в сильнолегированных образцах n- PbTe (эффект Бурштейна-Мосса).

В спектрах поглощения поликристаллических тонких плёнок PbTe(Te) с увеличенной массовой долей Te наблюдается полоса поглощения вблизи $h\nu \approx 0,13$ эВ. Для образцов PbTe(Te), которые являются дырочными, длинноволновая полоса, наблюдаемая в спектрах $\alpha(h\nu)$, может быть объяснена в рамках оптических переходов между неэквивалентными долинами валентной зоны PbTe, т.к. энергетический зазор между тяжелой и легкой ветвями валентной зоны PbTe равен 0,1 - 0,12 эВ ($T=300^\circ\text{K}$). С увеличением массовой доли Te в тонких плёнках интенсивность этой полосы возрастает, поскольку с ростом концентрации носителей увеличивается заполнение тяжелой подзоны.

В спектрах образцов с проводимостью p-типа при увеличении массовой доли Te на 2,8 и 3,8 % помимо указанных выше полос присутствуют дополнительные полосы с пороговой энергией $h\nu \approx 0,13$ эВ. Происхождение этих максимумов обусловлена, по-видимому, наличием свободного теллура. Как показано на спектрах поглощения теллура в области энергии $h\nu \approx 0,12$ эВ наблюдается полоса поглощения, обусловленная сложной структурой валентной зоны.

Образование свободного теллура в тонких пленках PbTe(Te) при массовой доле Te более 2,8% обусловлено выделением нерастворенных сверхстехиометрических кристаллитов Te в виде второй фазы по границам зерен.

В четвертой глава **«Исследование параметров тензорезисторов и характеристик поликристаллических пленок теллурида свинца»** приведены результаты исследования параметров тензорезисторов и деформационные характеристики поликристаллических пленок PbTe в зависимости от технологических факторов с различным содержанием избытка теллура.

Полученные пленки термообрабатывались на воздухе в течение 5 часов при 80°C . При этом происходила инверсия типа проводимости с электронного на дырочный. Сильное влияние адсорбции кислорода при термообработке наблюдалось в пленках, полученных на III этапе. Удельное сопротивление этих образцов I и II этапов в 3-5 раза. Судя при этом результатам, можно сказать, что пар PbTe содержит наибольший избыток теллура на первом этапе испарения. После выпаривание 30 - 33% навески избыток теллура в паре уменьшается до величины, свойственной условиям испарения II этапа и стабилизируется. При третьем этапе испарения содержание Te в паре убывает и появляется избыток свинца.

Для получения большой тензочувствительности достаточно испарять 80 - 85% навески. При этом в конденсате уменьшается количество материала,

образующего в пленках неактивные и шунтирующие участки и слои, обусловленные образованием металлической фазы.

Как показали эксперименты, внешний вид и структура слоев сильно зависят от температуры подложки. Поверхность слоев, напильных на предварительно не нагретых до 50°C , получались черной. Дальнейшее повышение сопровождалось переходом цвета поверхности образцов от черного к серому.

При повышении температуры от 50°C и выше меняется не только внешний вид, но и физические свойства слоев. Увеличивается электропроводность и уменьшается дифференциальная термоэдс. Тензочувствительность пленок сначала увеличивается, а потом уменьшается. Образцы, полученные в интервале $90 - 120^{\circ}\text{C}$, имеют хорошую адгезию с подложкой и обладают стабильными электромеханическими свойствами. С увеличением температуры подложки вышеуказанного интервала T_n тензочувствительность уменьшается. Это, очевидно, связано улучшением структуры пленки и уменьшением числа дефектов, ответственных за тензосвойства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Впервые определено изменение электропроводности поликристаллических тонких слоёв $\text{PbTe}(\text{Te})$ с n -типа на p -тип, при этом с увеличением массовой доли Te на 2,8 % значение термо-ЭДС увеличивается до 600 мкВ/град.

2. Впервые выявлено увеличение электропроводности и термоэлектродвужущей силы поликристаллических тонких слоёв $\text{PbTe}(\text{Te})$ с нарушенным стехиометрическим соотношением, показано что значение их электропроводности в 2-2,5 раза превышает значение электропроводности PbTe .

3. Впервые установлено, что при увеличении массовой доли Pb на 0,2 % с увеличением частоты питающего напряжения, сопротивление поликристаллических тонких слоёв $\text{PbTe}(\text{Pb})$ уменьшается, а при увеличении массовой доли Pb свыше 0,2 % - увеличивается.

4. Впервые в поликристаллических тонких Te проводимости p -типа слоях $\text{PbTe}(\text{Te})$ с увеличенной массовой долей Te на 2,8 % и 3,8 % были обнаружены дополнительные полосы в спектрах поглощения с граничной энергией $\hbar\nu \approx 0,13$ эВ и показано, что это связано со сложной структурой валентной зоны.

5. Впервые при исследовании оптических свойств поликристаллических тонких слоёв $\text{PbTe}(\text{Te})$ с увеличенной на 2,8 % массовой долей Te , в их спектрах поглощения обнаружен дополнительный уровень $\hbar\nu \approx 0,24$ эВ и показано, что это обусловлено присутствием в них кислорода.

6. Впервые установлено, что концентрация носителей заряда в поликристаллических тонких слоях PbTe увеличивается в 3-4 раза под действием деформации, а в толстых слоях в 1,5-2 раза, что связано с

воздействием потенциальных барьеров существующих в тонких слоях, определено, что это связано с резким уменьшением значения $R_x\sigma$ при воздействии деформации.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSC.03/2025.27.12.FM/T.01.06 ON THE
AWARDING ACADEMIC DEGREES AT THE INSTITUTE OF
SEMICONDUCTOR PHYSICS AND MICROELECTRONICS AT THE
NATIONAL UNIVERSITY OF UZBEKISTAN**

FERGANA STATE TECHNICAL UNIVERSITY

KHALILOV MUKHAMMADMUSO MUKHAMMADYUNUSOVICH

**STRUCTURAL, OPTICAL AND PHOTOELECTRIC PROPERTIES OF THIN
POLYCRYSTALLINE PbTe FILMS**

01.04.10 - Physics of semiconductors

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

Tashkent - 2026

The topic of the dissertation of the Doctor of Philosophy (PhD) on Physical and Mathematical sciences has been registered with the Higher Attestation Commission at the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan under registration number B2023.4.PhD/FM738.

The dissertation was completed at Fergana State Technical University.

The dissertation abstract is available in three languages (Uzbek, Russian, English (summary)) on the Scientific Council's website (www.ispm.uz) and on the "ZiyoNet" Information and Education Portal (www.ziynet.uz).

Scientific supervisor:

Otajonov Salimjon Madrakhimovich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Official opponents:

Zaynabidinov Sirajidin
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor
Academician of the UzAS

Muzafarova Sultanpasha Anvarovna
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Leading organization:

Nukus State Pedagogical Institute

The defense of the doctoral dissertation will be held on "18" "09" 2026, at 12⁰⁰ at the meeting of the Scientific Council No. DSc.03/2025.27.12.FM/T.01 06 at the Scientific Research Institute of Physics of Semiconductors and Microelectronics at the National University of Uzbekistan (Address: 20 Yangi Olmazor str., 100057 Tashkent city, Uzbekistan. Tel. (+99871) 248-79-94, fax: (+99871) 248-79-92, e-mail: info@ispm.uz)

The doctoral dissertation can be looked through in the Information Resource Center (registered under No. 81). Address: 20 Yangi Olmazor str., 100057 Tashkent city, Uzbekistan. Tel.: (+99871) 248-79-59, e-mail: info@ispm.uz.

The abstract of the dissertation was distributed on "03" "09" 2026.
(Registry record No. 81 dated "03" "09" 2026)



Sh.B. Utamuradova,
Chairwoman of the Scientific Council for
the award of scientific degrees, Doctor of Physical
and Mathematical Sciences, Professor

J.J. Khamdamov,
Scientific Secretary of the Scientific Council
for the award of scientific degrees, PhD Senior
Research Fellow

N.A. Turgunov
Chairman of the Scientific Seminar at the
Scientific Council for the Awarding of
Scientific Degree, Doctor of Physical and
Mathematical Sciences, Professor

INTRODUCTION (abstract of the PhD dissertation)

The aim of the research is to investigate the structural, optical, and piezoelectric properties of polycrystalline PbTe thin films

The objects of investigation is the compound PbTe superstoichiometric additives Pb, Te.

The scientific novelty of the research consists of the following:

growing polycrystalline films PbTe, PbTe(Te) and PbTe(Pb), with superstoichiometric composition;

study of electrical conductivity, thermoelectric power, strain sensitivity and optical properties of polycrystalline lead telluride films of stoichiometric composition and with excess components;

elucidation of the mechanism of the piezoresistive effect in polycrystalline films PbTe, PbTe(Te) and PbTe(Pb) through a comprehensive study of their electrical and optical, photoelectric properties;

study of the influence of the superstoichiometric composition of PbTe on the kinetic properties of PbTe samples.

Implementation of research results. Methods of obtaining polycrystalline PbTe thin layers with a high sensitivity coefficient were developed and used in the fundamental project F2-71 "Study of the effect of light on the current-voltage characteristics of a pn junction deformed in a very high frequency electromagnetic field". In 2017-2020, it was implemented in the departments of the Namangan Engineering Construction Institute as part of the state scientific and technical programs (Certificate No. 02/01-01-190 dated March 19, 2026, issued by the Center for Research on the Development of Higher Education of the Ministry of Higher Education, Science and Innovations of the Republic of Uzbekistan). The use of scientific results made it possible to produce samples of pressure sensors with active elements whose electrical parameters correspond to the indicator at the level of analogues.

The results of research on the structural, optical and photoelectric properties of PbTe, PbS polycrystalline thin films and the creation of devices based on them were used as highly sensitive sensors in the joint-stock company "FOTON" (Reference No. 97 dated June 11, 2025). From the scientific results, by adding components to PbTe polycrystalline layers in the Photon joint-stock production association, it was possible to determine the dielectric breakdown in the infrared and high-frequency ranges from its high-frequency properties, and to determine the shift of the absorption spectra of PbTe(Te), PbTe(Pb) layers to the short-wave range. It also made it possible to create thin-layer pressure sensors with an active element that can operate in the range of relative units from $0.33 \cdot 10^{-3}$ to $1.32 \cdot 10^{-3}$.

The structure and scope of the dissertation. The dissertation work consists of an introduction, conclusion, four chapters, a list of references. The text of the dissertation is presented on 118 pages, including 55 figure and 13 tables.

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

I bo'lim (I часть; part I)

1. Akhmedov T., Otajonov S.M., Usmonov Y., Khalilov M.M., Yunusov N., Amonov A.K. Optical properties of polycrystalline films of lead telluride with distributed stichiometry // Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing. 2021, Volume 1889, No. 2, p. 022052. (№3 Scopus, Scopus CiteScore:1.0). DOI 10.1088/1742-6596/1889/2/022052

2. Akhmedov T., Otazhonov S.M., Khalilov M.M., Yunusov N., Mamadzhonov U., Zhuraev N.M. Effective dielectric permeability and electrical conductivity of polycrystalline PbTe films with disturbed stoichiometry // Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing. 2021, December. Volume 2131, No. 5, p. 052008. (№3 Scopus, Scopus CiteScore:1.0). DOI 10.1088/1742-6596/2131/5/052008

3. Raxmonqulov M, Otajonov S.M., Khalilov M.M., Botirov Q.A, Yunusov N. Effect of group VII elements on strain sensitivity of polycrystalline films PbTe, PbS// European Science Review. 2021, № 1-2, Vienna, (№23, SJIF 2023:5.774).

https://ppublishing.org/media/uploads/journals/journal/ESR_1-2_2021.pdf

4. Отажонов С.М., Халилов М.М. Спектральный анализ поликристаллических пленок PbTe рамановским методом // Физика полупроводников и микроэлектроника. 2023, Том 5, выпуск 5. С.53-58. (01.00.00. №16). http://journal.ispm.uz/issues/vol5/issue_5.html

5. Отажонов С.М., Ахмедов Т., Усмонов Я., Халилов М.М., Ботиров К.А. Эффективное влияние температуры на электропроводность и термоэдс поликристаллических пленок n-PbTe // Физика полупроводников и микроэлектроника. 2022, Том 4, выпуск 1. С.13-20. (01.00.00. №16).

http://journal.ispm.uz/issues/vol4/issue_12.html

6. Вайткус Ю.Ю., С.М. Отажонов, Халилов М.М. Влияние избытка теллура и свинца на деформационные характеристики поликристаллических пленок PbTe // Научный вестник АндУ. Физико-математические исследования. 2021, Том 3. Выпуск 1. С.22-28. (01.00.00 №13). <https://uzjournals.edu.uz/adu/vol3/iss1/3>

II bo'lim (II часть; part II)

7. Otajonov S., Khalilov M., Juraev N., Djalilov B., Jo'raeva G., Xusanova S. Effects of the interaction of chlorine with PbTe surface and their effect kinetic parameters of strain-sensitive films // E3S Web of Conferences. 2024, Vol. 587, p. 01001. (№3 Scopus, Scopus CiteScore:1.0). DOI:10.1051/e3sconf/202458701001

8. Otajonov S.M., Akhmedov T., Usmonov Y., Khalilov M.M., Yunusov N., Mamadzhonov U.M. The effective role of temperature in improving the electrical conductivity and thermopower of n-PbTe films // *AIP Conference Proceedings*, 2024, 3045(1), 030002 (№3 Scopus, Scopus CiteScore:1.0). DOI:10.1051/e3sconf/202450801011

9. Khalilov M.M. Effects of the interaction of chlorine with PbS surface and their effect kinetic parameters of strain-sensitive films// Best journal of innovation in science, research and development. 2023, Volume 2 Issue 12 P. 229-236. <https://www.bjisrd.com/index.php/bjisrd/article/view/1093>

10. Otajonov S.M., Axmedov T., Xalilov M.M. Investigation of the frequency dependence of the resistance of PbTe films// International Journal of Advance Scientific

Research. Volume 2 Issue 12. P. 149-155. (SJIF impact factor 2023: 6.741). DOI: <https://doi.org/10.37547/ijasr-02-12-22>

11. Xalilov M.M. Effect of Heat Treatment on the Photosensitivity of Polycrystalline PbTe Films AND PbS// Al-Farg'oni avlodlari elektron ilmiy jurnali, 2023 yil, Tom 1, №4. B. 218-221. <https://cyberleninka.ru/article/n/effect-of-heat-treatment-on-the-photosensitivity-of-polycrystalline-pbte-films-and-pbs/viewer>

12. Отажонов С.М., Халилов М.М., Ботиров К.А. Стабилизация тензочувствительности поликристаллических пленок PbS под действием лазерного облучения // Наука и мир. 2020, № 8(84)-1 С 11-15. (GIF 0,325).

https://scienceph.ru/f/science_and_world_no_8_84_august_vol_i.pdf

13. Отажонов С.М., Ахмедов Т., Усмонов Я., Ботиров К.А., Халилов М.М., Юнусов Н. Влияние внутреннего напряжения на деформационные характеристики поликристаллических пленок PbTe с избытком теллура и свинца// Наука и мир. 2021. № 3 (91). С. 18-22. (GIF 0,325).

https://scienceph.ru/f/science_and_world_no_1_101_january.pdf

14. Отажонов С.М., Ботиров К.А., Халилов М.М., Юнусов Н. Влияние деформации на миграцию дефектов в фоточувствительных тонких пленках CdTe: Ag и PbTe // Наука и мир. 2021, № 6(94), С.11-16. (GIF 0,325).

https://scienceph.ru/f/science_and_world_no_10_110_october.pdf

15. Отажонов С.М., Халилов М.М., Юнусов Н., Ахмедов Т. Мамажанов.У. Разработка технологии получения поликристаллических пленок PbTe с нарушенной стехиометрией// Наука и мир. 2021, 7(95). С. 8-15. (GIF 0,325).

https://scienceph.ru/f/science_and_world_no_7_95_july.pdf

16. Отажонов С.М., Ахмедов Т., Усмонов Я., Халилов М.М., Юнусов Н., Мамаджонов У.М. Технология получения пленок теллурида свинца переменного состава/ Наука и мир. 2021, № 10 (98). Vol. II. С. 12-16. (GIF 0,325).

https://scienceph.ru/f/science_and_world_no_10_98_october_vol_i.pdf

17. Отажонов С.М., Ахмедов Т., Халилов М.М., Усмонов Я., Мамаджонов У.М. Влияние термообработки на электрофизические свойства поликристаллических пленок теллурида свинца// Наука и мир. 2022, №1(101). С. 11-15. (GIF 0,325). https://scienceph.ru/f/science_and_world_no_1_101_january.pdf

18. Отажонов С.М., Ахмедов Т., Усмонов Я., Халилов М.М., Ботиров К.А. Влияние одноосной деформации на концентрацию носителей в поликристаллических пленках PbTe// Наука и мир. 2022. № 2 (102). С 12-14. (GIF 0,325). https://scienceph.ru/f/science_and_world_no_2_102_february.pdf

19. С.М. Отажонов, Ахмедов Т., Халилов М.М. Влияние температуры на тензосвойства поликристаллических пленок теллурида свинца// Наука и мир. 2022, № 7 (107). С 13-15. https://scienceph.ru/f/science_and_world_no_7_107_july.pdf

20. Халилов М.М. Влияние условий получения на электрофизические параметры пленок теллурида свинца// Наука и мир. 2023, № 1 (113) ст. 28-31. (GIF 0,325). https://scienceph.ru/f/science_and_world_no_1_113_january.pdf

21. Отажонов С.М., Ахмедов Т., Усмонов Я., Ботиров К.А., Халилов М.М. Улучшение физических свойств тензочувствительных пленок PbS под действием лазерного облучения// Наука и мир. 2023, № 4 (116) С. 20-24. (GIF 0,325).

https://scienceph.ru/f/science_and_world_no_4_116_april.pdf

22. Бойбобоев Р., Отажонов С.М., Халилов М.М., Юнусов Н., Мамаджонов У. Влияние хлора на тензосвойства тонких пленок сульфида свинца// I International Scientific and Practical Conference. March 19-20.2021 Franch Orlean.

DOI.10.51582/interconf.19-20.03.2021.032 С.329-334.

23. Ботиров К., Отажонов С.М., Халилов М.М., Юнусов Н. Спектры поглощения поликристаллических пленок PbTe с избытком теллура // I International Scientific and Practical Conference. February 19-20.2021 Rome.Italy.

DOI 10.51582/interconf.19-20.02.2021.095 С.954-962.

24 Отажонов С.М., Халилов М.М. Влияние деформации на вольтамперные характеристики пленок PbTe// II - Международная научная конференция «Современные тенденции развития физики полупроводников: достижения, проблемы и перспективы» Ташкент, 2022 г., 27-28 декабрь, стр.146-148.

25. Ахмедов Т., Отажонов С.М., Усмонов Я., Халилов М.М., Юнусов Н. Изменение спектров поглощения поликристаллических тонких пленок PbTe с избытком теллура и свинца // Международной научной конференции “Тенденции развития физики конденсированных сред”. Фергана, 25 май, 2021 год. Стр.146-150

26. Отажонов С.М., Халилов М.М., Юнусов Н., Ахмедова Н., Холикназарова З. Электрические свойства тензочувствительных пленок PbS под действием лазерного облучения // Материалы международной конференции «Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниковых микро- и наноструктурах» Ферганский политехнический институт 13-14 ноября 2020 года. Стр 404-408.

27. Отажонов С.М., Халилов М.М. Деформационные эффекты в халькогенидная свинца и в пленках на их основе // Международная научно-техническая конференция «Практическое применение технических и цифровых технологий и их инновационных решений», Фергана, 4 мая 2023 г, стр. 615-619.

28. Отажонов С.М., Ахмедов Т., Усмонов Я. Халилов М.М., Механизмы спектрального анализа поликристаллических пленок PbTe по методу романовский и электроанографический анализ // O‘zbekiston milliy universiteti huzuridagi yarimo‘tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti O‘zbekiston fizik-talabalari va yosh olimlar assotsiatsiyasi yosh olimlar va fizik talabalarning IV respublika ilmiy anjumani (YoOFTRIA-IV) materiallari, Toshkent 2024 yil, 25 may, b. 32-39.

29. Отажонов С.М., Ахмедов Т., Халилов М.М. Влияние условий получения на электрофизические параметры пленок теллурида свинца // Научно-исследовательский институт физики полупроводников и микроэлектроники при национальном университете Узбекистана III Международной конференции «Современные тенденции развития физики полупроводников: достижения, проблемы и перспективы» Ташкент, 2024 г., 26-27 сентбрь ст. 60-63.

EHM uchun yaratilgan dastur guvoxnomasi

30. Otajonov S.M, Nosirov M.A., Sobirova K.A, Mamirxojayev M.M, Umaraliyev J.T. Polikristalli PbTe plyonkalarining samarali dielektrik o‘tkazuvchanligini va elektr o‘tkazuvchanligini tekshiruvchi dastur // O‘zbekiston Respublikasi adliya vazirligi № DGU 17185 O‘zbekiston Respublikasining Dasturiy mahsulotlar davlat reestrída 29.06.2022 y. ro‘yxatdan o‘tkazilgan.

31. Otajonov S.M., Botirov Q.A, Ergashev Sh.U, Mamadjonov U.M. Effective dielectric permeability and electrical conductivity of polycrystalline PbTe films with disturbed stoichiometry // O‘zbekiston Respublikasi adliya vazirligi huzuridagi intellektual mulk agentligi № DGU 16562 O‘zbekiston Respublikasining Dasturiy mahsulotlar davlat reestrída 31.05.2022 y. ro‘yxatdan o‘tkazilgan.

Avtoreferat “Til va adabiyot ta’limi” – “Преподавание языка и литературы” – “Language and literature teaching” ilmiy-metodik jurnali tahririyatida tahrirdan o‘tkazilib, o‘zbek, rus va ingliz tillaridagi matnlar o‘zaro muvofiqlashtirildi.
(25.08.2026).

Bichim 60x841/16. Raqamli bosma usuli. Times garniturası.
Shartli bosma tabog‘i: 3,5. Adadi 70. Buyurtma № 66.
Guvohnoma reestr № 10-4434
Yarimo‘tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika
ilmiy-tadqiqot instituti bosmaxonasida chop etilgan.
Bosmaxona manzili: 100057, Toshkent sh.,
Yangi Olmazor ko‘chasi, 20-uy

