

**FARG‘ONA POLITEXNIKA INSTITUTI HUZURIDAGI FIZIKA-
MATEMATIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI ILMIY
DARAJASINI BERUVCHI PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 RAQAMLI ILMIY
KENGASH**

FARG‘ONA POLITEXNIKA INSTITUTI

MIRZAYEV VALIJON TULQINOVICH

***CdSe_xS_{1-x}* VA *CdTe:In* ASOSIDAGI POLIKRISTALL
PLYONKALARNING FOTOELEKTRIK VA FOTOVOLTAIK
XOSSALARIGA IONLAR TERMO-MAYDON MIGRATSIYASINING
TA‘SIRI**

01.04.07 – Kondensirlangan holat fizikasi

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

Farg‘ona – 2025

UDK: 621.315.592.3

**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**

Mirzayev Valijon Tulqinovich

CdSe_xS_{1-x} va *CdTe:In* asosidagi polikristall plyonkalarining fotoelektrik va
fotovol'taik xossalariga ionlar termo-maydon migratsiyasining ta'siri.....3

Мирзаев Валижон Тулкинович

Влияние термополевой миграции ионов на фотоэлектрические и
фотовольтаические свойства поликристаллических пленок *CdSe_xS_{1-x}* и
CdTe:In.....26

Mirzaev Valijon Tulqinovich

The influence of thermal field migration of ions on photoelectric and photovoltaic
properties of polycrystalline films *CdSe_xS_{1-x}* and *CdTe:In*..... 50

E'lon qilingan ishlar ro'yhati

Список опубликованных работ

List of published works.....54

**FARG‘ONA POLITEKNIKA INSTITUTI HUZURIDAGI FIZIKA-
MATEMATIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI ILMIY
DARAJASINI BERUVCHI PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 RAQAMLI ILMIY
KENGASH**

FARG‘ONA POLITEKNIKA INSTITUTI

MIRZAYEV VALIJON TULQINOVICH

***CdSe_xS_{1-x}* VA *CdTe:In* ASOSIDAGI POLIKRISTALL
PLYONKALARNING FOTOELEKTRIK VA FOTOVOLTAIK
XOSSALARIGA IONLAR TERMO-MAYDON MIGRATSIYASINING
TA‘SIRI**

01.04.07 – Kondensirlangan holat fizikasi

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

Farg‘ona – 2025 yil

Falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O‘zbekiston Respublikasi Oliy ta’lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2024.4.PhD/FM1199 raqam bilan ro‘yxatga olingan.

Dissertatsiya Farg‘ona politexnika institutida bajarilgan.

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

Ilmiy rahbar: **Yuldashev Nosirjon Xaydarovich**
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Rasmiy opponentlar: **Kuchkarov Qudratillo Mamarasulovich**
fizika-matematika fanlari doktori

Sobirov Maxmud Mamarasulovich
fizika-matematika fanlari nomzodi, dotsent

Yetakchi tashkilot: **Namangan muhandislik-texnologiya instituti**

Dissertatsiyaning himoyasi Farg‘ona politexnika instituti huzuridagi falsafa doktori ilmiy darajasini beruvchi PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 raqamli Ilmiy kengashning 2025 yil «__»__ soat __ dagi majlisida bo‘lib o‘tadi. (Manzil: 150107, Farg‘ona sh. Farg‘ona k. 86 uy. Tel: (+99873) 241-12-06, faks (+99873) 241-12-06, e-mail: uzferfizika@mail.ru, kichik majlislar zali).

Dissertatsiya bilan Farg‘ona politexnika institutning axborot–resurs markazi ilmiy-uslubiy bo‘limida tanishish mumkin. (__ raqami bilan ro‘yxatga olingan). (Manzil: 150107, Farg‘ona sh. Farg‘ona k. 86 uy. Tel: (+99891) 328-32-69).

Dissertatsiya avtoreferati 2025 yil «__» _____ kuni tarqatildi.

(2025 yil «__» _____ dagi _____

raqamli reestr bayonnomasi).

N.A. Sultanov

Falsafa doktori ilmiy darajasini beruvchi Ilmiy Kengash raisi o‘rinbosari, f-m.f PhD, dotsent.

B.J. Axmadaliyev

Falsafa doktori ilmiy darajasini beruvchi Ilmiy Kengash ilmiy kotibi, f-m.f PhD, dotsent

S.M Otajonov

Falsafa doktori ilmiy darajasini beruvchi Ilmiy Kengash qoshidagi ilmiy seminar raisi, f-m.f.d., professor.

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasining annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zaruriyati. Jahonda kondensirlangan muhit fizikasi sohasidagi olimlar A_2B_6 yarim o'tkazgich birikmalari asosida mikro va nano materiallar olish texnologiyasini rivojlantirishga va ularning yangi fizik xususiyatlarini o'rganishga katta e'tibor qaratmoqdalar. Bugungi kunda kadmiy xalkogenidlarining qattiq eritmalari va geterostrukturlari asosida arzon narxdagi yorug'lik nurlatuvchi diodlar (LED), foto qabul qilgichlar, yaxshilangan optik va fotoelektrik xususiyatlarga ega fotolyuminaforlar keng qo'llanilmoqda. $CdS_xCdSe_yCdTe_z$ birikmalari asosida yupqa plyonkali quyosh batareyalari va fotoo'zgartirgichlar samaradorligini oshirish alohida qiziqish uyg'otmoqda. Fotosezgir nuqtaviy markazlar va donalararo chegaralar haqida yagona tasavvurlarga asoslangan anomal yuqori fotoo'tkazuvchanlik va fotovoltaiik xususiyatlarga ega yupqa polikristall plyonkalar va strukturalardagi fotoelektrik hodisalarni o'rganishga yangicha yondashuv fundamental ahamiyatga ega. Bu jihatdan $CdSe_xS_{1-x}$ qattiq qorishmalar va legirlangan $CdTe:In$ turdagi plyonkali strukturalar olishning yangi texnologiyalarini ishlab chiqish va yangi fotoelektrik effektlarni o'rganish, ularning istiqbolli funktsional imkoniyatlarini aniqlashga katta e'tibor qaratilmoqda.

Jahonda rivojlangan mamlakatlar ilmiy laboratoriyalarida o'stirish sharoitlariga kuchli bog'liq bo'lgan yarim o'tkazgich polikristall plyonkalardagi yangi strukturaviy sezgirlik va fotoelektrik xususiyatlarini aniqlash masalalarida ilmiy tadqiqotlar olib borilmoqda. Shu sababli mikroelektronika sohasida $CdSe_xS_{1-x}$ qattiq qorishmasi asosida fotorezistiv polikristall plyonkali struktura olish texnologiyasini ishlab chiqish va fotoelektrik xususiyatlarini oshirish kinetikasini o'rganish; legirlangan $CdTe:In$ plyonkalarini olish texnologiyasini takomillashtirish orqali yaratilgan fotorezistiv va anomal fotovoltaiik xususiyatli plyonkalarni zamonaviy elektronikaning faol elementlari sifatida ishlatish vazifalari bo'yicha fundamental tadqiqotlar olib borish dolzarb vazifalardan hisoblanadi.

Mamlakatimizda yarim o'tkazgich materiallar fizikasi sohasida, xususan, yangi texnologiyalarni ishlab chiqish va ularning fundamental fizik xususiyatlarini tavsiflash usullarini ishlab chiqish bo'yicha keng ko'lamlı tadbirlar amalga oshirilmoqda. 2022-2026 yillarga mo'ljallangan "Yangi O'zbekiston" taraqqiyot strategiyasida "... iqtisodiyotni elektr energiyasi bilan uzluksiz ta'minlash, "Yashil iqtisodiyot" texnologiyalarini hayotning barcha sohalariga faol joriy etish, energiya samaradorligini oshirish..."¹ kabi dolzarb vazifalar qo'yilgan. Qo'yilgan vazifalarni bajarish uchun quyosh energiyasi asosida yangi ishlab chiqarish korxonalarini qurish, shuningdek, yangi optoelektron qurilmalarni ishlab chiqish uchun zarur bo'lgan noyob elektrofizik xususiyatlarga ega kadmiy xalkogenidlarining qattiq

¹ O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi № UP-60 "2022-2026 yillarda "Yangi O'zbekiston" taraqqiyot strategiyasi to'g'risida"gi Farmoni.

qorishmalaridan iborat yangi yarim o'tkazgich materiallarni yaratish katta ilmiy ahamiyatga ega.

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi № UP-60 "2022-2026 yillarda "Yangi O'zbekiston" taraqqiyot strategiyasi to'g'risida"gi Farmoni, 2021-yil 19-martdagi № PP-5032 "Fizika sohasida ta'lim sifatini oshirish va ilmiy tadqiqotlarni takomillashtirish chora-tadbirlari to'g'risida"gi Prezident qarori va 2020-yil 23-iyuldagi № 452 "Qayta tiklanadigan energiya manbalari o'rnatish va ular tomonidan ishlab chiqariladigan energiyani davlat hisobiga olishni amalga oshirish chora-tadbirlari to'g'risida"gi Vazirlar Mahkamasi qarorida, shuningdek, ushbu sohada qabul qilingan shunga o'xshash normativ-huquqiy hujjatlarda bayon etilgan vazifalarni amalga oshirishda ushbu dissertatsiya ishi muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning Respublikada fan va texnologiyalarni rivojlantirishning ustuvor yo'nalishlariga mos kelishi. Ushbu dissertatsiya O'zbekiston Respublikasi fan va texnologiyalarni rivojlantirishning ustuvor yo'nalishi PPI-3 "Energiya, energiya va resurslarni tejash, transport, mashinasozlik va asbobsozlik, zamonaviy elektronika, mikroelektronika, fotonika va elektron asbobsozlikni rivojlantirish"ga muvofiq bajarilgan.

Muammoning o'rganilganlik darajasi. Ko'plab xorijiy ilmiy markazlarda *CdS*, *CdSe*, *CdTe* asosidagi plyonka tuzilmalarining elektr o'tkazuvchanlik, fotoo'tkazuvchanlik mexanizmlari, optik spektrlari va *CdTe* plyonkalarining fotovoltaik xususiyatlari batafsil o'rganilgan, ular optoelektronikada amaliy qo'llanilmoqda. Bunday ilmiy markazlar qatoriga Rossiya Fanlar Akademiyasining Lebedev nomidagi Fizika instituti va Ioffe nomidagi Fizika-texnika instituti, Ukraina Milliy Fanlar Akademiyasi Yarim o'tkazgichlar fizikasi instituti, AQShning Delaver universiteti, Yaponiya Milliy fanlar uyushmasining materialshunoslik instituti, V. Kapsukas nomidagi Vilnyus universiteti va boshqalarni kiritish mumkin. Hozirgi kunda kadmiy xalkogenidlaridan tayyorlangan polikristall plyonkalarining yuqori fotosezgirliги o'ziga xos chuqur sathli hajmiy lokal markazlarning mavjudligi va kristal donlar chegaraviy sohasidagi maxsus elektron xususiyatlar bilan bog'liqligi hamda ularni ishlab chiqarish texnologiyasiga qarab sezilarli darajada o'zgarishi ko'rsatilgan.

Fotovoltaik plenkalarni tayyorlash texnologiyasi va ularning asosiy fizik xususiyatlarini o'rganish bo'yicha O'zbekistonning mashhur olimlari faol ish olib borgan. Saidov M.S., Mamadolimov A.T., Mirsagatov Sh.A., Razikov T.M., Sultonov N.A., Karimov M.A. va boshqalar tomonidan olib borilgan eksperimental ishlarda kadmiy xalkogenidlari yupqa plyonka strukturalarining fotoelektrik xususiyatlari va tok o'tish mexanizmlari o'rganilgan. E.A. Adirovich va uning shogirdlari, jumladan T.Mirzaxamudov, Yu.M. Yuabov, Farg'ona fiziklari E.I. Bilyalov, A.Ya. Afuzov, N.X.Yuldashevlarning original ishlarida kadmiy xalkogenidlari asosida yupqa plyonka texnologiyalari ishlab chiqilgan va ulardagi anomal fotovoltaik effektlarining fenomenologik nazariyasi qurilgan.

Ilgari CdS va $CdSe$ larning bir qator polikristall namunalarda anomal elektr o'tkazuvchanlik - ma'lum harorat oralig'ida qorong'ilikdagi tokning keskin kamayib ketishi kuzatilgan. Biroq bu effektning tabiati va uning mexanizmi haqida yakuniy to'liq tasavvur hozirgacha mavjud emas. $CdSe_xS_{1-x}$ qattiq qorishmalarning o'tkazuvchanlik mexanizmi temperatura va infraqizil nurlanish ta'sirda kompleks tadqiq qilinmagan. Shuningdek, anomal fotosezgir $CdSe_xS_{1-x}$ va fotovoltaik $CdTe:In$ polikristall plyonkalarining xususiyatlarining shakllanishida kristal don chegaralari va sezgirlik orttiruvchi r - va s - markazlar termo-maydon migratsiyasining roli tekshirilmagan.

Dissertatsiya mavzusining dissertatsiya bajarilgan ilmiy tadqiqot muassasasi ilmiy tadqiqot ishlari bilan bog'liqligi. Dissertatsiya ishi Farg'ona politexnika institutida, xususan, institutning 2020-2025 yillarga mo'ljallangan istiqbolli ilmiy rejasida "Kadmiy xalkogenid birikmalarining yarim o'tkazgichli yupqa plyonkali tuzilmalarida yangi fotoelektrik va fotovoltaik hodisalar va mikroelektron fotokoo'zgartirgichlar ishlab chiqish" mavzusida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi $CdSe_xS_{1-x}$ qattiq qorishmalar va legirlangan $CdTe:In$ asosidagi yupqa plyonkali strukturalarini vakuumda termik bug'latish usuli bilan olishning optimal texnologik rejimlarini va ulardagi yangi fundamental fotoelektrik xususiyatlarni o'rnatishdan iborat.

Tadqiqot vazifalari:

fotorezistiv $CdSe_xS_{1-x}$ va fotovoltaik $CdTe:In$ polikristall plyonkali strukturalarni olish texnologiyalarini takomillashtirish;

$CdSe_xS_{1-x}$ va $CdTe:In$ polikristall plyonkalarining anomal fotoo'tkazuvchanlik va fotovol'taik xususiyatlarini termik oshirish kinetikasini tadqiq etish;

optimal ravishda sezgirligi orttirilgan $CdSe_xS_{1-x}$ polikristall plyonkalarining foto va qorong'ilikdagi o'tkazuvchanligining haroratli va infraqizil so'nishi;

$CdSe_xS_{1-x}$ polikristall plyonkalarining lyuks-amper xarakteristikasida kristal don chegaralari va sezgirlik orttiruvchi r - va s - markazlarining rolini aniqlash;

$CdTe:In$ plyonkasining AFV xususiyatlarini shakllantirishda indiy ionlari va kadmiy vakansiyalari termo-maydon migratsiyasining o'ziga xos xususiyatini o'rnatish.

Tadqiqot ob'ekti sifatida standart shisha yuzasiga termovakuum bug'latish usuli bilan olingan $CdSe_xS_{1-x}$ va $CdTe:In$ polikristalli plyonkalari tanlandi.

Tadqiqot predmeti $CdSe_xS_{1-x}$ va $CdTe:In$ plyonkalarini olish texnologik jarayonlari, shuningdek ularda sodir bo'ladigan elektrofizik, fotoelektrik va fotovoltaik hodisalaridir.

Tadqiqot usullari. Ishni bajarishda xalqaro standartga mos bo'lgan, vakuumda termik bug'latish usuli, rentgen nurlari diffraksiya usuli hamda qattiq jismlar fizikasidagi zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasi va harakatchanligini o'lchashning Xoll usuli hamda volt-amper, lyuks-amper, lyuks-volt va spektral xususiyatlarini tahlil qilish usullaridan foydalanilgan.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

$T_t=250-350$ °C haroratda shisha taglik ustida termik bug‘latish tezligini va qalinlikni boshqarish bilan o‘stirish hamda maxsus termik ishlov berish orqali fotorezistiv $CdSe_xS_{1-x}$ va fotovoltaiik $CdTe:In$ polikristall plyonkalar olish texnologiyalarining optimal rejimlari aniqlangan;

birinchi marta $CdSe_xS_{1-x}$ fotorezistorlar LAX ining boshlang‘ich qismida mikropotensial to‘siqlarga bog‘liq yangi soha kuzatildi va u kristall donlar chegarasidagi sirt holatlarining kvazineytral hajmdagi va fazoviy zaryad sohasidagi generatsiya-rekombinatsiya jarayonlariga ta'siri orqali ekanligi ko‘rstilgan;

$CdSe_xS_{1-x}$ polikristall plyonkalarining qorong‘ulikdagi elektr o‘tkazuvchanligining haroratli va infraqizil nurlanish ta’sirida so‘nish effektlari topildi hamda ular termo-maydon migratsiyasi tufayli hosil bo‘lgan bir va ikki zaryadli kadmiy vakansiyalarini zaryadli holatlarining o‘zgarishi bilan bog‘liqligi aniqlangan;

indiy bilan legirlangan $CdTe$ plyonkalarga termik ishlov berish jarayonida indiy ionlari, kadmiy vakansiyalarining termo-maydon migratsiyasi va o‘z-o‘zini kompensatsilash effektlari tufayli namunaning fotovol’taik xususiyatlari keskin kuchayishi, fotokuchlanishning termik ishlov kinetikasini tahlil qilish orqali aniqlangan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagidan iborat:

fotorezistiv $CdSe_xS_{1-x}$ va fotovoltaiik $CdTe:In$ polikristall plyonkali strukturalarini termovakuum bug‘latish usuli bilan olishning optimal texnologik rejimlari yaratilgan.

arzon va samarali fotoo‘zgartirgichlarga qo‘yiladigan talablarga javob beradigan $CdSe_xS_{1-x}$ va $CdTe:In$ yupqa plyonkalarining fotoelektrik va fotovoltaiik parametrlarini maqsadli boshqarish usullari aniqlangan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi Zamonaviy qattiq jismlar fizikasi o‘lchov va tahlil usullaridan foydalanish, olingan ilmiy natijalarni etakchi jurnallarda e’lon qilingan boshqa mualliflarning ishlari natijalariga mos kelishi, olingan eksperimental natijalarning mavjud nazariy ma’lumotlarga zid kelmasligi va tasdiqlangan fizik modellar doirasida izohlab berilishi bilan asoslanadi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.

Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati shundan iboratki, qattiq qorishmali $CdSe_xS_{1-x}$ va legirlangan $CdTe:In$ plyonkalarida birinchi marta eksperimental ravishda aniqlangan "muvozanatli o‘tkazuvchanlikining harorat va infraqizil nurlanish bilan so‘nishi" va "ionlar termo-maydon migratsiyasi hisobiga AFV xususiyatlarni kuchaytirishtirish" effektlari qattiq jismlar fizikasining fotoelektrik va fotovoltaiik hodisalar haqidagi tushunchalarni kengaytiradi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati shundaki, qattiq qorishmali $CdSe_xS_{1-x}$ va legirlangan $CdTe:In$ plyonkalari asosida fotosezgir va fotovoltaiik plyonkalar olishning ishlab chiqilgan usullaridan, arzon optoelektron qurilmalar vidikonlar, integral ko‘p elementli fotoqabul qilgichlar va fototranzistorlarni yaratishda qo‘llash mumkin.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Yupqa qatlamli polikristall $CdSe_xS_{1-x}$ va $CdTe:In$ strukturalarning olish texnologiyasini ishlab chiqish hamda fotoelektrik va fotovoltaik xossalarga termo-maydon migratsiyasining ta'sirini o'rganish bo'yicha olingan ilmiy natijalar asosida:

polikristal $CdSe_xS_{1-x}$ yupqa qatlamlarining fotoelektrik xossalarini va $CdTe:In$ kristall donlarining chiziqli davriy assimetrik strukturalarida yuqori kuchlanishli foto-EYKni tadqiqot usullari OT-F2-70 «Katta ma'lumotlarga asoslangan intellektual (AI) qayta tiklanadigan energiya tarmoq tizimini tadqiq qilish va qo'llash» ilmiy loyihani bajarishda qo'llanilgan (loyiha rahbari: f.-m.f.f.d., dots. S.Aliyev, Andijon mashinasozlik institutining 2024-yil 22 noyabrda 38-03-2358-sonli ma'lumotnomasi). Ilmiy natijalardan foydalanish yorug'likning xususiy va kirishmali yutilishida kuchli legirlangan yarimo'tkazgichli strukturalarda elektron kinetik hodisalarning fizik mexanizmlarini tahlil qilish imkoniyatini bergan;

fotorezistiv $CdSe_xS_{1-x}$ polikristall plyonkali strukturalarini termovakuum bug'latish usuli bilan olishning optimal texnologik rejimlarini o'rnatish va fotosezgirlikni orttirish jarayonlarining kinetikasini o'rganish natijalaridan Davlat ilmiy dasturlari doirasida 2022-2024 yillarda "Zenit" shifrlı (yopiq) amaliy loyihani bajarishda (O'zbekiston Respublikasi Mudofaa vazirligi Axborot-kommunikatsiya texnologiyalari va aloqa harbiy instituti, 2025-yil 9-yanvardagi 57-son ma'lumotnomasi) foydalanilgan. Ilmiy natijalardan foydalanish Zirhli texnikaning anologli boshqarish tizimini raqamlashtirishda deformatsiya va yorug'likning ta'sirlarini o'rganish bo'yicha olingan nazariy va eksperimental ma'lumotlarni ma'lum darajada tahlil qilish imkonini bergan.

Tadqiqot natijalari aprotatsiyasi. Dissertatsiyaning asosiy natijalari 7 ta xalqaro ilmiy-amaliy anjumanlarida ma'ruza qilindi va muhokamadan o'tdi.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi. Dissertatsiya mavzusi bo'yicha jami 13 ta ilmiy ish chop etilgan, bulardan 3 tasi O'zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasining falsafa doktorlik dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy jurnallarda, 1 tasi Scopus bazasida indekslangan konferensiyada, 2 tasi yuqori Impact Factorga ega xalqaro ilmiy jurnallarda, 8 tasi Respublikamizda o'tkazilgan Xalqaro konferensiyalar va 1 tasi xorijiy konferensiya materiallarida chop etilgan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya kirish, 4 ta bob, xulosa, 130 ta foydalanilgan adabiyotlar ro'yxatini o'z ichiga olgan bo'lib, uning hajmi 113 betni tashkil etadi.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Kirish qismida dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zaruriyati qisqacha asoslab berilgan, tadqiqotlar O'zbekiston Respublikasida fan va texnologiyalarni rivojlantirishning asosiy ustuvor yo'nalishlari bilan bog'liqligi aniqlandi, dissertatsiya mavzusiga oid ilmiy ishlar va muammoning o'rganilganligi darajasi bo'yicha qisqacha sharh berildi, maqsad va vazifalar shakllantirildi, tadqiqot

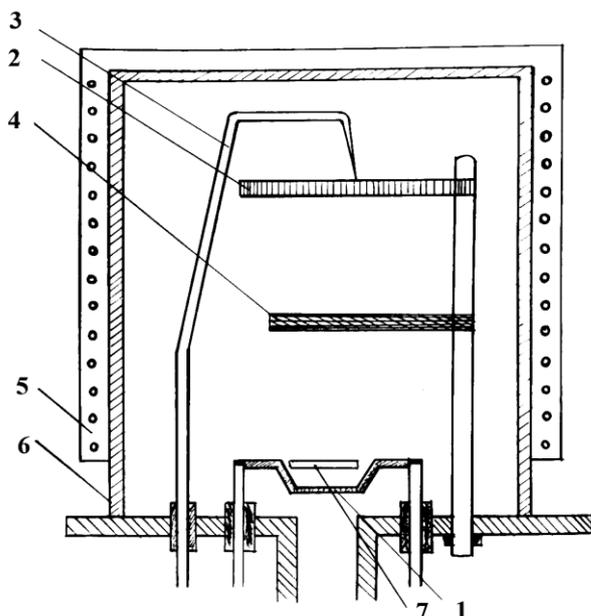
ob'ekti, predmeti va usullari aniqlandi, tadqiqotning ilmiy yangiligi bayon etildi, olingan natijalar ishonchliligi asoslandi, ularning nazariy va amaliy ahamiyati ochib berildi, natijalarni joriy etish va aprobatsiyasi to'g'risida ma'lumotlar keltirildi.

Birinchi bobda "Kadmiy xalkogenidlari asosidagi plyonkalarining fotoo'tkazuvchanligi va fotovoltaik xususiyatlari bo'yicha tadqiqotlarning hozirgi holati" deb nomlangan bobda $CdSe$, CdS dan fotosezuvchan plyonkalarni ishlab chiqarish va ularni o'rganish texnologiyasi bo'yicha ishlarning qisqacha sharhi va $CdTe$ fotovoltaik plyonkalari haqida mavjud adabiyotlarni tahlil qilish natijalari keltiriladi. Ular asosida yupqa polikristalli plyonkalarni olish texnologiyasi, xususiyatlarini o'rganish masalalari ko'rib chiqiladi. Ma'lum elektr o'tkazuvchanlik mexanizmlari, fotoo'tkazuvchanlikning xarakterli xususiyatlari va plyonka tuzilmalarining fotovoltaik xususiyatlari ko'rib chiqildi. Ma'lum natijalarni tanqidiy tahlil qilish asosida dissertatsiyaning maqsad va vazifalari shakllantirildi.

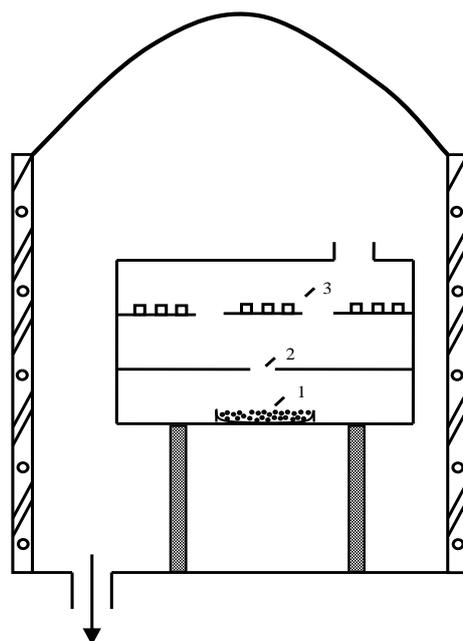
Ikkinchi bobda " $CdSe_xS_{1-x}$ va $CdTe:In$ plyonkalarini olish texnologiyasi va ularni o'rganish usullarini ishlab chiqish" deb nomlangan bobda fotosezuvchan plyonkalarni olish texnologiyasi masalalari ko'rib chiqiladi. $CdSe$, $CdSe_xS_{1-x}$ dan fotosezgir plyonka olish usuli, yangi tayyorlangan plyonkani kvaziberk kamerada, havoda $CdCl_2$ yoki $CuCl_2$ ishtirokida TIB usuli ishlab chiqilgan bo'lib, u sezgirlikni oshiruvchi moddalarning bir tekis diffuziyalanishini ta'minlaydi. Bundan tashqari, $CdTe:In$ plyonkalarini indiy bilan legirlashning o'ziga xos xususiyatlari va uning fotovoltaik xususiyatlarini sezgirlash kinetikasi bayon qilingan.

$CdSe_xS_{1-x}$ plyonkalarini olish uchun VUP-5M nomli avtomatik boshqaruvli vakuum qurilmasi va "VAKMA" 2NVR-5 DM turdagi forvakuum nasosi $\sim 10^{-4}$ mm.sim.us. bosimni ta'minlaydigan "VAKMA" NVDM-160 bug'-moy diffuziya nasosi asosida vakuum qurilmasi yig'ilgan. (1.a. Rasm). Bug'lantirgich sifatida alyuminiy oksidi yoki berilliydan tayyorlangan tigellar, taglik sifatida esa shaffof kontaktli shisha va slyuda ishlatilgan.

Tagliklar va bug'lantirgichning harorati ularga to'g'ridan-to'g'ri o'rnatilgan xrom-alyumel termojuftlari yordamida nazorat qilindi. $\sim 10^{-4}$ mm.sim.us vakuumga erishilgandan so'ng, tagliklarni 30 daqiqa davomida $T=573$ K haroratda qizdirib, gabsizlantirish amalga oshirildi. $CdSe_xS_{1-x}$ plyonkalari "yarim o'tkazgich" toifasiga kiradigan $CdSe$ va CdS aralashmasini turli nisbatlarda bug'lantirish orqali olindi. Plyonkaning fotosezgirlikni oshirish uchun ular havoda, vakuumda va $CdCl_2$ yoki $CuCl_2$ bug'lari bo'lgan gazli muhitlarda termik ishlov berildi. Yangi tayyorlangan plyonkalarni termik ishlov berish (TIB) ikki qismdan iborat maxsus konstruksiyali pechda amalga oshirildi (1.b. Rasm). $400-500$ °C haroratda sezgirlashtiruvchi moddalar bug'larining zarur qisman bosimini ta'minlaydigan kamera hajmi optimal ravishda tanlandi.

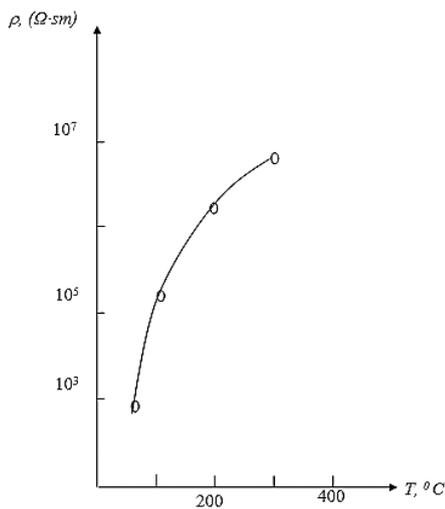


1.a. Rasm. $CdSe$ plyonkalarini olish uchun vakuum kamerasing sxematik ko'rinishi, $CdSe_xS_{1-x}$ 1-tigel (bug'latgich); 2-taglik ushlagichi; 3-termojuftlik; 4-to'sqich; 5-pechka; 6-kvarts qopqog'; 7-modda materiali.



1.b. Rasm. $CdSe$, $CdSe_xS_{1-x}$ plyonkalarini sezgirligini orttirish kamerasing sxematik ko'rinishi. 1-tigellar; 2- $CdCl_2$ yoki $CuCl_2$ bug'larini kirishi uchun tirqish; 3-yangi tayyorlangan namunalar.

Shunday qilib, taglik harorati $T=523\div 673\text{ K}$ bo'lgan holda, plyonkalarining keng qamrovli qalinliklarida ($5\div 20\text{ mkm}$) fotosezgir qatlamlarni olishga muvaffaq bo'ldik. Eksperiment natijalari shuni ko'rsatdiki, hosil bo'layotgan plyonkalarining xususiyatlariga tarkibi, boshlang'ich materialning oldindan ishlanishi va texnologik parametrlari, ayniqsa bug'lantirish va cho'ktirish sharoitlari katta ta'sir ko'rsatadi. Taglik haroratining o'zgarishi plyonkalarining qarshiligiga sezilarli darajada ta'sir qiladi (2. Rasm). Taglik harorati oshishi bilan kadmiy yuzasidan aks etish boshlanadi va tarkibi ko'proq stexiometrik bo'ladi va plyonkalarining qarshiligi ortadi. Taglik haroratining qarshilikka ta'sirining effektivligi bug'lanishdan oldin dastlabki materialni oldindan qayta ishlashga bog'liq. $CdTe$ yupqa qiya bug'langan qatlamlarni legirlash jarayoni ularni vakuumda $10^{-4}\div 10^{-5}$ mm.rt.st. haroratda bug'lantirish usuli bilan to'g'ridan-to'g'ri o'stirish vaqtida alohida tigellardan $CdTe$ va In ni tayyorlash orqali amalga oshirildi. Bug'lanadigan qo'shimchanning boshlang'ich massasi odatda asosiy yarim o'tkazgich birikmaning massasidan $3\div 7$ og'irlik % ni tashkil etdi. In bug'lanishi $2\div 3$ minutga kechiktirildi va asosiy materialning bug'lanishidan $3\div 5$ minut oldin to'xtatildi.



2. Rasm. CdSe plyonkasining solishtirma qarshiligining taglik haroratiga bogʻliqligi.

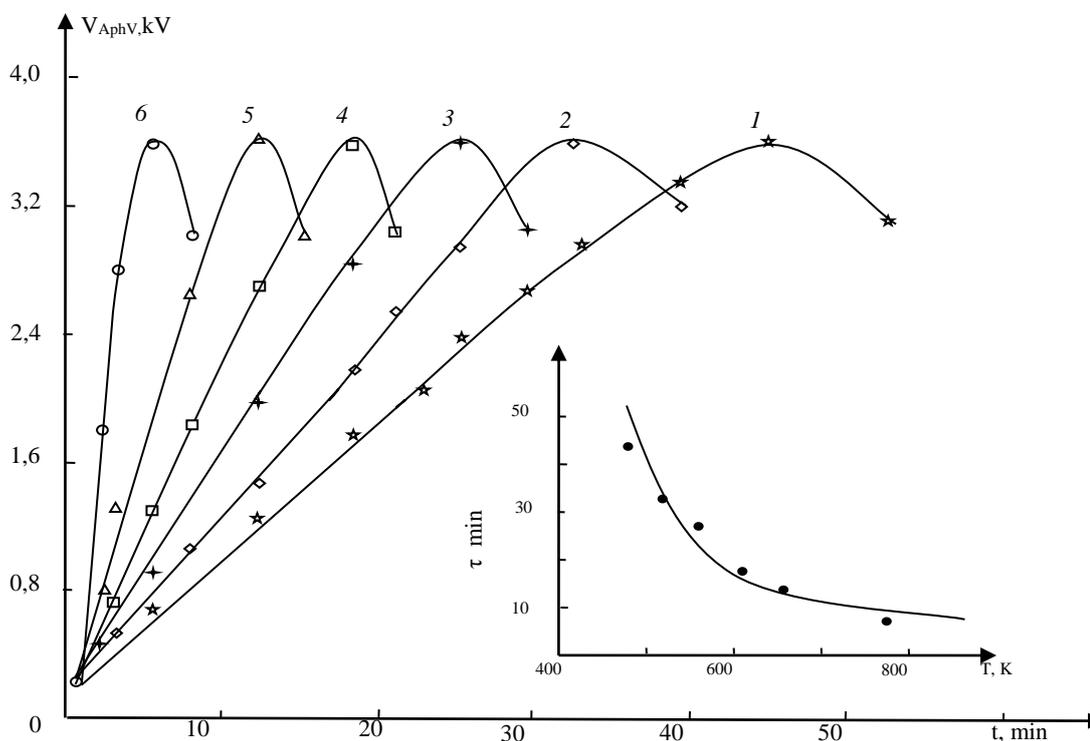
qisqa tutashuv fototoki esa ikki tartibdan koʻproq oshdi va $I_{q,t} \approx 10^{-8}$ A ga yetdi. Termik ishlov berilgan CdTe:In plyonkalarining elektrofizik va AFV xususiyatlari sezilarli darajada barqarorlashdi. Vakuumda yoki CdCl₂ bugʻlarida havoda termik ishlov berishda 1.2÷1.5 mkm qalinlikdagi plyonkalar talab qilindi, 1.0 mkm dan yupqa plyonkalar esa bunday termik ishlov berishda ishdan chiqdi.

3. Rasmda tabiiy yorugʻlik manbai boʻlgan lampochka yorugʻligi bilan doimiy ravishda yoritishda maksimal fotokuchlanishning toza havoda termik ishlov berish vaqtiga bogʻliqligi koʻrsatilgan, yorugʻlik intensivligi $L \approx 10^4$ lk. 1-6-egri chiziqlar bir xil vakuum texnologik partiyadan olingan turli xil termik ishlov berilgan CdTe:In namunalari tegishli. Rasmda koʻrinib turibdiki, termik ishlov berish harorati 470 K dan 770 K gacha oshganda, optimal termik ishlov berish vaqti 46 minutdan 7 minutgacha kamayadi. Barcha namunalarning fotovoltai xususiyatlarini termik sezgirligi kinetikasi bir xil qonuniyatni koʻrsatadi: dastlab termik ishlov berish vaqtining oshishi bilan V_{AFK} qiymati monoton ravishda oʻsib boradi, maksimal qiymatga $\sim 3.5 \cdot 10^3$ V ga etadi va keyingi termik ishlov berishda V_{AFK} qiymati vaqt boʻyicha deyarli eksponentsial ravishda kamayadi. V_{AFK} ning termik sezgirligi kinetikasida turli xil xarakterli oʻsish vaqti t_o va pasayish vaqti t_c CdTe:In plyonkalarining termik sezgirlik va termik buzilish jarayonlarining turli tezliklarini aks ettiradi. Qiziq tomoni shundaki, CdSe:Cu fotooʻtkazuvchan plyonkalarining fotosezgirligi $K = \sigma_{\phi} / \sigma_{mem}$ koʻpayishi va termik sezgirligining kinetikasi ham sifat jihatidan oʻxshash xarakterga ega. Aynan shu oʻxshashlikni amalga oshirish CdTe:In plyonkalarining AFV termal sezuvchanligi muammosiga oydinlik kiritadi. 3. Rasmda kirishma egri chizigʻi. shuni koʻrsatadiki, CdTe:In plyonkasining AFV optimal issiqlik sezuvchanligi vaqti plyonkaning toblanish

Shisha taglikning harorati 250÷400 °C oraliqida oʻzgartirildi. Yangi tayyorlangan $d \approx 0.8 \div 1.5$ mkm qalinlikdagi va 5×20 mm² maydondagi CdTe:In polikristall namunalari (kondensatsiya tezligi $v_k \approx 1.5 \div 2.0$ nm/s, bugʻlanish burchagi 30÷60°) pastroq qarshilikli va nisbatan zaif boʻlgan anomal fotovoltai xususiyatlariga ega boʻlib chiqdi ($V_{AFK} = 50 \div 100$ V). Biroq vakuumda, toza havoda yoki CdCl₂ bugʻlari mavjud boʻlgan havoda termik ishlov berilgandan soʻng, namunalarning qarshiligi 2-3 baravarga oshdi va shu bilan birga xona haroratida ular $(2 \div 4) \cdot 10^3$ V gacha maksimal fotokuchlanish hosil qildi. Maxsus legirlanmagan CdTe namunalari (bu erda $V = 200 \div 600$ V) nisbatan bir tartibga koʻproq,

haroratining oshishi bilan deyarli eksponensial ravishda pasayadi va bu, ehtimol, termal sezgirlik kinetikasining diffuziya xususiyatini ko'rsatadi.

Plyonkalarining qalinligi ММИ-1 interferension mikroskopi yordamida, ba'zi



3. Rasm. $L \approx 10^4$ lk intensivlikdagi tabiiy yorug'lik bilan yoritilganda V_{AFK} V fotopolyarizatsiya kuchlanishining CdTe plyonkalarini TIB vaqtiga bog'liqligi: In har xil haroratda havoda T, K: 1-470, 2-520, 3-570, 4-620, 5-670, 6-770. 1-6 egri chiziqlar bo'yicha hisoblangan tavlanişning optimal vaqtining haroratiga bog'liqligi ko'rsatilgan.

hollarda esa $\pm 0,5$ mkm aniqlik bilan og'irlik usuli bilan aniqlandi. Namunalarning tuzilishi UEMV-100 B elektron mikroskopida, fazaviy tarkibi esa URS-50 rentgen apparati va mis anodli 0,4 bsv-3 kamerasi bilan bilan o'rganildi. Difraksion chiziqlarni ionizatsion qayd qilish uchun $NaI(Te)$ hisoblagichi va $DPOH-3.0$ rentgen difraktometrini asos qilib olingan impulslarni hisoblash tizimi ishlatilgan.

Xoll effekti o'lchovlari Litva Fanlar Akademiyasi Yarimo'tkazgichlar Fizikasi Institutida ishlab chiqilgan qurilmada o'tkazildi, bu qurilma zaryad tashuvchilarning harakatchanligini $10^{-5} m^2/V \cdot s$ gacha va undan kamroq o'lchashlarni amalga oshirish imkonini beradi. O'tkazuvchanlik (σ), effektiv harakatchanlik (μ_{eff}) va tashuvchilar konsentratsiyasi (n) quyidagi formulalar bo'yicha aniqlandi [164].

$$\sigma = \frac{c}{e \cdot d} \cdot \frac{J}{V_{\sigma}}, \quad (1)$$

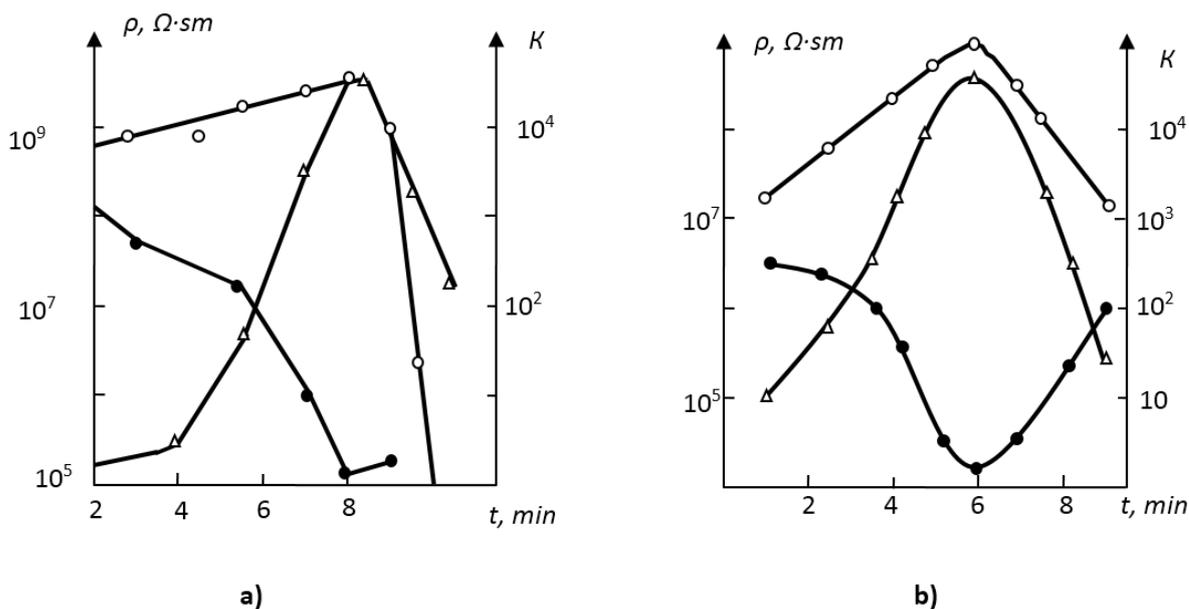
$$n = \frac{1}{R_H e} = \frac{J_x B}{d V_y e}, \quad (2)$$

$$\mu_{eff} = \frac{2 V_y c}{V_\sigma \cdot B \cdot e}, \quad (3)$$

bu yerda c , b , d -mos ravishda namunaning uzunligi, kengligi va qalinligi, J_x - namunadan o'tadigan tok zichligi, V_σ -o'tkazuvchanlikni o'lchash uchun elektrodlar orasidagi kuchlanish pasayishi, V_y -Xoll kuchlanishi, e -elektron zaryadi, R_H -universal Xoll doimiysi, B -magnit maydon induksiyasi ($\sim 0,1$ T). Qurilma turli xil nurlanish intensivligida $100 \div 500$ K harorat oralig'ida o'lchovlar o'tkazish imkonini berdi.

Uchinchi bob “Fotosezgir $CdSe_xS_{1-x}$ plyonkalarining elektrofizik va fotoelektrik xossalari o'rganish” deb nomlangan va quyidagilar o'rganilgan: nuqtaviy markazlarining termo-maydon migratsiyasi sharoitida fotoo'tkazuvchanlik sezgirligining kinetikasi, yangi tayyorlangan va optimal sezgirlikka ega $CdSe_xS_{1-x}$ qattiq qorishmasidan tayyorlangan polikristall plyonkalarining LAX ga TIB ning ta'siri, plyonkalarining sezgirlik mexanizmi va r - va s - markazlarning tabiati aniqlandi. Polikristall plyonka namunalari uchun muvozanat o'tkazuvchanligining infraqizil va haroratli so'nishining asosiy xususiyatlari tasvirlangan. Eksperimental natijalar yarim o'tkazgich plyonka modeli asosida talqin qilingan, bu erda donalararo potentsial to'siqlar mavjud. $5 \times 25 \text{ mm}^2$ o'lchamli va $5 \div 10 \text{ mkm}$ qalinlikdagi $CdSe_{0.8}S_{0.2}$ polikristall plyonkalar o'rganildi. Plyonkalar $10^{-4} \div 10^{-5} \text{ mm.sim.us.}$ bosimda kvaziberk vakuumda $523 \div 573 \text{ K}$ gacha qizdirilgan shisha tagliklarga $CdSe_{0.8}S_{0.2}$ kukuni bug'lanishi orqali $80 \div 10 \text{ A/s}$ tezlikda o'stirildi. Plyonka tayyorlangandan so'ng, unga uch xil usulda TIB: vakuumda TIB, $10^{-4} \text{ mm.sim.us}$ bosimda 750 K haroratda taxminan 90 minut davomida; havoda TIB, $15 \div 20$ minut davomida; $CdCl_2$ yoki $CuCl_2$ bug'lari mavjudligida havoda TIB, $750 \div 800 \text{ K}$ haroratda $6 \div 8$ minut davomida. Bunday usulda tayyorlangan plyonkalar kuchli kompensirlanganligi aniqlandi (300 K da qorong'i solishtirma o'tkazuvchanlik $\rho_q \approx 10^5 \div 10^6 \text{ } \Omega \cdot m$) va yuqori fotosezgirlikka ega edi (tabiiy yorug'likning $\sim 10^2$ lx intensivligiga mos keladigan solishtirma fotoo'tkazuvchanlik $\rho_{y0} \approx 10 \div 10^2 \text{ } \Omega \cdot m$). Optimal TIB vaqti qorong'i va yorug'lik solishtirma o'tkazuvchanligining TIB vaqtidan bog'liqligi, ma'lum bir qizdirish haroratida (4. Rasm) aniqlandi. Plyonkalarni termik sezgirlik kinetikasi, TIB usuliga qaramasdan, bir xil qonuniyatni ko'rsatadi: dastlab ρ_q vaqti bilan monoton ravishda oshadi (ρ_{y0} kamayadi), $t = \tau_{op}$ da maksimal qiymatga etadi (ρ_{y0} minimal qiymatga etadi), keyin esa keskin kamayadi (oshadi). Barcha TIB $CdSe_{0.8}S_{0.2}$ plyonkalari $t = \tau_{op}$ da solishtirma o'tkazuvchanlik o'zgarishining

maksimal tartib $K = \sigma_{ph}/\sigma_d \approx 10^3 \div 10^5$,) ga ega bo'lib, keyinchalik "optimal sezgirlangan" deb ataladi.



4. Rasm. $CdSe_{0.8}S_{0.2}$ plyonkasining ρ_q , (○) ρ_{yo} , (●) va K (△) qiymatlarining havoda $CdCl_2$ (a) va $CdCl_2(0,8) + CuCl_2(0,2)$ (b) mavjudligida termik ishlov berish vaqtiga bog'liqligi ($L=10^2$ lx).

Fotoo'tkazuvchanlikni sezgirlash mexanizmini sifat jihatidan quyidagicha tushuntirish mumkin. Polikristall plyonkalarda termik migratsiya jarayonlari kristall donalarning hajmiy zaryadlari chegaraviy sohalarining kuchli elektrostatik maydonlari mavjudligida, ya'ni ionlarning **termo-maydon migratsiyasi** sharoitida sodir bo'ladi. Dastlabki TIB momentlarida kadmiy atomlarining kristallitlar hajmidan vakuumga oqimi selen va oltingugurtning shunga o'xshash oqimidan ko'proq bo'ladi, ya'ni vaqt o'tishi bilan kadmiy vakansiyalarining konsentratsiyasi V_{Cd} oshadi, bu esa plyonkaning qorong'i solishtirma qarshiligining oshishiga olib keladi. Ma'lumki, kadmiy vakansiyasi taqiqlangan zonada ikkita akseptor darajasini hosil qiladi, ular mos ravishda tez (**s-markaz**) va sekin (**r-markaz**) rekombinatsiya markazlari bo'lib, ular darhol mayda donor sathidan elektronlarni ushlab oladi va qisman ularni kompensatsiya qiladi (5. Rasm). Vaqt o'tishi bilan donor markazlarining kompensatsiya sathi oshadi va shu sababli plyonkaning qorong'i solishtirma qarshiligi monoton ravishda oshadi. Biroq, TIB ning ma'lum bir nuqtasidan boshlab donor markazlarining maksimal kompensatsiyasi (V_{Se}^{+1}) sodir bo'ladi va shuning uchun shu nuqtadan boshlab qorong'i qarshilik to'yinganlikka erishadi. Ushbu jarayonning shartlarini quyidagicha yozish mumkin:

$$\frac{N_d(t) - N_r(t)}{N_s(t)} = const, \quad (4)$$

bu yerda $N_r(t)$, $N_s(t)$, $N_d(t)$ - sekin, tez rekombinatsiya markazlari va donor markazlarining konsentratsiyalari. ρ_q to'yinish vaqti TIB harorati oshishi bilan kamayishi, panjara tugunlaridagi atomlarning kinetik energiyasining oshishi bilan

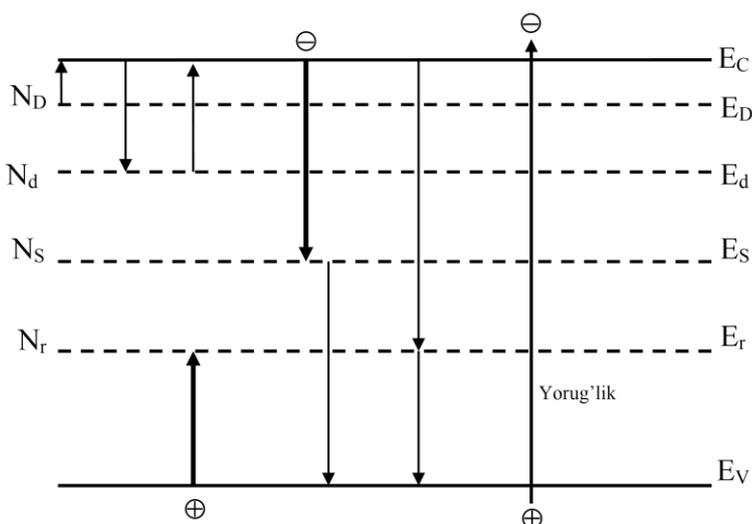
izohlanadi, bu esa ionlarning termo-maydon migratsiyasi tezligini oshiradi va natijada kristalli donalarning panjarasida vakansiya hosil bo'lishini kuchaytiradi.

Tabiiyki, plyonkaning sezgirlash jarayoni quyidagi shartlar bajarilgan paytdan boshlab sodir bo'lishini kuzatish mumkin:

$$\frac{P_s}{N_r} < 1, \quad \frac{N_D - N_r}{N_s} \leq 1 \quad (5)$$

(bu yerda P_s - s -markazlarning band bo'lmagan holatlar soni). Quyidagi shart bajarilganda:

$$\frac{N_D(t) - N_r(t)}{N_s(t)} = const < 1 \quad (6)$$



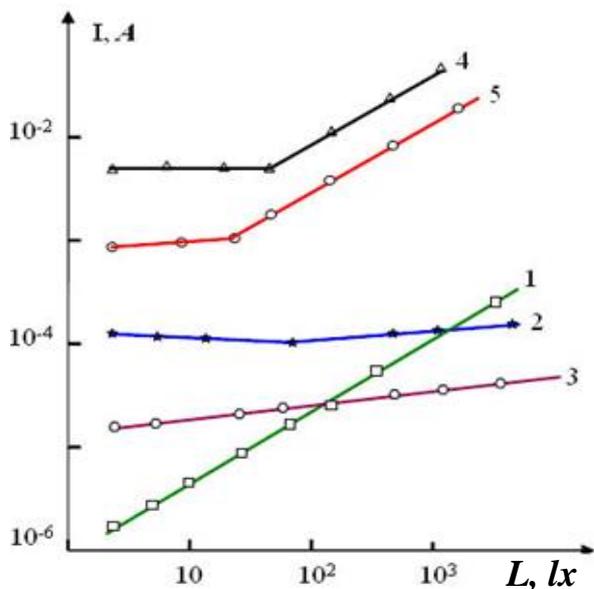
5. Rasm. $CdSe_{0.8}S_{0.2}$ taqiqlangan zonasidagi energiya stahlari sxemasi va mumkin bo'lgan elektron o'tishlari.

plyonkaning yorug'lik qarshiligi va fotosezgirli (FS) ham o'tkazish vaqtidan qat'i nazar, plyonkaning optimal sezgirlashuvi sodir bo'ladi. Plyonkani yoritishda, r -markazlar elektronlar bilan to'liq to'ldirilganda, valentlik zonasidan teshiklarni ushlab qolish ehtimoli yuqori bo'ladi, s -markazlar esa erkin elektronlarni intensiv ravishda ushlab qoladi. Natijada, dastlab r -markazlarda bo'lgan

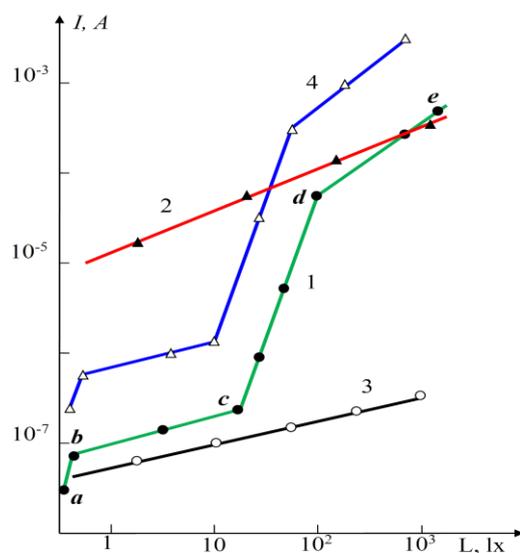
elektronlar tez rekombinatsiya markazlariga o'tib ketadi, bu esa elektronlarning yashash vaqtini va o'tkazuvchanlik zonasidagi konsentratsiyasini keskin oshiradi.

$$I_{ph} = AL^\alpha \quad (7)$$

LAX ning α ko'rsatkichi nafaqat turli namunalarda, balki bir xil fotorezistor uchun ham yorug'lik intensivligi diapazoniga qarab turli qiymatlarni olishi mumkin. Uchta holatni ajratib ko'rsatish mumkin: $\alpha=1$ (chiziqli), $\alpha<1$ (subchiziqli) va $\alpha>1$ (supperchiziqli). $300 K$ da optimal sezgirlantirilgan $CdSe_xS_{1-x}$ namunalarning LAX uchta qismdan iborat (6.b. Rasm, 1 va 4-egri chiziqlar). Biroq, monokristallar bilan taqqoslaganda, past yoritilganlik holatlarida dastlab chiziqli, keyin esa $\alpha\sim 0,5$ bo'lgan quyichiziqli kuzatiladi (past fotosezuvchanlik (FS) sohasi). $L\sim 10$ lx yoritilishidan boshlab, LAX (o'rtacha FS sohasi, $\alpha\sim 3,5$) kattaroq bo'lganda, fototok keskin ortadi. Yorug'lik intensivligi yanada oshganda, LAX chiziqli bog'liqlikka o'tadi (yuqori FS sohasi). Yuqorichiziqli LAX ga mos keladigan yorug'lik intensivligining o'zgarish diapazoni bir tartibdan oshmaydi.



6.a. Rasmda TI berilmagan CdSe_{0.8}S_{0.2} plyonkasining turli harorat va kuchlanishlarda olingan LAX ko'rsatilgan: T= 200 K (1-chiziq), 300 K (3, 5), 323 K (2, 4); U=5 V (2,3-chiziq), 10 V (1, 4,



6.b. Rasm. CdSe_{0.8}S_{0.2} plyonkalarining LAX, "vakuum+CdCl₂" (1-3) va "havo+CdCl₂" (4) usullarida sezgirlashtirilgan, T = 300 (1, 4), 210 (2) va 350 (3) K da

Bu esa rekombinatsiya markazlari bo'shliqlarining konsentratsiyasi erkin elektronlar konsentratsiyasidan mustaqil ekanligi to'g'risida xulosa chiqarish imkonini beradi ($n \gg P_r, P_s$). Optimal sezgirlik vaqtidan ko'proq vaqt davomida qizdirilgan namunalar uchun LAX ning $m = \text{const } n^k$ (bu yerda $k < 1$, n va m - erkin va energetik sathlarida joylashgan elektronlarning konsentratsiyalari) bo'lgan holat amalga oshiriladi va namunaning FS yorug'lik intensivligi qiymatining barcha sohalarida pasayadi.

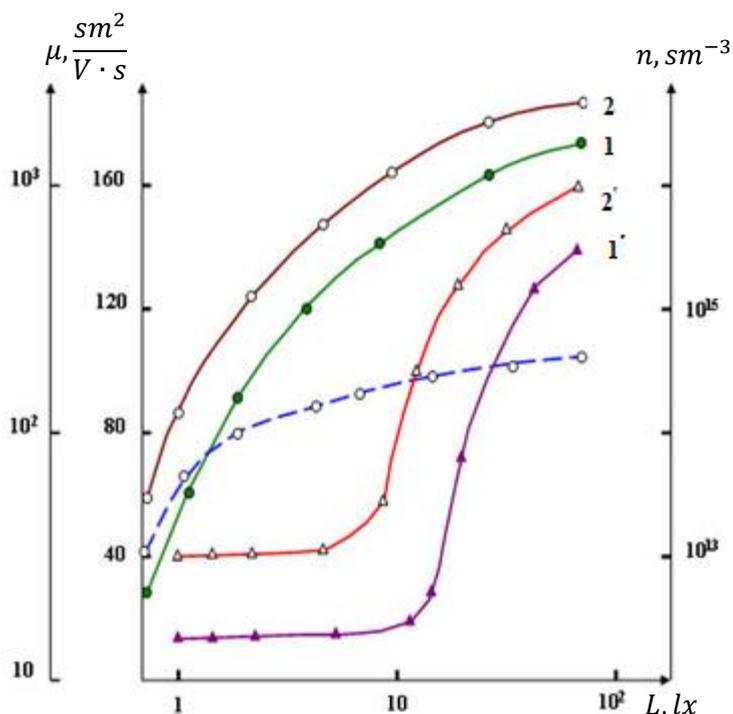
Yuqorida muhokama qilingan LAX xususiyatlarini batafsil tahlil qilish uchun qo'shimcha ravishda $\mu(L)$ va $n(L)$ bog'liqliklari o'lchandi. Aniqlandiki, past yorug'lik intensivligida elektronlarning harakatchanligi μ dastlab $\gamma \approx 1$ ko'rsatkichi bilan (ya'ni keyin $\mu \sim L^\gamma$) o'sib boradi, so'ngra $\gamma \approx 0,5$ bilan o'sib boradi, ularning konsentratsiyasi esa deyarli o'zgarmaydi (7. Rasm). Yorug'lik intensivligi $L \approx 10 \div 15$ lx dan boshlab elektronlarning konsentratsiyasi keskin o'sib boradi ($n \sim L^\beta$, $\beta \approx 2,8$), shu bilan birga μ yorug'lik intensivligi oshishi bilan deyarli o'zgarmaydi. Ushbu bog'liqliklar asosida quyidagi xulosaga kelish mumkin: qorong'ida va past yorug'lik sharoitida CdSe_xS_{1-x} plyonkalarida to'siq (μ -) o'tkazuvchanlik mexanizmi amalga oshiriladi, yuqori yorug'lik darajalarida esa μ -mexanizm, uning L ga bo'lgan zaif bog'liqligi bilan ko'rsatiladi va hal qiluvchi rol o'ynamaydi. Shuning uchun polikristall namunalarning statsionar fotoo'tkazuvchanligini aniq hisoblash

uchun to‘siq va konsentratsion (n -) fotoo‘tkazuvchanlik mexanizmlarini hisobga olgan modelni asos qilib olish kerak.

Ma'lum bo‘lishicha, optimal sezgirlikka ega $CdSe_xS_{1-x}$ polikristall plyonkalari qorong‘i elektr o‘tkazuvchanligi σ_t ning haroratga anomal bog‘liqlikni namoyon qiladi: $150 \div 300 K$ oralig‘ida harorat oshishi bilan σ_t $3 \div 5$ tartibga kamayadi. Bu hodisani biz **qorong‘i** (muvozanat yoki dastlabki) **o‘tkazuvchanlikning termik so‘nishi (QO‘TS)** deb ataymiz, chunki u ko‘plab xususiyatlar bo‘yicha **fotoo‘tkazuvchanlikning termik so‘nishi (FTS)** hodisasiga o‘xshashdir. Ma'lum bo‘lgan ishlardan farqli o‘laroq, $CdSe_xS_{1-x}$ plyonkalarida birinchi marta yuqori krishmali fotoo‘tkazuvchanlik, ya'ni **qorong‘i o‘tkazuvchanlikning infraqizil nurlanishda so‘nishi (QO‘IQS)** aniqlandi. Ko‘rsatilganidek, QO‘TS va QO‘IQS faqat r - va s -rekombinatsiya markazlari va samarali ishlaydigan kristallararo to‘siqlarga ega bo‘lgan optimal fotosezgir namunalarda kuzatiladi.

Bu effekt mayda donli tuzilishga va 1 mkmdan kam qalinlikka ega yangi bug‘latilgan plyonkalarida kuzatilmadi. Bundan tashqari, QO‘TS va QO‘IQS deyarli bir xil harorat ($150 \div 300 K$) va spektral ($1.0 \div 3.0 \text{ mikron}$) diapazonlarda sodir bo‘ladi. $\sigma_q(T)$ ning bog‘liqligi $\sigma_{yo}(T)$ ga o‘xshab, ikkita qismdan iborat $E_{r,r} \sim 0.14-0.4 \text{ eV}$ aktivatsiya energiyasi bilan sekin pasayuvchi ($150 \div 230 K$) va $E_{r,r} \sim 0.6 \div 1.0 \text{ eV}$ bilan keskin pasayuvchi ($230 \div 300 K$).

QO‘IQS $T < 300 K$ va zaif $I_{ir} < 10^{-1} \text{ lx}$ intensivlikdagi infraqizil yorug‘likda, $1.0 \div 3.0 \text{ mikron}$ diapazondagi qo‘shimcha spektral yutilishda sezilarli darajada namoyon bo‘ladi, $I_{ir} < 10^{-1} \text{ lx}$ da esa aniq qo‘shimcha fotoo‘tkazuvchanlik kuzatiladi. $T = 300 K$ da o‘rganilgan $CdSe_xS_{1-x}$ ($CdCl_2$) namunalari quyidagi nuqtaviy nuqson turlariga ega: r -markazlar $E_r = E_v + (0.62 \pm 0.04) \text{ eV}$ aktivatsiya



7. Rasm. $CdSe_{0.8}S_{0.2}$ plyonkalari uchun elektronlarning harakatchanligi (1, 2) va konsentratsiyasi (1', 2') ning yorug'lik intensivligiga bog'liqligi. Plyonkalar "vakuum+CdCl₂" (1, 1') va "bozdyx+CdCl₂" (2, 2') usullarida sezgirlashtirilgan. Shuningdek, "bozdyx+CdCl₂" usulida sezgirlashtirilgan plyonkalar uchun μ (L) ning ikki tomonlama logarifmik shkalada (nuqtali chiziq) bog'liqligi keltirilgan.

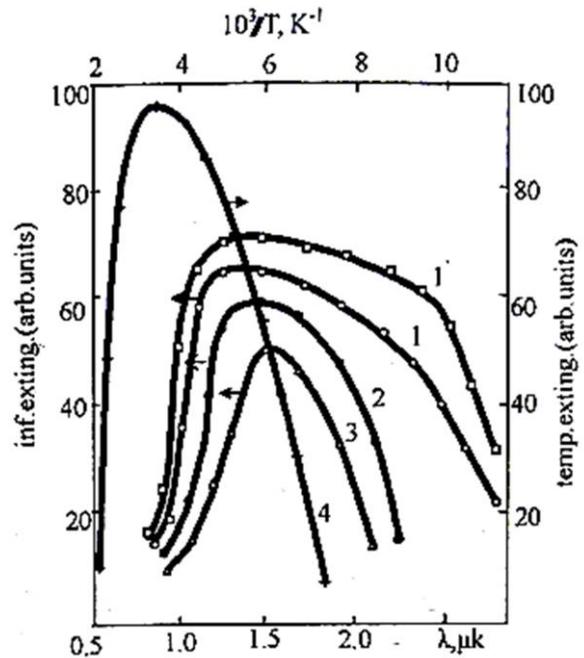
energiyasi, $N_r \leq 10^{17} \text{ sm}^{-3}$ konsentratsiyasi va $S_{pr} \approx 10^{-14} \text{ sm}^2$ teshiklar uchun tutuvchi kesimi bilan. Shuningdek, quyidagi parametrlarga ega chuqur tuzoqlar: $E_t = E_c + (0.30 \pm 0.04) \text{ eV}$ aktivatsiya energiyasi, $N_t = 10^{14} \text{ sm}^2$, $S_{nr} \approx 10^{-18} \text{ sm}^2$ va $E_s = E_v + (0.90 \pm 0.04) \text{ eV}$ energiyali tez rekombinatsiya markazlari, shuningdek, E_{rr} qo‘shimcha fotosezgirlik sathi mavjud. Qorong‘i tokning pasayishini nisbiy miqdor bilan tavsiflash qulay

$$\Gamma = (j_0 - j)/j_0, \quad (8)$$

bu yerda j_0 - j nurlanish (yoki haroratli so‘nish) bo‘lmagan holda tok zichligi. 8. Rasmda ko‘rinib turibdiki, harorat oshishi bilan QO‘IQS spektrining maksimal qiymati va yarim kengligi kamayadi, shu bilan birga uning qizil chegarasi sezilarli darajada qisqa to‘lqinli tomonga siljiydi. $T = 150 \text{ K}$ da QO‘IQS spektri, shuningdek, infraqizil fotosezgirlikni so‘nish spektri (1'-egri chiziq) ham aniq ikki tomonlama tuzilishga ega bo‘lib, qizil chegarasi $\lambda_r = 2.8 \text{ mkm}$ ni tashkil qiladi.

QO‘TS va QO‘IQS uchun quyidagi mexanizm taklif etiladi. Muvozanat holatida qo‘shni kristallitlar chegarasidagi energetik sathlarning egilishi va sirt akseptor sathlarining samarali ta'siri tufayli fazoviy zaryad sohasidagi rekombinatsion r -markazlar, kvazineytral hajmga nisbatan, qisman to‘ldirilgan bo‘ladi. s -markazlar esa ikki marta zaryadlangan kadmiiy bo‘shlig‘i V_{Cd} bilan bog‘langan holda bo‘shab, bir marta zaryadlangan V_{Cd} (r -markaz) holatiga o‘tadi. Bu esa chegarada r -markazlar konsentratsiyasining oshishiga olib keladi (9-rasm).

QO‘TS da fononlarni yutish yoki QO‘IQS da IQ nurlanish kvantlarini yutish fazoviy zaryad sohasida elektronlarni valentlik zonasidan bo‘sh r -markaz sathlariga o‘tishga olib kelishi mumkin. Shu bilan birga hosil bo‘lgan bo‘sh teshik o‘tkazuvchanlik zonasidagi erkin elektronlar bilan r va s -markazlar orqali yoki sirt sathlari orqali rekombinatsiya jarayonlarida ishtirok etadi, natijada muvozanatli o‘tkazuvchanlik elektronlarining o‘rtacha konsentratsiyasi va shu bilan birga qorong‘i o‘tkazuvchanlik kamayadi.



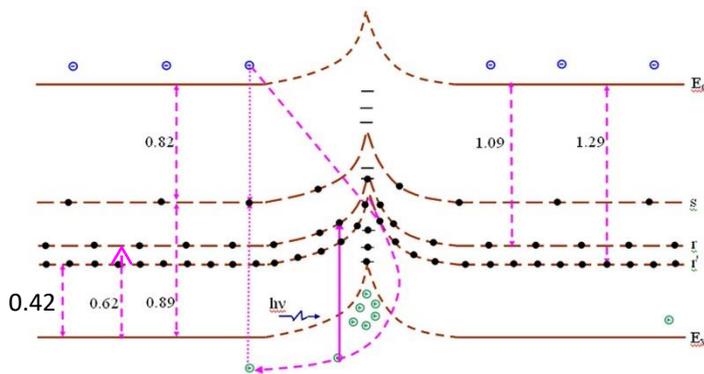
8. Rasm. $\text{CdSe}_x\text{S}_{1-x}$ plyonkalarining Γ_{IRT} muvozanat o‘tkazuvchanligini IQ so‘nish spektrlari turli haroratlarda $T, \text{ K}$: 1-150, 2-200, 3-250. 1'-egri chiziq - QO‘IQS spektri, 4-egri chiziq esa $T=150 \text{ K}$ da QO‘TS ning haroratga bog‘liqligi.

III bobning xulosasida polikristall namunalari $T=150\div 300\text{ K}$ oralig'ida termal kalitlar sifatida va $T < 300\text{ K}$ da $\lambda=1\div 3\text{ mkm}$ diapazonida zaif IQ nurlanish qabul qiluvchilar sifatida ishlatilishi mumkin.

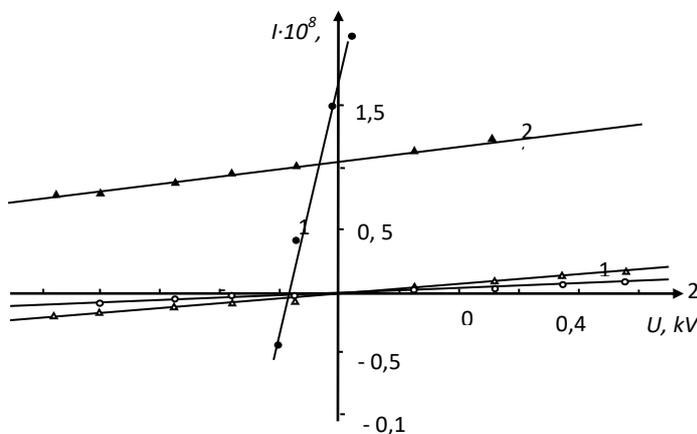
Dissertatsiyaning "CdTe:In plyonkalarining elektrofizik va optik xossalari" deb nomlangan to'rtinchi bobi CdTe ning In, Cl bilan legirlangan yupqa polikristall qatlamlarida AFV effektini o'rganishga bag'ishlangan bo'lib, bu plyonkalarini foto-EYK manbai sifatida ishlaydigan quvvatini oshirish va AFK hosil qilishda fotosezgir markazlarning rolini aniqlash maqsadida amalga oshirilgan. Bu yerda, xususan, Ag dan farqli o'laroq, In^{+i} , Cl^+ ionlari va kadmiy bo'shliqlari V_{Cd}^{-j}

ning ichki kristalli maydonlarda termomaydon migratsiyasi (TMM) CdTe:In, Cl plyonkalarining AFV xossalarni sezilarli darajada kuchaytirishi mumkinligi ko'rsatilgan. CdTe:In plyonkalarining elektrofizik va optik xossalarni o'rganish natijalari keltirilgan. CdTe:In plyonkasining VAX (10. Rasm) qorong'ida (1 va 2 egri chiziqlari) va yorug'lik ta'sirida (1' va 2) ko'rsatadiki, TIB plyonkaning qorong'i qarshiligini sezilarli darajada oshirishga va V_{AFK} qiymatini keskin o'stirishga olib keladi, shu bilan birga plyonkaning integral fotoo'tkazuvchanligini sezilarli darajada kamaytiradi. TIB natijasida CdTe:In plyonkasining qisqa tutashuv fototoki deyarli ikki baravar kamayadi, shu bilan birga yorug'lik qarshiligi deyarli ikki tartibga oshadi. Bu shuni

ta'kidlanganidek, o'rganilgan CdSe: Cd: Cu: Cl



9. Rasm. Hajmiy r va s-rekombinatsion markazlarga ega bikristall modeli va qorong'i o'tkazuvchanlikning temperaturaviy yoki IQ-so'nishiga olib keladigan elektron o'tishlar sxemasi.



10. Rasm. CdTe:In polikristall plyonkasining voltamper xarakteristikasi TIB oldin (1 va 1' chiziqlar) va keyin (2 va 2' chiziqlar), xona haroratida olingan. 1', 2' chiziqlar $L=10^4\text{ lx}$ da vorug'likli VAX hisoblanadi.

anglatadiki, bu plyonkalarda AFK va fotoo'tkazuvchanlikni shakllantirish mexanizmlari sezilarli darajada farq qiladi. $L \approx 10^3$ lx da $CdTe:In$ - yangi tayyorlangan va $CdTe:In$ - TIB plyonkalarining yorug'lik qarshiliklari mos ravishda $R_{yo.} = 2 \cdot 10^{12}$, $3 \cdot 10^9$ va $2 \cdot 10^{11} \Omega$ ni tashkil etdi. Ular $V_{AFK} \approx 200$ V, 60 V va 2000 V ni hosil qildi, shuning uchun bu fotogeneratorlarning quvvati, $V_{AFK}^2/R_{yo.}$ ga mutanosib bo'lib, $18:25:5000$ nisbatida edi. Shunday qilib, In bilan legirlangan $CdTe$ dan olingan AFK plyonkalarining quvvati TIB dan keyin ikki tartibdan ko'proqa oshadi.

Xona haroratida $CdTe:In$ plyonkalarining elektrofizik xossalarini fotoxoll o'lchovlari va LAX, termostimulyatsiya qilingan tok tahlili usullari bilan o'rganish natijalariga ko'ra, V qiymati bo'yicha optimal In konsentratsiyasi va kadmiy vakansiyalari $V_{Cd} \sim 10^{17} \div 10^{18} \text{ sm}^{-3}$ ni tashkil qiladi. Elektronlarning o'rtacha konsentratsiyasi va dreyf harakatchanligi shu bilan birga $10^{10} \div 10^{12} \text{ sm}^{-3}$ va $50 \div 250 \text{ sm}^2/V \cdot s$ oralig'ida o'zgarib turadi, ya'ni TIB $CdTe:In$ plyonkasi kuchli kompensirlangan yarimo'tkazgichdan tashkil topgan juda notekis tuzilishga ega. $CdTe:In$ plyonkalarining AFV xossalarini termik sezgirligini tushuntirish uchun ionlarning TMM modeli ishlab chiqildi. Tok o'tish yo'nalishi bo'yicha polikristall plyonkani chap va o'ng tomonlarida dielektrik qatlam (DQ) bilan ajratilgan assimetrik sirt elektr xossalariga ega bo'lgan kristalli donalarning (KD) chiziqli davriy zanjiri sifatida tasavvur qilingan. Har bir KD da DQ ning ikki tomonida muvozanatli assimetrik sirt potentsial to'siqlari, ya'ni - har bir KD da kontakt potentsiallar farqi $\psi_0 = (\varphi_{01} - \varphi_{02})/e$ (11. Rasm) hosil bo'lishi chiziqli donalar zanjirida yorug'lik tushganda yuqori kuchlanishli foto-EYUK hosil bo'lishini ta'minlaydi.

$$V_{AFK} = (N - 1) \frac{\psi_0 - \psi}{e}, \quad (9)$$

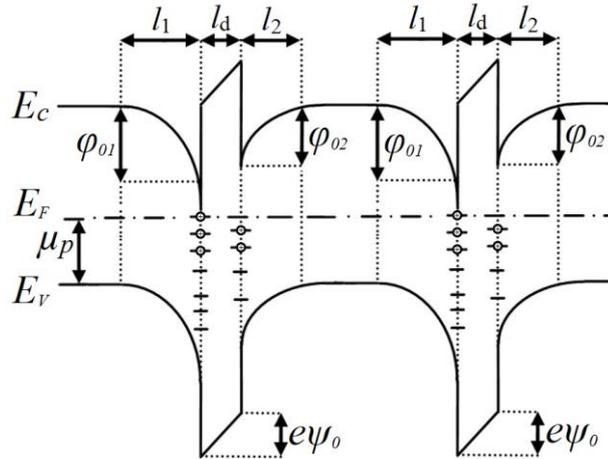
bu yerda N - plyonka bo'ylab davriy joylashtirilgan KD soni, $\psi_0 = \varphi_{01} - \varphi_{02}$ va $\psi = \varphi_1 - \varphi_2$; φ_{0i} , φ_i - yorug'lik ta'siridan oldin va keyin sirt potentsial to'siqlarining balandligi (DQ ning chap ($i=1$) va o'ng ($i=2$) tomonlarida). Ushbu modelga ko'ra, bu to'siqlarning assimetriya darajasini (φ_{01} va φ_{02}) ma'lum texnologik usullar yordamida V_{AFK} ning maksimal qiymatini oshirish mumkin degan xulosaga kelish mumkin. In krishmasi bilan legirlash va keyinchalik $CdTe$ qiya bug'latilgan plyonkalarini TIB bunday texnologik echimlardan biridir. Qiya bug'lanish usuli bilan olingan polikristall $CdTe$ qatlamlarini TIB vakansiyalar, krishmalar komplekslari va ularning migratsiyasi jarayonlari massiv kristallar va oddiy polikristall plyonkalardagi shunga o'xshash jarayonlardan sezilarli darajada farq qiladi. Shunday qilib, o'rganilgan $CdTe:In$ plyonkalarida FZS ning kristall ichidagi elektr maydoni kadmiy vakansiyalari bo'ylab musbat zaryadlangan indiy atomlarining driftini KD yuzasiga qarab yoki teskari yo'nalishda, donaning yuzasidan uning hajmigacha manfiy zaryadlangan kadmiy vakansiyalarining

driftini keltirib chiqaradi. Natijada, bunday qarama-qarshi TMM ionlari (In^{+i}) va vakansiyalari (V_{Cd}^{-j}) ning notekis fazoviy taqsimlanishi hosil bo‘ladi:

$$N_{In^{+i}}(x) = N_{In^{+i}}(0) \cdot e^{\frac{e\varphi(x)}{kT}}, \quad N_{V_{Cd}^{-j}}(x) = N_{V_{Cd}^{-j}}(0) \cdot e^{-\frac{e\varphi(x)}{kT}}, \quad (10)$$

nuqtaviy nuqsonlarning ikki qutbli diffuziyasining teskari oqimini keltirib chiqaradi. Bu yerda $N_{In^{+i}}(0)$ va $N_{V_{Cd}^{-j}}(0)$ -

kvazineytral hajm va FZS o‘rtasidagi chegarada ionlar In^{+i} va vakansiyalar V_{Cd}^{-j} konsentratsiyasi. Shuni ta’kidlash kerakki, TMM In^{+i} va V_{Cd}^{-j} dielektrik qatlamning ikkala tomonida ham assimetrik elektr maydonlarida sodir bo‘ladi, natijada KD chegarasiga chiqadigan In^{+i} atomlarining soni DQ ning chap tomonida o‘ng tomoniga qaraganda ancha ko‘p bo‘ladi. l_1 va l_2 to‘siq sohalarida (11. Rasmga qarang) ichki kristall elektrostatik maydonlar ta’sirida assimetrik TMM va ionlarning elektrodifuziyasi amalga oshiriladi. V_{AFK} ning optimal termosezgirlik vaqti (τ), shuningdek, fotoo‘tkazuvchanlik



11-rasm. Termodinamik muvozanat holatidagi legirlanmagan AFV plyonkasi uchun teshiklar bilan kristallitlar chegarasida assimetrik potensial to‘siqlarga ega bo‘lgan kristal donalari zanjiri uchun energiya zona

sezgirlik vaqti ham KD ning hajmida va yuzasida donorlar va akseptorlarning eng katta kompensatsiyasi sharti bilan belgilanadi:

$$\frac{N_{In^{+i}}(0,t) - N_{Cd}^{-j}(0,t)}{N_{Cd}^{-j}(0,t)} \ll 1, \quad (11)$$

$$\frac{N_{In^{+i}}(0,t) \cdot e^{\frac{2\varphi_{0i}}{kT}} - N_{Cd}^{-j}(0,t)}{N_{Cd}^{-j}(0,t)} \ll 1. \quad (12)$$

FZS da zaryadlangan nuqsonlarning TMM va elektrodifuziya jarayonlari (11-rasmga qarang, $0 \leq x \leq l_1$ va $0 \leq x \leq l_2$) x o‘qi bo‘ylab chiziqli doimiy chegarada quyidagi tenglamalar tizimi bilan tasvirlanishi mumkin:

$$\frac{\partial N_{\alpha}^i(x,t)}{\partial t} = D_{\alpha} \frac{\partial^2 N_{\alpha}^i(x,t)}{\partial x^2} + \mu_{\alpha} \frac{\partial}{\partial x} \left(N_{\alpha}^i(x,t) \frac{\partial \varphi_i(x,t)}{\partial x} \right) + \gamma_{\alpha} (N_{In_{Cd}} - \sum_{\alpha} N_{\alpha}^i(x,t)), \quad (13)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi_i(x,t)}{\partial x^2} = \frac{e}{\epsilon \epsilon_0} \left(n_i(x,t) - p_i(x,t) + \sum_{\alpha} z_{\alpha} N_{\alpha}^i(x,t) \right), \quad (14)$$

$$\int_0^{l_i} \left(n_i(x,t) - p_i(x,t) + \sum_{\alpha} z_{\alpha} N_{\alpha}^i(x,t) \right) dx = \sum_{\beta} z_{\beta} N_{s\beta}^i(t). \quad (15)$$

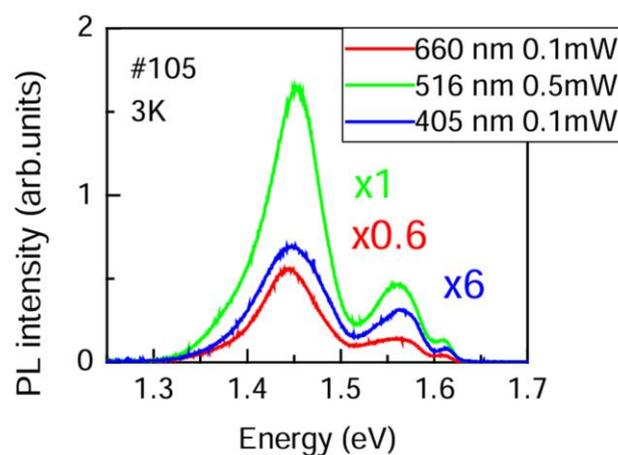
Bu yerda N_{α}^i , D_{α} , μ_{α} , z_{α} va γ_{α} - konsentratsiya, diffuziya koeffitsienti,

harakatchanlik, effektiv zaryad va α -zaryadlangan markazning termal generatsiya tezligi koeffitsienti (masalan, $\alpha=1$ In_i^+ uchun va V_{Cd}^- $\alpha=2$ uchun.), n va p - erkin elektronlar va teshiklarning kontsentratsiyasi, $N_{s\beta}^i$ - zaryad holatiga ega bo'lgan sirt β -sathining kontsentratsiyasi, z_β , e - elektron zaryadining absolyut qiymati, ε_0 - elektr doimiysi, ε - KD ning dielektrik singdiruvchanligi. (13)-(15) tenglamalar tizimi farq sxemalari usuli bilan sonli ravishda hal qilinishi mumkin. Biroq biz 3. Rasmga asoslanib, In_i^{+i} va V_{Cd}^{-j} markazlarining bipolyar diffuziya koeffitsientiga baho berish bilan cheklandik. Agar shu bilan birga V_{AFK} ning optimal sezgirlik vaqti indiy (In_i^{+i}) (yoki kadmiy V_{Cd}^{-j} vakansiyalarining) migratsiya (elektrodiffuziya) koeffitsientiga teskari proporsional deb hisoblasak, $\tau \sim D^{-1} \sim \exp(\Delta E_D / kT)$ unda D ni kiritish egri chizig'idan $T=800$ K uchun qiymatini $D \sim 10^{-12} \text{ sm}^2 / \text{s}$ olamiz, bu adabiyotlarda berilgan ma'lumotlari bilan mos keladi.

Qisqa tutashuv fototoki $I_{q.t.}(h\nu)$ ning spektral bog'liqligi tahlili Lukovskiy usuli

bilan quyidagi chuqur lokal markazlar aniqladi: $E_1 = E_v + (0.06 \pm 0.02) \text{ eV}$; $E_2 = E_v + (0.18 \pm 0.02) \text{ eV}$; $E_3 = E_v + (0.47 \pm 0.02) \text{ eV}$; $E_4 = E_c - (0.15 \pm 0.02) \text{ eV}$; $E_5 = E_c - (0.75 \pm 0.02) \text{ eV}$. Bundan tashqari, E_2 va E_3 sathlari barcha namunalarda mavjud; E_1 esa faqat $CdTe$ ning legirlanmagan plyonkasida; E_4 va E_5 sathlari esa $CdTe:In$ legirlanganlarda mavjud. Ma'lumki, E_1 va E_3 sathlari kadmiy vakansiyalari (V_{Cd}^- , V_{Cd}^{-2}) ning bir va ikki marta zaryadlangan shakllari tomonidan hosil bo'ladi, E_2 sathi esa Te_i oraliq atom tomonidan hosil bo'ladi, shuning uchun E_4 va E_5 sathlari uchun In^{+i} ishtirokidagi murakkab markazlar javobgar deb taxmin qilish tabiiydir.

$CdTe:In$ plyonkasining AFV ga ega bo'lgan xususiyatlarini o'rganish natijalari, undagi AFK hosil bo'lish mexanizmi va tabiati past haroratli fotolyuminesensiya usuli bilan (12. Rasm) ko'rsatilgan. $CdTe:In$ plyonkalarining o'ziga xos yutilish chekkasi atrofidagi lyuminesensiya spektri 3-5 K haroratda ko'rsatadiki, barcha namunalar uchun asosiy keng lyuminesensiya chizig'i krishmalar ishtirokida nurlanish rekombinatsiyasi bilan bog'liq, shuningdek, KD hajmiy zaryad sohalarida issiq fototashuvchilarning rekombinatsiyasi bilan bog'liq yupqa strukturaga ega chiziq ham aniqlanadi.



12. Rasm. $CdTe:In$ plyonkasining fotolyuminesensiya spektri 3 K haroratda lazer chastotasi va quvvatiga bog'liqligi.

XULOSA

$CdSe_xS_{1-x}$ qattiq qorishmalar va legirlangan $CdTe:In$ asosidagi yupqa plyonkali strukturalarini vakuumda termik bug'latish usuli bilan olishning optimal texnologik rejimlarini va ulardagi yangi fundamental fotoelektrik xususiyatlarni o'rnatish natijalariga ko'ra quyidagi asosiy xulosalarni chiqarish mumkin:

1. Yuqori fotosezgirlikka ega $CdSe_xS_{1-x}$ va $CdTe:In$ strukturalarini vakuumda termik bug'latib tayyorlangan plyonkalarini maxsus kvaziberk kamerada vakuumda (480 °C), havoda (470 °C), $CdCl_2$ yoki $CuCl_2$ bug'lari ishtirokida (300 °C) qo'shimcha optimal termik ishlov berish bilan olish usuli ishlab chiqildi. Bu esa sezgirlik orttiruvchi markazlarning bir tekis taqsimlanishini va barqaror, takrorlanadigan elektrofizik xususiyatlarni ta'minladi.
2. Yangi o'stirilgan $CdSe_{0.8}S_{0.2}$ va $CdTe:In$ plyonkalarga turli muhitlarda termik ishlov berish jarayonlarining kinetikasi o'rganildi va $CdCl_2$, $CuCl_2$ larning optimal nisbiy konsentratsiyasi 0.8:0.2 bo'lganda sezgirlikni orttirish vaqti (3-7) minutgacha kamayishi aniqlandi.
3. Fotosezgir $CdSe_xS_{1-x}$ polikristal plyonkalar uchun 77÷523 K diapazonida muvozanatli o'tkazuvchanlikning haroratli va infraqizil so'nish hodisasi kuzatildi. Bu hodisa fazoviy zaryadlar sohasidagi chuqur r - ($E_r \sim 0.14-0.4$ eV) va s - ($E_s \sim 0.6 \div 1.0$ eV) rekombinatsiya markazlarining qayta zaryadlanishi va qizdirish yoki infraqizil nurlanish ta'sirida ushbu soha va kristallit chegaralaridagi dreyf to'siqlarining modulyatsiyasi bilan tushuntirildi.
4. Muvozanatli o'tkazuvchanlikning termik $\sigma_T(T)$ so'nishi 150÷300 K harorat va infraqizil $\sigma_{IQ}(T)$ so'nishi 1.0÷3.0 mkm spektral oraliqlarida sodir bo'ladi. Termik $\sigma_T(T)$ so'nish chizig'i sekin (150÷230 K) va keskin o'zgaruvchi (230÷300 K) ikki qismdan iborat. Infraqizil so'nish faqat $T < 300$ K haroratlarda va $I_{ir} < 10^{-1}$ lx past intensivliklarda kirishmaviy yutilishning 1.0÷3.0 mkm spektral sohasida sezilarli darajada namoyon bo'ladi, $I_{ir} > 10^{-1}$ lx da esa kirishmaviy fotoo'tkazuvchanlik kuzatiladi.
5. $CdSe_{0.8}S_{0.2}$ yupqa plyonkalar havoda $CdCl_2$ bug'lari ishtirokida ~4 minut qizdirilganda fotosezgirlik darajasi $S \approx 10^4$ gacha ortishi va buning sababi aktivlashish energiyasi $E_v + (0,42 \pm 0,02)$ eV bo'lgan kadmiy vakansiyasi va xlor kompleksi, $E_v + (0,63 \pm 0,02)$ eV kadmiy vakansiyasi, $E_v + (0,92 \pm 0,02)$ eV tez rekombinatsiya markazi, shuningdek $E_c - (0,19 \pm 0,02)$ eV selen va kadmiy vakansiyasining kompleksi hosil qilgan chuqur sathli markazlarning termo-maydon migratsiyasining natijasi ekanligi ko'rsatilgan.
6. Vakuumda yoki $CdCl_2$ bug'lari mavjud havoda termik ishlov berilgan $CdTe:In$ plyonkalarida anomal fotokuchlanish ($2 \div 4 \cdot 10^3$ V) legirlanmagan namunalarga nisbatan bir tartibga, qisqa tutashuv fototoki esa ikki tartibga ($4 \div 6 \cdot 10^{-8}$ A) ko'proq ekanligi aniqlandi. Ushbu fizik hodisa indiy ionlari va kadmiy vakansiyalarining kristall don chegaralaridagi ichki assimetrik maydonlarda termo-maydon migratsiyasi va ularning o'zaro kompensatsiyasi tufayli AFV xususiyatlar keskin ortib ketishi bilan tushuntiriladi.

7. *CdTe:In* plyonkalarida qisqa tutashuv fototoki $I_{q,t}(h\nu)$ va AFK spektrlarini Lukovskiy usuli bilan tahlil qilish asosida $E_1 = E_v + 0.06 \text{ eV}$, $E_2 = E_v + 0.18 \text{ eV}$, $E_3 = E_v + 0.47 \text{ eV}$, $E_4 = E_c - 0.15 \text{ eV}$, $E_5 = E_c - 0.75 \text{ eV}$ chuqur sathlar aniqlangan. E_2 va E_3 sathlar barcha namunalarda, E_1 esa faqat sof *CdTe* da, E_4 va E_5 esa *CdTe:In* da kuzatilgan. E_1 va E_3 sathlarni bir va ikki karrali zaryadlangan kadmiy V_{Cd} , V_{Cd}^{-2} vakavsiyalari, E_2 ni esa tugunlararo Te_i ioni, E_4 va E_5 larni In^{+i} ionlari ishtirokidagi kompleks markazlar hosil qiladi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 ПО
ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК ПРИ ФЕРГАНСКОМ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ**

ФЕРГАНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

МИРЗАЕВ ВАЛИЖОН ТУЛКИНОВИЧ

**ВЛИЯНИЕ ТЕРМОПОЛЕВОЙ МИГРАЦИИ ИОНОВ НА
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК $CdSe_xS_{1-x}$ И $CdTe:In$**

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

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

Фергана-2025

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за номером B2024.4.PhD/FM1199.

Диссертация выполнена в Ферганском Политехническом институте.

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

Научный руководитель: **Юлдашев Носиржон Хайдарович**
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Кучкаров Кудратулло Мамарасулович**
доктор физико-математических наук

Собиров Махмуд Мамарасулович
кандидат физико-математических наук, доцент

Ведущая организация: **Наманганский инженерно-технологический институт**

Защита диссертации состоится «__» _____ 2025 года в ____ часов на заседании Научного совета PhD.03/27.02.2020.ФМ.106.01 при Ферганском политехническом институте (Адрес: 150107, г. Фергана, ул. Ферганская, дом 86. Тел: (+99873) 241-12-06, факс (+99873) 241-12-06, e-mail: uzferfizika@mail.ru, малый зал заседания).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке (ЦИР) института. (зарегистрирована за № _____) (Адрес: 150107, г. Фергана, ул. Ферганская, дом 86. Тел: (+99873) 241-12-06).

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2025 года.

(реестр протокола рассылки № _____ от «__» _____ 2025 г.)

Н. А. Султанов

Заместитель председателя Научного совета по присуждению ученой степени доктора философии, д.ф.-м.н., профессор

Б.Ж. Ахмадалиев

Ученый секретарь Научного совета по присуждению ученой степени доктора философии, PhD ф.-м.н., доцент в.б.

С.М. Отажонов

Председатель научного семинара при Научном совете по присуждению ученой степени доктора философии, д.ф.-м.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии)

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время по всему миру пристальное внимание ученых в области физики конденсированных сред направлено на развитие технологии получения и исследованию новых физических свойств микро- и нано материалов на основе полупроводников A_2B_6 . Сегодня широко используются дешевые светодиоды, фотоприемники, фотолюминофоры с улучшенными оптическими и фотоэлектрическими свойствами на основе твердых растворов и гетероструктур халькогенидов кадмия. Особый интерес вызывает повышение эффективности пленочных солнечных элементов и фотопреобразователей на основе соединений $CdS_xCdSe_yCdTe_z$. Представляет фундаментальный интерес новый подход к изучению фотоэлектрических явлений в тонких поликристаллических пленках и структурах, обладающих аномально высокими фотопроводимостью и фотовольтаическим свойством, исходящим из единого представления о фоточувствительных точечных центрах и межзеренных границах. В этом аспекте разработка новых технологий и изучение новых фотоэлектрических эффектов в пленочных структурах твердых растворов типа $CdSe_xS_{1-x}$ и $CdTe:In$ с целью выявления их перспективных функциональных возможностей являются актуальными задачами физики полупроводниковых пленок.

В развитых странах мира в научных лабораториях большое внимание уделяется проблеме определения новых структурных чувствительностей и фотоэлектрических свойств полупроводниковых поликристаллических пленок, которые сильно зависят от условий выращивания. В связи с этим большой интерес представляют фундаментальные исследования по следующим задачам в области микроэлектроники: Разработка технологии получения фоторезистивных поликристаллических пленочных структур на основе твердого раствора $CdSe_xS_{1-x}$ и изучение кинетики повышения их фотоэлектрических свойств; Совершенствование технологии получения легированных пленок $CdTe:In$, что позволит использовать созданные фоторезистивные и аномальные фотоэлектрические пленки в качестве активных элементов современной электроники.

В нашей стране реализуются масштабные мероприятия в области физики полупроводниковых материалов, в частности, по разработке новых технологий и методов описания их фундаментальных физических свойств. В стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы, поставлены насущные задачи, в том числе «... бесперебойное обеспечение экономики электроэнергией, активное внедрение технологий «Зелёной экономики» во все сферы жизни, увеличение энергоэффективности ...»¹. Для выполнения поставленных задач большое научное значение имеет строительство новых производств на основе солнечной энергии, а также создание новых полупроводниковых материалов твердых растворов халькогенидов кадмия с

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

уникальными электрофизическими свойствами, необходимыми для разработки новых оптоэлектронных устройств.

Исследование настоящей диссертационной работы в определенной степени служит решению задач, изложенных в Указах Президента Республики Узбекистан № УП-60 от 28 января 2022 года «О стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы», постановлении Президента Республики Узбекистан «О мерах по повышению качества образования и совершенствованию научных исследований в области физики» от 19 марта 2021 года № ПП-5032, и Постановлении Кабинета министров Республики Узбекистан за № 452 «О мерах по ведению государственного учета установок возобновляемых источников энергии и вырабатываемой ими энергии» от 23 июля 2020 года, а также в аналогичных нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики. Данная диссертация выполнена в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий Республики Узбекистан ППИ-3 «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение, транспорт, машина- и приборостроение, развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники и электронного приборостроения».

Степень изученности проблемы. Во многих зарубежных научных центрах детально исследованы механизмы переноса тока, фотопроводимость, оптические спектры пленочных структур на основе CdS , $CdSe$, $CdTe$ и фотовольтаические свойства косонапыленных пленок $CdTe$, которые нашли практические применения в оптоэлектронике. К числу таких научных центров можно отнести Физический институт им. Лебедева и Физико-технический институт им. Иоффе РАН, Институт Физики полупроводников НАН Украины, Делавэрский университет США, National Institute for Materials Science (Япония), Вильнюсский университет им. В. Капсукаса и другие. Показано, что поликристаллические пленочные элементы из халькогенидов кадмия отличаются высокой фото- и тензочувствительностью, обусловленной наличием специфических объемных локальных центров с глубокими уровнями и особыми электронными свойствами зернограничной поверхности, существенно зависящими от технологии их изготовления.

Над разработкой технологии получения фоточувствительных пленок и исследованием их фундаментальных физических свойств интенсивно работали известные ученые Узбекистана. В результате оригинальных работ Э.А. Адировича и его учеников, как Т. Мирзамахмудов, Ю.М. Юабов, ферганских физиков Э.И. Билялова, А.Я. Афузова, Н.Х. Юлдашева, а также С.З. Шамирзаева, К.М. Доцанова разработаны технологии тонких пленок на основе халькогенидов кадмия и теоретически описаны особенности аномальных фотовольтаических эффектов в них. В экспериментальных работах Саидова М.С., Мирсагатова Ш. А., Разикова Т.М. и Каримова М.А. исследованы фотоэлектрические свойства и механизмы токопрохождения в тонкопленочных структурах халькогенидов кадмия.

Ранее в ряде поликристаллических образцов CdS была обнаружена аномальная температурная зависимость электропроводности, проявляющаяся в резком уменьшении темнового тока в определенном температурном интервале при нагревании полупроводника. В пленках $CdS:Cu:Cl$ падение темновой проводимости достигало 7 порядков величины в области температур $200\div 300$ °С. Однако причины появления этого эффекта разные авторы связывают с разными физическими факторами и единое законченное представление о механизме данного аномального явления до сих пор отсутствует. Механизм проводимости твердых сплавов $CdSe_xS_{1-x}$ под воздействием температуры и инфракрасного излучения изучен недостаточно. Также не исследована роль границ кристаллических зерен и термополевой миграции очувствляющих r - и s -центров в формировании свойств аномальных фоточувствительных $CdSe_xS_{1-x}$ и фотовольтаических $CdTe:In$ поликристаллических пленок.

Связь темы диссертации с тематическими планами научно-исследовательских работ. Диссертационная работа выполнено в Ферганском политехническом институте, в частности, в рамках перспективного научного плана института на 2020-2025 гг. по теме: «Новые фотоэлектрические и фотовольтаические явления в полупроводниковых тонкопленочных структурах халькогенидных соединений и разработка микроэлектронных фотопреобразователей».

Целью исследования является установление оптимальных технологических режимов получения пленочных структур на основе твердого раствора $CdSe_xS_{1-x}$ и $CdTe:In$ методом термического испарения в вакууме и новых фундаментальных фотоэлектрических свойств в них.

Задачи исследования:

получение фоторезистивных $CdSe_xS_{1-x}$ и фотовольтаических $CdTe:In$ поликристаллических пленочных структур;

исследование кинетики термического очувствления аномальной фотопроводимости и фотовольтаического свойства поликристаллических пленок $CdSe_xS_{1-x}$ и $CdTe:In$;

температурное и инфракрасное гашения фото- и темновой проводимости оптимально очувствленных поликристаллических пленок $CdSe_xS_{1-x}$;

роль границ зерен и очувствляющих r - и s -центров в люкс-амперной характеристике поликристаллических пленок $CdSe_xS_{1-x}$;

исследование роли термополевой миграции ионов индия и вакансий кадмия в формировании АФВ свойств пленки $CdTe:In$.

Объектом исследования выбраны поликристаллические пленки $CdSe_xS_{1-x}$ и $CdTe:In$, полученные на поверхности штатного стекла методом термовакуумного испарения.

Предметом исследования являются технологические процессы получения пленок $CdSe_xS_{1-x}$ и $CdTe:In$, а также электрофизические, фотоэлектрические и фотовольтаические явления в них.

Методы исследований: вакуумное испарение, термическая обработка, дифракция рентгеновского излучения, холловское измерение концентрации и

подвижности носителей заряда, методы анализа вольт-амперных, люкс-амперных, люкс-вольтовых, спектральных характеристик, широко применяемые в области физики твердого тела.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

Определены оптимальные режимы технологии получения фоторезистивных поликристаллических пленок $CdSe_xS_{1-x}$ и фотоэлектрических пленок $CdTe:In$, которые выращиваются на стеклянных подложках методом термического испарения при температуре $T_{п}=250-350$ °С с управлением скоростью испарения и толщиной, а также с последующей специальной термической обработкой;

обнаружен и объяснен сложный ход начального участка кривых Люкс-Амперный характеристики фоторезисторов $CdSe_xS_{1-x}$ с помощью теории фотопроводимости, основанной на барьерном механизме, учитывающем влияние поверхностных состояний границы кристаллических зерен на генерационно-рекомбинационные процессы в квазинейтральном объеме и области пространственных зарядов;

обнаружены температурное и инфракрасное гашения равновесной проводимости поликристаллических пленок $CdSe_xS_{1-x}$, обусловленных термополевой миграцией одно- и двузарядных вакансий кадмия;

Было установлено, что термическая обработка пленок CdTe, легированных индием, приводит к значительному повышению фотоэлектрических свойств образца. Это связано с термо-полевой миграцией ионов индия и вакансий кадмия, а также с эффектом самокомпенсации, возникающими во время процесса обработки. Анализ кинетики фотонапряжения в процессе термической обработки подтверждает это наблюдение.

Практические результаты исследования:

разработаны технологические режимы получения фоторезистивных $CdSe_xS_{1-x}$ и фотовольтаических $CdTe:In$ поликристаллических пленочных структур методом термовакуумного напыления;

определено целенаправленное изменение фотоэлектрических и фотовольтаических параметров тонких пленок $CdSe_xS_{1-x}$ и $CdTe:In$, отвечающих требованиям к параметрам дешевых и эффективных фотопреобразователей.

Достоверность результатов исследований обеспечивается использованием современных методов измерения и анализа физики твердого тела, соответствием полученных научных результатов с результатами работ других авторов, опубликованных в ведущих журналах, соответствием полученных экспериментальных результатов с теоретическими данными, интерпретацией в рамках апробированных физических моделей.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость полученных результатов заключается в том, что впервые экспериментально обнаружены эффекты "температурного и инфракрасного тушения равновесной проводимости" и "усиления фотоэлектрических свойств (АФВ) за счет термо-полевой миграции ионов" в

твердых растворах $CdSe_xS_{1-x}$ и легированных пленках $CdTe:In$. Эти открытия расширяют наши знания о фотоэлектрических и фотогальванических явлениях в физике твердого тела.

Практическая значимость исследования заключается в том, что разработанные методы получения фоточувствительных и фотоэлектрических пленок на основе твердых растворов $CdSe_xS_{1-x}$ и легированных пленок $CdTe:In$ могут быть использованы для создания недорогих оптоэлектронных устройств, таких как видеоконны, интегральные многоэлементные фотоприемники и фототранзисторы.

Внедрение результатов исследования.

На основе результатов разработки технологии получения и исследования фотоэлектрических свойств пленочных поликристаллических структур $CdSe_xS_{1-x}$ и $CdTe:In$:

разработанные методы исследования фотоэлектрических свойств поликристаллических тонких пленок $CdSe_xS_{1-x}$ и высоковольтной фото ЭДС в линейных периодических асимметричных структурах кристаллических зерен $CdTe:In$ использовались при выполнении научного проекта ОТ-Ф2-70 «Исследование и применение интеллектуальной (ИИ) системы возобновляемой энергии на основе больших данных» (руководитель проекта: д.т.н., доц. С.Алиев, Справка Андижанского института машиностроения №38- 03-2358 от 22 ноября 2024 г.). Использование научных результатов позволило проанализировать физические механизмы электронно-кинетических явлений в сильнолегированных полупроводниковых структурах при специфическом и направленном поглощении света;

Результаты исследования кинетики процессов повышения фоточувствительности и установления оптимальных технологических режимов получения поликристаллических фоторезистивных пленочных структур $CdSe_xS_{1-x}$ методом термовакуумного испарения были использованы при выполнении шифрованного (закрытого) практического проекта «Зенит» за 2022-2024 г. в рамках Государственных научных программ Министерство обороны Республики Узбекистан, (Справка № 57 от 9 января 2025г., Военный институт информационно-коммуникационных технологий и связи) использовано. Использование научных результатов позволило в определенной степени проанализировать полученные теоретические и экспериментальные данные по исследованию деформационных и оптических эффектов при оцифровке аналоговых систем управления бронетанковой техники.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертации были представлены и обсуждены на 7 международных научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов. По теме диссертации опубликовано 13 научных работ, из них 3 в научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций по философии, 1 в конференции, индексируемой в базе Scopus, 2 в международных научных

журналах с высоким Impact Factor, 8 в материалах международных конференций, проведенных в нашей стране, и 1 в материалах зарубежной конференции.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка использованной литературы, насчитывающего 130 наименований, и занимает 132 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении кратко обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, определена связь исследований с основными приоритетными направлениями развития науки и технологий в Республике Узбекистан, проведен краткий обзор научных работ по теме диссертации и степени изученности проблемы, сформулированы цели и задачи, выявлены объекты, предметы и методы исследования, изложена научная новизна исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта их теоретическая и практическая значимость, приведены сведения о внедрении результатов и апробации работы.

В первой главе «Современное состояние исследований фотопроводимости и фотовольтаических свойств пленок халькогенидов кадмия» приводятся краткий обзор работ по технологии изготовления и исследования фоточувствительных пленок из $CdSe$, CdS и фотовольтаических пленок $CdTe$ и результаты анализа текущей литературы по вопросам технологии получения, исследования свойств тонких поликристаллических пленок на их основе. Рассмотрены известные механизмы электропроводности, характерные особенности фотопроводимости и фотовольтаических свойств пленочных структур. На основе критического анализа известных результатов сформулированы цели и задачи диссертации.

Во второй главе «Разработка технологии получения и методики исследования пленок $CdSe_xS_{1-x}$ и $CdTe:In$ » рассмотрены вопросы технологии изготовления фоточувствительных пленок. Разработан способ изготовления фоточувствительной пленки из $CdSe$, $CdSe_xS_{1-x}$ методом термической обработки свежеприготовленной пленки в вакууме или в квазизамкнутой камере на воздухе в присутствии $CdCl_2$ или $CuCl_2$, обеспечивающий равномерную диффузию очувствляющих веществ. Также описаны особенности легирования индием косоапыленных пленок $CdTe:In$ и кинетика очувствления её фотовольтаических свойств.

Для получения пленок $CdSe_xS_{1-x}$ собрана вакуумная установка ВУП-5М на основе автоматического «ВАКМФ» 2НВР-5 ДМ форвакуумного насоса типа и паромасляного диффузионного насоса «ВАКМА» НВДМ-160, который обеспечивал давления $\sim 10^{-4}$ Торр (рис.1а). В качестве испарителя использованы тигли из окиси алюминия или бериллия, а в качестве подложек - стекло и слюда с прозрачными контактами.

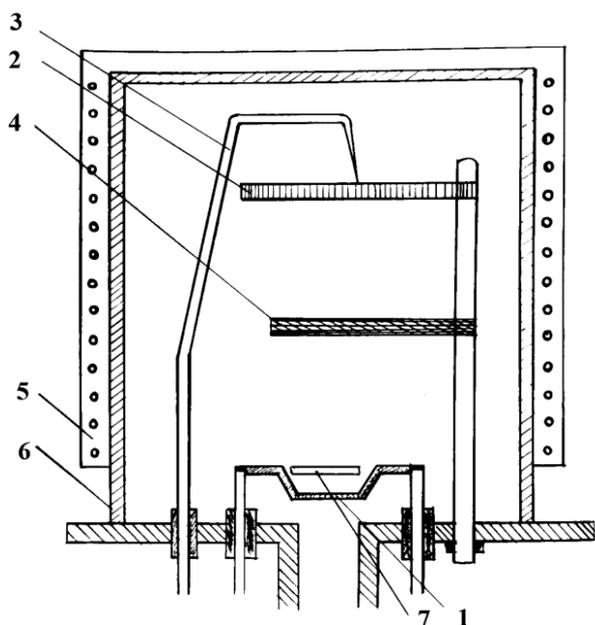


Рис.1а. Схематический вид вакуумной камеры для нанесения пленок $CdSe$, $CdSe_xS_{1-x}$. 1-испаритель, 2-подложкодержатель, 3-термопара, 4-заслонка, 5-печь, 6-кварцевый колпак, 7-материал.

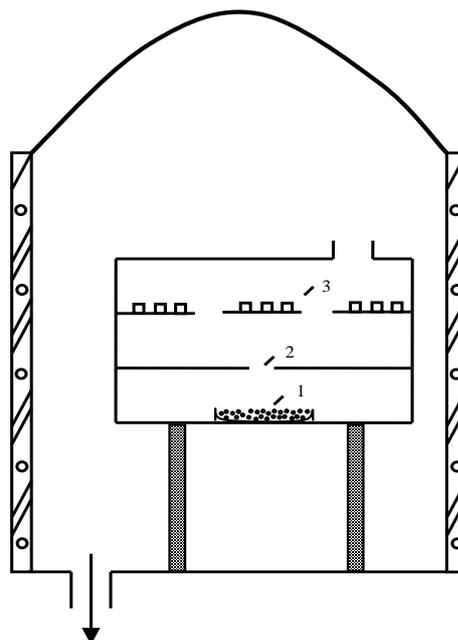


Рис.1б. Принципиальная схема камеры для ТО пленок $CdSe_xS_{1-x}$. 1-тигели; 2-отверстие для поступления паров $CdCl_2$ и $CuCl_2$; 3-свежеприготовленные образцы.

Температуру подложек и испарителя контролировали хромель-алюмелевыми термопарами, закрепленными непосредственно на них. После достижения вакуума $\sim 10^{-4}$ Торр производили обезгаживание подложек путем нагрева при $T=573$ К в течение 30 мин. Пленки $CdSe_xS_{1-x}$ получали испарением смеси $CdSe$ и CdS марки «для полупроводников» в различных соотношениях. Для увеличения фоточувствительности пленки подвергались термической обработке на воздухе, в вакууме и в различных газовых средах паров $CdCl_2$ или $CuCl_2$. Термическая обработка (ТО) свежеприготовленных пленок осуществлялась в специально сконструированной печи, состоящей из двух частей (**рис.1б**). Выбран оптимальный объем камеры, обеспечивающий необходимое парциальное давление паров очувствляющих веществ при 400-500 °С.

Таким образом удалось получить фоточувствительные слои в широком диапазоне толщин ($5 \div 20$ мкм) при температуре подложки $T=523 \div 673$ К. Результаты экспериментов показали, что на свойства образующихся пленок сильно действуют состав, предварительная обработка исходного материала и технологические параметры, особенно условия испарения и осаждения. Изменение температуры подложки существенно влияет на сопротивление пленок (**рис.2**). С повышением температуры подложки начинается отражение от поверхности подложки кадмия и состав становится более стехиометрическим и сопротивление пленок увеличивается. Эффективность влияния температуры подложки на сопротивление зависит от

предварительной обработки исходного материала перед испарением.

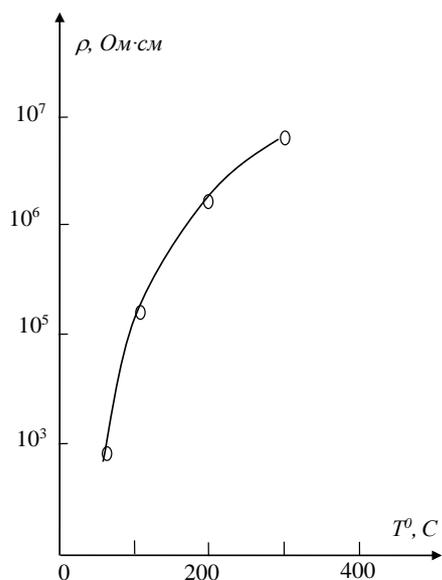


Рис.2. Зависимость удельного сопротивления пленки *CdSe* от температуры подложки.

Процесс легирования тонких косонапыленных слоев *CdTe* осуществлялся непосредственно во время их выращивания методом термического испарения в вакууме $10^{-4} \div 10^{-5}$ мм.рт.ст. путем препарирования *CdTe* и *In* из отдельных тиглов. Исходная масса напыляемой примеси обычно составляла $3 \div 7$ вес. % от массы основного полупроводникового соединения. Испарение *In* задерживалось на $2 \div 3$ мин. и прекращалось на $3 \div 5$ мин. раньше, чем испарение основного материала. Температура стеклянной подложки варьировалась в пределах $200 \div 500$ К. Свежеприготовленные поликристаллические образцы *CdTe:In* с толщиной $d \approx 0.8 \div 1.5$ мкм и площадью 5×20 мм² (скорость конденсации $v_k \approx 1.5 \div 2.0$ нм/с, угол напыления $30 \div 60^\circ$) оказались более

низкоомными и относительно слабо выражались аномальными фотовольтаическими свойствами ($V_{АФН} = 50 \div 100$ В). Однако после ТО в вакууме, на чистом воздухе или на воздухе в присутствии паров соактиватора *CdCl₂* сопротивление образцов в 2-3 раза увеличивалось, и в то же время при комнатной температуре они генерировали максимальное фотонапряжение до значений $(2 \div 4) \cdot 10^3$ В, т.е. на порядок больше, чем у специально нелегированных образцов *CdTe* (где $V_{АФН} = 200 \div 600$ В), а фототок короткого замыкания увеличивался более чем на два порядка и достигал до $I_{к.з.} \approx 10^{-8}$ А. Электрофизические и АФВ свойства отожженных пленок *CdTe:In* существенно стабилизируются. В случае ТО в вакууме или на воздухе в парах *CdCl₂* потребовались пленки с толщинами $1.2 \div 1.5$ мкм, а более тонкие пленки ($d < 1.0$ мкм) выходили из строя при такой ТО.

На рис.3 представлены кривые зависимости максимального значения фотонапряжения при стационарном освещении естественным светом лампы накалывания с интенсивностью $L \approx 10^4$ лк от времени ТО пленок на чистом воздухе при различных температурах отжига. Кривые 1 - 6 относятся к различным термообработанным *CdTe:In* образцам, полученным из одной вакуумно-технологической партии. Как видно из кривых 1 - 6 рис. 1, с ростом температуры отжига от 470 К до 770 К оптимальное время ТО уменьшается от 46 мин до 7 мин. Ход кинетики термического очувствления фотовольтаического свойства всех образцов обнаруживает одинаковую закономерность: сначала с ростом времени ТО монотонно растет значение $V_{АФН}$, достигает максимального значения $\sim 3.5 \cdot 10^3$ В, а при дальнейшей ТО

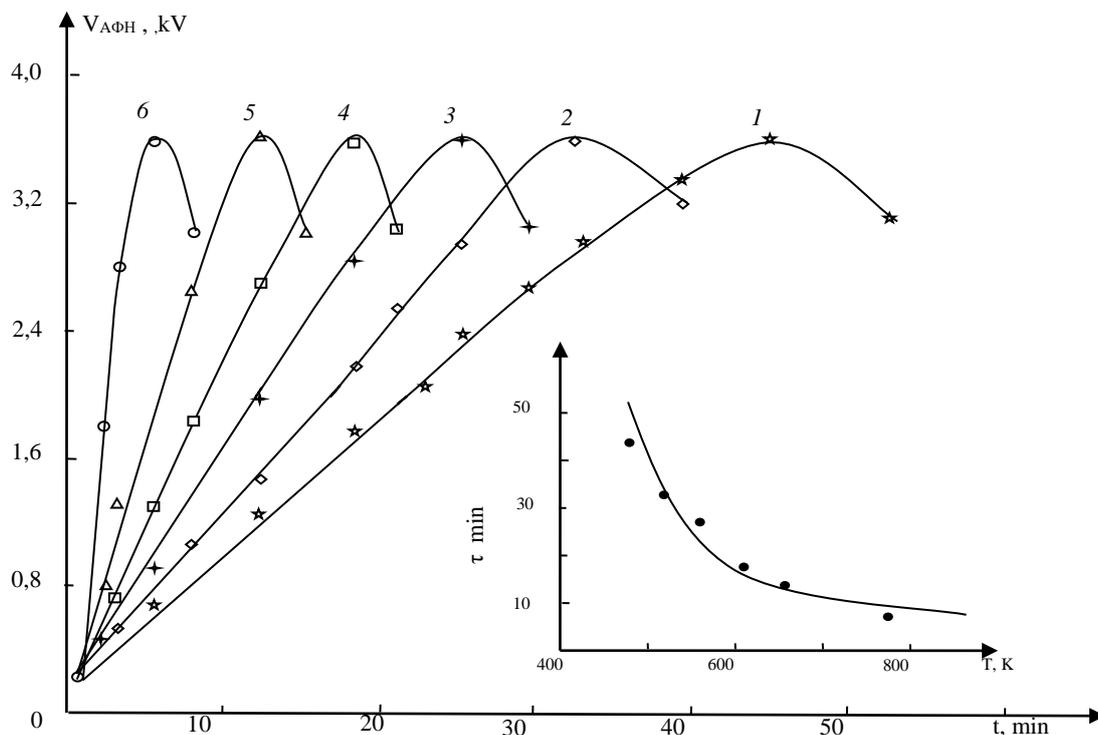


Рис.3. Зависимость напряжения фотополяризации $V_{AФН}$ при освещении естественным светом интенсивности $L \approx 10^4$ лк от времени ТО пленок $CdTe:In$ на воздухе при различных температурах T , К: 1 – 470, 2 – 520, 3 – 570, 4 – 620, 5 - 670, 6 – 770. На вставке приведена рассчитанная по кривым 1–6, зависимость оптимального времени ТО от температуры отжига.

значение $V_{AФН}$ со временем почти экспоненциально уменьшается. Разные характерные времена роста t_p и времени спада t_c в кинетике термоочувствления $V_{AФН}$ отражают разные скорости течения процессов термоочувствления и терморазрушения АФВ свойства пленок $CdTe:In$. Здесь интересно заметить, что ход кинетики термоочувствления кратности фоточувствительности ($K = \sigma_{\phi} / \sigma_{тем}$) фотопроводящих пленок $CdSe: Cd: Cu$ также обладает качественно аналогичным характером. Проведение именно такой аналогии проливает свет в заманчивой проблеме термоочувствления АФВ пленок $CdTe:In$. Кривая на вставке к рис.3 показывает, что время τ оптимального термоочувствления АФВ свойства пленки $CdTe:In$ почти экспоненциально падает с ростом температуры отжига пленки, а это, по-видимому, говорит о диффузионном характере кинетики термоочувствления.

Толщину пленок определяли с помощью интерференционного микроскопа ММИ-1, а в некоторых случаях методом взвешивания с точностью $\pm 0,5$ мкм. Структура образцов исследована на электронном микроскопе УЭМВ-100 В, фазовый состав - на рентгеновском аппарате УРС-50 и камерой 0,4 бсв-3 с медным анодом, для ионизационной регистрации дифракционных линий использовался счетчик $NaI(Te)$ и система счета импульсов на базе рентгеновского дифрактометра ДРОН-3.О.

Измерения эффекта Холла производились на установке, разработанной

в Институте физики полупроводников АН Литвы, которая позволяла измерить подвижность носителей заряда до $10^{-5} \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ и меньше. электропроводность (σ), эффективная подвижность ($\mu_{\text{эфф}}$) и концентрация носителей (n) определялись по формулам [164]

$$\sigma = \frac{c}{e \cdot d} \cdot \frac{J}{V_{\sigma}}, \quad (1)$$

$$n = \frac{1}{R_H e} = \frac{J_x B}{d V_y e}, \quad (2)$$

$$\mu_{\text{эфф}} = \frac{2 V_y c}{V_{\sigma} \cdot B \cdot e}, \quad (3)$$

где c , e , d , -длина, ширина и толщина образца соответственно, J_x – плотность тока через образец, V_{σ} -падение напряжения между электродами для измерения электропроводности, V_y - холловское напряжение, e -заряд электрона, R_H - универсальная холловская постоянная, B -напряженность магнитного поля ($\sim 0,1 \text{ Т}$). Установка позволяла провести измерения в интервале температур $100 \div 500 \text{ К}$ при различных интенсивностях падающего света.

В третьей главе «Исследование электрофизических и фотоэлектрических свойств фоторезистивных пленок $\text{CdSe}_x\text{S}_{1-x}$ » исследованы кинетика очувствления фотопроводимости в условиях термополевой миграции точечных центров и влияние термической обработки на люкс-амперные характеристики (ЛАХ) свежеприготовленных и оптимально очувствленных поликристаллических пленок из твердого раствора $\text{CdSe}_x\text{S}_{1-x}$, выяснен механизм очувствления этих пленок и природа г- и s-центров. Описаны основные особенности новых эффектов - инфракрасное и температурное гашение равновесной проводимости для поликристаллических пленочных образцов. Экспериментальные результаты интерпретированы на основе модели полупроводниковой пленки с межгранульными потенциальными барьерами.

Исследовались поликристаллические пленки $\text{CdSe}_{0,8}\text{S}_{0,2}$, размерами $5 \times 25 \text{ мм}^2$ толщиной $5 \div 10 \text{ мкм}$, полученные со скоростью роста $80 \div 10 \text{ \AA/s}$ при испарении порошка CdSe в квазизамкнутом вакууме $10^{-4} \div 10^{-5} \text{ Торр}$ на нагретую до $523 \div 573 \text{ К}$ стеклянную подложку. После напыления пленки термообрабатывались тремя способами, а именно-отжигались в вакууме 10^{-4} Торр при температуре 750 К в течение ~ 90 мин. на воздухе в течение $15 \div 20$ мин и на воздухе в присутствии паров CdCl_2 или CuCl_2 при температуре $750 \div 800 \text{ К}$ в течение $6 \div 8$ мин. Изготовленные таким образом пленки оказались сильно компенсированными (темновая удельная проводимость $\rho_T \approx 10^5 \div 10^6 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ при 300 К) и обладали высокой фоточувствительностью

(соответствующая удельная фотопроводимость $\rho_{cb} \approx 10 \div 10^2$ Ом·м при интенсивности естественного света $\sim 10^2$ лк).

Оптимальное время ТО определялось из зависимости темновой и световой удельной проводимости от времени ТО при фиксированной температуре отжига (**рис.4**). Ход кинетики термоочувствления пленок вне зависимости от способа ТО обнаруживает одинаковую закономерность: сначала со временем ρ_T монотонно увеличивается (ρ_{cb} - уменьшается), при $t = \tau_{on}$ достигает максимума (ρ_{cb} - минимума), а затем резко уменьшается (увеличивается). Все термообработанные пленки $CdSe_{0.8}S_{0.2}$ при $t = \tau_{on}$ обладали максимальной кратностью изменения удельной проводимости $K = \sigma_{ph}/\sigma_d \approx 10^3 \div 10^5$, которые в дальнейшем называем «оптимально чувствленными».

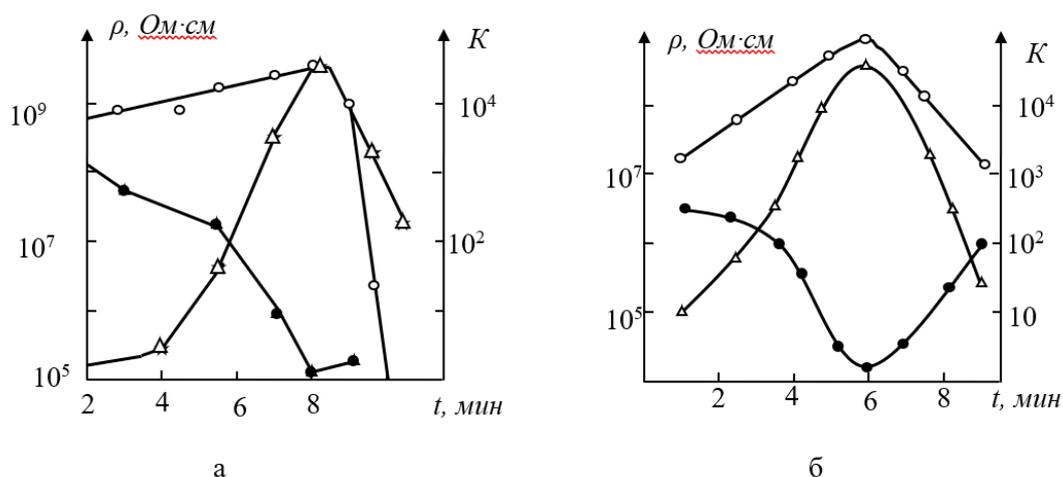


Рис.4. Зависимость ρ_T (○), ρ_{cb} (●), K (△) пленки $CdSe_{0.8}S_{0.2}$ от времени отжига при термообработке на воздухе в присутствии $CdCl_2$ (а) и $CdCl_2(0,8) + CuCl_2(0,2)$ (б) ($L=10^2$ лк).

М
ех
ан
из
м
оч
ув
ст
вл
ен
ия
фо
то
пр
ов

одимости качественно можно бьяснить следующим образом. Термические миграционные процессы в поликристаллических пленках протекают в присутствии сильных электростатических полей приграничных областей объемных зарядов кристаллических зерен, т.е. в условиях **термополевой миграции ионов**. В начальные моменты ТО поток атомов кадмия из объема кристаллитов в вакуум больше аналогичного потока селена и серы, т.е. с течением времени концентрация вакансий кадмия V_{Cd} увеличивается, что приводит к увеличению удельного темнового сопротивления пленки. Известно, что вакансия кадмия создает в запрещенной зоне два акцепторных уровня, являющихся соответственно центрами быстрой (**s-центр**) и медленной (**r-центр**) рекомбинаций, которые немедленно захватывают электроны из мелкого донорного уровня и частично их компенсируют (**рис.5**). С течением времени степень компенсации донорных центров увеличивается и соответственно монотонно растет удельное темновое сопротивление пленки. Однако с определенного момента ТО наступает

наибольшая компенсация донорных центров (V_{Se}^{+I}) и, следовательно, с этого момента происходит насыщение темнового сопротивления. Условия этого процесса можем записать как

$$\frac{N_d(t) - N_r(t)}{N_s(t)} = const, \quad (4)$$

где $N_r(t)$, $N_s(t)$, $N_d(t)$ - концентрации центров медленной, быстрой рекомбинации и донорных центров. Уменьшение времени насыщения ρ_T с увеличением температуры отжига объясняется увеличением кинетической энергии атомов на узлах решетки, что приводит к возрастанию темпа термополевой миграции ионов, а значит, и вакансиобразования в решетке кристаллических зерен. Естественно ожидать, что процесс очувствления пленки происходит, начиная с момента выполнения условий

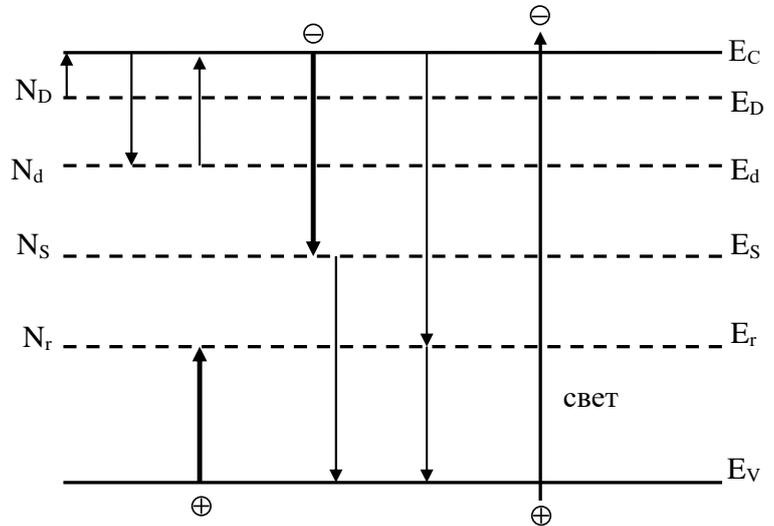


Рис. 5. Схема энергетических уровней в запрещенной зоне и возможные электронные переходы.

$$\frac{P_s}{N_r} < 1, \quad \frac{N_D - N_r}{N_s} \leq 1 \quad (5)$$

(где P_s - число незанятых состояний s -центров). При достижении условия

$$\frac{N_D(t) - N_r(t)}{N_s(t)} = const < 1 \quad (6)$$

световое сопротивление, а также фоточувствительность (ФЧ) пленки уже не зависят от времени отжига и наступает оптимальное очувствление пленки. При освещении пленки, полностью заполненной электронами r -центры с большей вероятностью, захватывают дырки из валентной зоны, а s -центры интенсивно захватывают свободных электронов. В результате электроны, находящиеся первоначально в r -центрах, как бы переходят в центры быстрой рекомбинации, что приводит к резкому увеличению времени жизни и соответственно - концентрации электронов в зоне проводимости.

Далее рассмотрены ЛАХ поликристаллических пленок $CdSe_{0.8}S_{0.2}$ в зависимости от технологии изготовления и способа ТО в условиях термополевой миграции ионов. На **рисунках 6а и 6б** приведены ЛАХ свежеприготовленного и оптимально очувствленного образцов при различных

температурах и напряжениях в двойном логарифмическом масштабе. Видно, что отдельные линейные участки ВАХ можно описать зависимостью

$$I_{ph} = AL^\alpha \quad (7)$$

Показатель α ЛАХ не только в разных образцах, но и для одного и того же фоторезистора в зависимости от диапазона интенсивностей света может принимать различные значения. Различают три случая: $\alpha=1$ (линейный), $\alpha < 1$ (сублинейный) и $\alpha > 1$ (сверхлинейный).

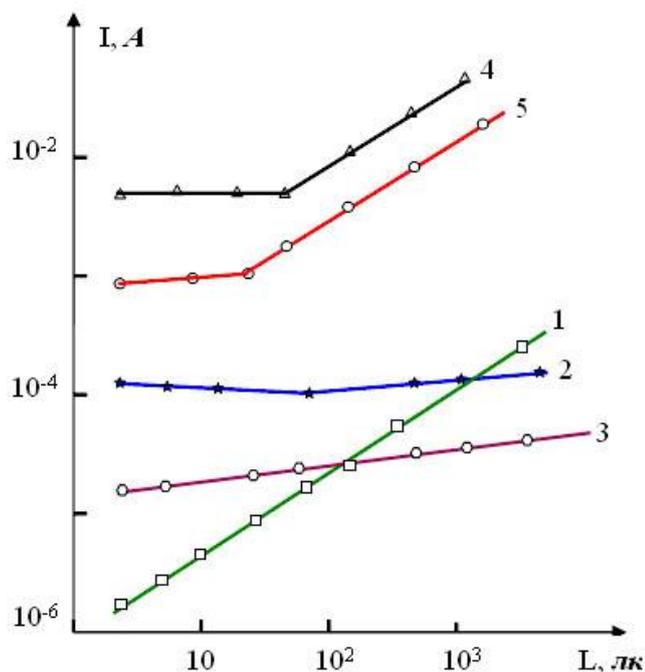


Рис.6а. ЛАХ свежеприготовленной пленки $CdSe_{0.8}S_{0.2}$ при различных температурах и напряжениях: $T=200$ (кривая 1), 300 (3, 5), 323 (2, 4) К; $U=5$ (кривая 2, 3), 10 (1, 4, 5) В.

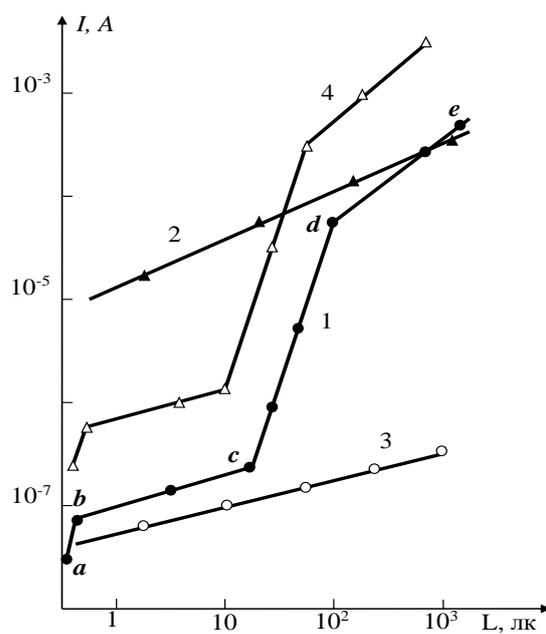


Рис.6б. ЛАХ пленок $CdSe_{0.8}S_{0.2}$, очувствленными способами “вакуум+ $CdCl_2$ ” (1-3) и “воздух+ $CdCl_2$ ” (4) при $T=300$ (1, 4), 210 (2) и 350 (3) К.

ЛАХ оптимально очувствленных образцов $CdSe_xS_{1-x}$ при $T=300$ состоит из трех участков (рис.6б, кривые 1 и 4). Однако в отличие от случая монокристаллов при низких освещенностях наблюдается сначала линейная, затем сублинейная ЛАХ с $\alpha \sim 0,5$ (область низкой ФЧ). Начиная с освещенности $L \sim 10$ лк фототок резко возрастает с показателем ЛАХ больше единицы (область средней ФЧ, $\alpha \sim 3,5$). При дальнейшем увеличении интенсивности света ЛАХ переходит в линейную зависимость (область высокой ФЧ). Область изменения интенсивности света, соответствующая сверхлинейную ЛАХ, распространяется не более чем на один порядок. Это дает возможность заключить, что концентрация вакансий центров рекомбинации не зависит от концентрации свободных электронов ($n \gg P_r, P_s$). Показано, что для ЛАХ образцов, отожженных в течение времени, большим

времени оптимального очувствления, реализуется случай, когда $m = \text{const } n^k$ (где $k < 1$, n и m — концентрации свободных и находящихся на уровнях электронов) и ФЧ образца падает во всей области значения интенсивности света.

Для более детального анализа особенностей ЛАХ, рассмотренной выше, дополнительно измерялись зависимости $\mu(L)$ и $n(L)$. Установлено, что при низких интенсивностях света подвижность электронов μ увеличивается сначала с показателем степени $\gamma \approx 1$ (т.е. затем $\mu \sim L^\gamma$), затем — с $\gamma \approx 0,5$ а концентрация их почти не меняется (рис.7). Начиная с интенсивности света $L \approx 10 \div 15$ лк концентрация электронов начинает сильно возрастать ($n \sim L^\beta$, $\beta \approx 2.8$), при этом μ далее почти не изменяется с увеличением интенсивности освещения. На основе этих зависимостей можно заключить, что в темноте и при низких освещенностях в пленках $CdSe_xS_{1-x}$ реализуется барьерный (μ -) механизм

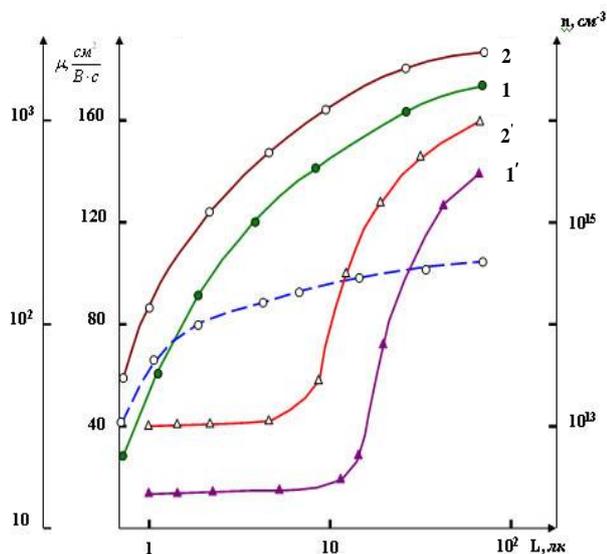


Рис. 7. Зависимости подвижности (1, 2) и концентрации (1', 2') электронов от интенсивности света для пленок $CdSe_xS_{1-x}$, очувствленных методами «вакуум- $+CdCl_2$ » (1, 1'), «воздух+ $CdCl_2$ » (2, 2') и зависимость $\mu(L)$ в двойном логарифмическом масштабе (пунктирная кривая) для пленок, очувствленных методом «воздух + $CdCl_2$ ».

проводимости, при высоких уровнях освещенности, по-видимому, перестает играть решающую роль μ -механизм, на который указывает слабая зависимость μ от L . Поэтому для точного расчета стационарной фотопроводимости поликристаллических образцов следует исходить из модели, учитывающей барьерный и концентрационный (n -) механизмы фотопроводимости.

Оказалось, что оптимально очувствленные поликристаллические пленки $CdSe_xS_{1-x}$ обнаруживают аномальную температурную зависимость темновой электропроводности σ_T : в интервале $150 \div 300$ К с ростом температуры σ_T падает на $3 \div 5$ порядка. Это явление мы называем **температурным гашением темновой** (равновесной или исходной) **проводимости** (ТГТП), т.к. оно по многим свойствам проявляется аналогично явлению температурного гашения фотопроводимости (ТГФ). В отличие от известных работ, в пленках $CdSe_xS_{1-x}$ впервые обнаружена высокая отрицательная примесная фотопроводимость, т.е. **инфракрасное гашение темновой проводимости** (ИКГТП).

Показано, что ТГТП и ИКГТП наблюдаются исключительно в оптимально фотоочувствленных образцах с *r*- и *s*-центрами рекомбинации, и эффективно действующими межкристаллитными барьерами. Эти эффекты отсутствовали в свеженапыленных пленках с мелкозернистой структурой и толщиной, меньшей 1 мкм. Причем ТГТП и ИКГТП происходит почти в одних и тех же температурных (150÷300 К) и спектральных (1.0÷3.0 мкм) диапазонах. Зависимость $\sigma_T(T)$ также, как и $\sigma_{св}(T)$, состоит из двух участков — медленно спадающего с энергией активации $E_{rr} \sim 0.14-0.4$ эВ (150÷230 К) и резко спадающего с $E_r \sim 0.6 \div 1.0$ эВ (230÷300 К). ИКГТП заметно проявляется при $T < 300$ К и слабых интенсивностях ИК света $I_{ir} < 10^{-1}$ лк, в примесном спектральном интервале поглощения 1.0÷3.0 мкм, а при $I_{ir} < 10^{-1}$ лк, наблюдается ярко выраженная примесная фотопроводимость.

Исследованные образцы $CdSe_xS_{1-x}$ ($CdCl_2$) при $T=300$ К содержат следующие типы точечных дефектов: *r*-центры с энергией активации $E_r = E_v + (0.62 \pm 0.04)$ эВ, концентрацией $N_r \leq 10^{17}$ см⁻³ и сечением захвата для дырок $S_{pr} \cong 10^{-14}$ см²; глубокие ловушки с параметрами: активации $E_t = E_c + (0.30 \pm 0.04)$ эВ, $N_t = 10^{14}$ см⁻³, $S_{nt} \approx 10^{-18}$ см² и центры быстрой рекомбинации с энергией $E_s = E_v + (0.90 \pm 0.04)$ эВ, а также дополнительный уровень фотоочувствительности E_{rr} .

Гашение темнового тока удобно характеризовать относительной величиной

$$\Gamma = (j_0 - j)/j_0, \quad (8)$$

где j_0 и j — плотности тока при отсутствии и при наличии ИК излучения (или температурного гашения). Как видно из рис.8, с ростом температуры максимум и полуширина спектра ИКГТП уменьшаются, причем его красная граница существенно смещается в коротковолновую сторону. При $T=150$ К спектр ИКГТП, также, как и спектр инфракрасного гашения фотопроводимости (кривая 1'), явно обнаруживает дублетную структуру с красной границей $\lambda_r = 2.8$ мкм.

Предложен следующий механизм ТГТП и ИКГТП. В равновесном состоянии из-за искривления энергетических уровней вверх в окрестности границы раздела соседних кристаллитов и при эффективном действии

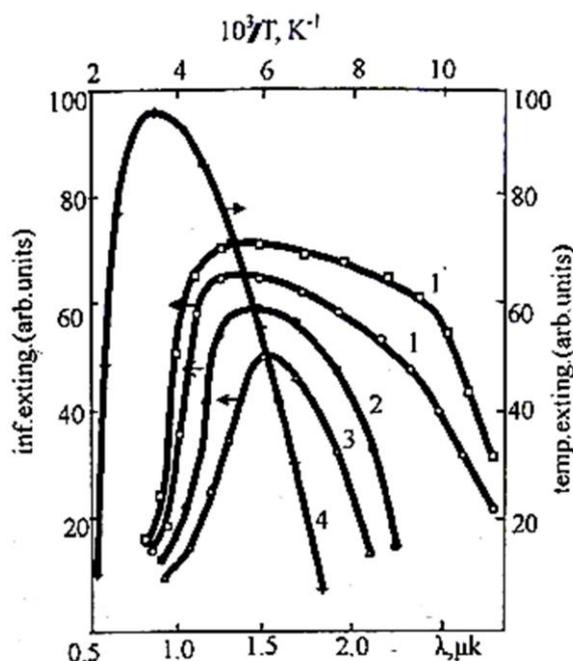


Рис.8. Спектры ИК гашения равновесной проводимости Γ_{IRT} пленок $CdSe_xS_{1-x}$ при температурах T , К: 1-150, 2-200, 3-250. Кривая 1'-спектр ИКГФ, а 4- температурная зависимость ТГТП Γ_T при $T=150$ К.

поверхностных акцепторных уровней рекомбинационные r -центры в области пространственного заряда в отличие от квазинейтрального объема оказываются частично заполненными, а s -центры, связанные

двухкратнозаряженной вакансией кадмия V'_{Cd} и опустошаются и превращаются в однозарядное состояние V_{Cd} (r -центр), что приводит к увеличению концентрации r -центров в области границы раздела (рис.9). Поглощение фотонов при ТГТП или квантов ИК излучения при ИКГТП в области пространственного заряда может вызывать переходы электронов из валентной зоны на пустые уровни r -центров. Образованная при этом свободная дырка будет участвовать в процессах рекомбинации со свободными электронами зоны проводимости через r - и s -центры, либо через поверхностные уровни, в результате чего средняя концентрация равновесных электронов проводимости, а значит, и темновая проводимость уменьшаются.

В заключение гл. III отмечено, что исследованные поликристаллические образцы $CdSe:Cd:Cu:Cl$ могут быть применены в качестве термических переключателей в интервале $T=150\div 300\text{ K}$ и приемников слабого ИК излучения в диапазоне $\lambda=1\div 3\text{ мкм}$ при $T < 300\text{ K}$.

Четвертая глава «Электрофизические и оптические свойства пленок $CdTe:In$ » диссертации посвящена исследованию АФВ эффекта в легированных примесями In , Cl тонких поликристаллических слоях $CdTe$ с целью повышения рабочей мощности пленок как источника фото-ЭДС и выяснения роли фоточувствительных центров в генерации АФН. Здесь, в частности, показано, что в отличие от Ag термополевая миграция (ТПМ) ионов In^{+i} , Cl^+ и вакансий кадмия V_{Cd}^{-j} во внутрикристаллических полях может существенно стимулировать АФВ свойства пленок $CdTe:In$, Cl . Приведены результаты исследования электрофизических и оптических свойств пленок $CdTe:In$. ВАХ пленки $CdTe:In$ (рис.10) в темноте (кривые 1 и 2) и под действием света (1' и 2) показывает, что ТО приводит к заметному увеличению темнового сопротивления и резкому росту значения $V_{АФН}$, значительно уменьшая при этом интегральную фотопроводимость пленки.

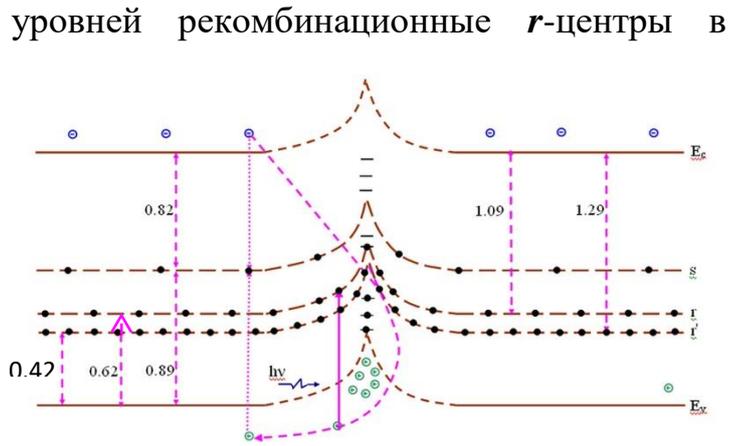


Рис.9. Модель бикристалла с объемными r - и s -центрами рекомбинации и схема электронных переходов, приводящих к температурному или ИК-гашению темновой проводимости.

В результате ТО фототок короткого замыкания пленки $CdTe:In$ уменьшается почти в два раза, тогда как световое сопротивление увеличивается почти на два порядка. Это означает, что в этих пленках механизмы формирования АФН и фотопроводимости сильно отличаются. Световые сопротивления при $L \approx 10^3$ лк пленок $CdTe$, $CdTe:In$ – свежеприготовленной и $CdTe:In$ – отожженной имели значения $R_{св.} = 2 \cdot 10^{12}$, $3 \cdot 10^9$ и $2 \cdot 10^{11}$ Ом, соответственно.

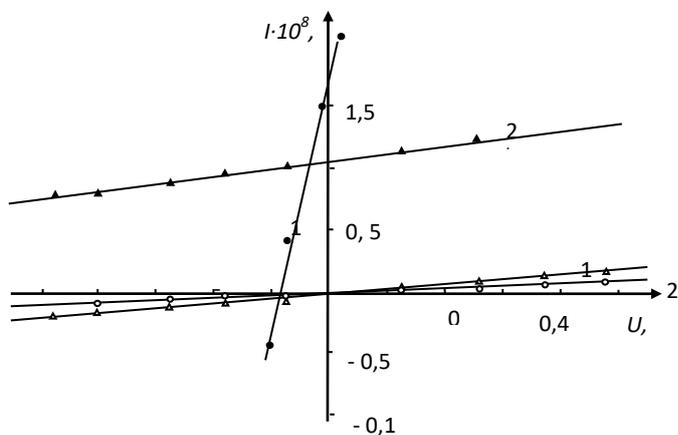


Рис.10. Вольт-амперные характеристики поликристаллической пленки $CdTe:In$ до (кривые 1 и 1') и после (2 и 2') ТО, снятые при комнатной температуре. Кривые 1', 2' являются световыми ВАХ при $L = 10^4$ лк.

пленок $CdTe:In$ при комнатной температуре методами фотохолловских измерений и анализ ЛАХ, термостимулированного тока показало, что оптимальные по значению $V_{АФН}$ концентрации In и вакансий кадмия V_{Cd} составляют $\sim 10^{17} \div 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Средняя концентрация и дрейфовая подвижность электронов варьируются при этом в пределах $10^{10} \div 10^{12} \text{ см}^{-3}$ и $50 \div 250 \text{ см}^2 / \text{В} \cdot \text{с}$, т.е. отожженная пленка $CdTe:In$ представляет собою сильно неоднородную структуру из сильно компенсированного полупроводника.

Развита модель ТПМ ионов для объяснения термического очувствления АФВ свойства пленок $CdTe:In$. Поликристаллическую пленку в направлении прохождения тока представим как линейную периодическую цепочку кристаллических зерен (КЗ) с асимметричными поверхностными электрическими свойствами слева и справа от диэлектрического слоя (ДС) между ними. Образование равновесных асимметричных приповерхностных потенциальных барьеров с обеих сторон ДС, т.е. – контактной разности потенциалов $\psi_0 = (\varphi_{01} - \varphi_{02}) / e$ в каждом КЗ (рис.11) обуславливает генерации высоковольтной фото-ЭДС в линейной цепочке зерен при освещении:

$$V_{АФН} = (N - 1) \frac{\psi_0 - \psi}{e}, \quad (9)$$

где N - число периодически расположенных КЗ вдоль пленки, $\psi_0 = \varphi_{01} - \varphi_{02}$ и $\psi = \varphi_1 - \varphi_2$; φ_{0i} и φ_i - высоты поверхностных потенциальных барьеров до и после воздействия света (слева ($i=1$) и справа ($i=2$) от ДС).

Они генерировали $V_{АФН} \approx 200 \text{ В}$, 60 В и 2000 В , следовательно, мощности этих фотогенераторов, пропорциональной $V_{АФН}^2 / R_{св.}$, относились как, $18:25:5000$. Таким образом, мощность легированных In АФН-пленок из $CdTe$ после термообработки увеличивается более чем на два порядка.

Изучение электрофизических свойств отожженных

Согласно данной модели можно заключить, что путем развития степени асимметричности этих барьеров (φ_{01} и φ_{02}) с помощью определенных технологических приемов можно увеличить максимальное значение $V_{АФН}$. Легирование с примесью In и последующая ТО косонапыленных пленок $CdTe$ является одним из таких технологических решений.

Образования вакансий, примесных комплексов и их миграция при ТО косонапыленных поликристаллических слоев $CdTe$ сильно отличаются от аналогичных процессов в массивных кристаллах и в обычных поликристаллических пленках. Так, внутрикристаллическое электрическое поле ОПЗ, в исследуемых пленках $CdTe:In$ вызывает дрейф положительно заряженных атомов индия In_i^{+i} по вакансиям кадмия, направленный из объема в сторону поверхности КЗ, и обратно направленный дрейф отрицательно заряженных вакансий кадмия от поверхности зерна в сторону его объема. В результате таких встречных ТПМ ионов In^{+i} и вакансий V_{Cd}^{-j} формируется их неоднородное пространственное распределение:

$$N_{In^{+i}}(x) = N_{In^{+i}}(0) \cdot e^{\frac{e\varphi(x)}{kT}}, \quad N_{V_{Cd}^{-j}}(x) = N_{V_{Cd}^{-j}}(0) \cdot e^{-\frac{e\varphi(x)}{kT}}, \quad (10)$$

что вызывает обратный поток биполярной диффузии этих точечных дефектов. Здесь $N_{In^{+i}}(0)$ и $N_{V_{Cd}^{-j}}(0)$ - концентрация ионов In^{+i} и вакансий V_{Cd}^{-j} на границе между квазинейтральным объемом и ОПЗ. Следует отметить, что ТПМ In^{+i} и V_{Cd}^{-j} по обе стороны диэлектрического слоя происходит в асимметричных электрических полях, в результате чего количество атомов In^{+i} , выходящих на границу КЗ, слева от ДС будет значительно больше, чем справа. В барьерных областях l_1 и l_2 (см. рис.11) осуществляются асимметричные ТПМ и электродиффузия ионов под действием встроенных внутрикристаллических электростатических полей.

Оптимальное время (τ) термоочувствления $V_{АФН}$, также как и время очувствления фотопроводимости, определяется условием наибольшей компенсации доноров и акцепторов в объеме и на поверхности КЗ:

$$\frac{N_{In^{+i}}(0,t) - N_{V_{Cd}^{-j}}(0,t)}{N_{V_{Cd}^{-j}}(0,t)} \ll 1, \quad (11)$$

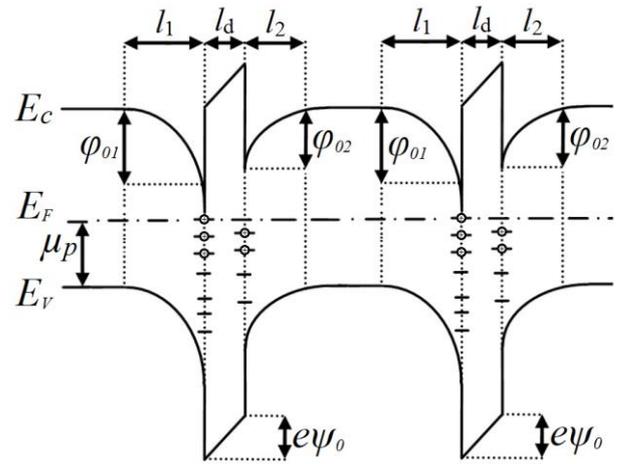


Рис.11. Энергетическая зонная диаграмма цепочки кристаллических зерен с асимметричными потенциальными барьерами на границе кристаллитов с порами для нелегированной АФВ-пленки в состоянии термодинамического равновесия.

$$\frac{N_{In^+}(0,t) \cdot e^{\frac{2\varphi_{0i}}{kT}} - N_{Cd^-}^j(0,t)}{N_{Cd^-}^j(0,t)} \ll 1 \quad . \quad (12)$$

Процессы ТПМ и электродиффузии заряженных дефектов в ОПЗ (см. рис. 11, $0 \leq x \leq l_1$ и $0 \leq x \leq l_2$) при линейном непрерывном пределе вдоль оси x можно описать системой уравнений:

$$\frac{\partial N_\alpha^i(x,t)}{\partial t} = D_\alpha \frac{\partial^2 N_\alpha^i(x,t)}{\partial x^2} + \mu_\alpha \frac{\partial}{\partial x} \left(N_\alpha^i(x,t) \frac{\partial \varphi_i(x,t)}{\partial x} \right) + \gamma_\alpha (N_{m_{cd}} - \sum_\alpha N_\alpha^i(x,t)), \quad (13)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi_i(x,t)}{\partial x^2} = \frac{e}{\varepsilon \varepsilon_0} \left(n_i(x,t) - p_i(x,t) + \sum_\alpha z_\alpha N_\alpha^i(x,t) \right), \quad (14)$$

$$\int_0^{l_i} \left(n_i(x,t) - p_i(x,t) + \sum_\alpha z_\alpha N_\alpha^i(x,t) \right) dx = \sum_\beta z_\beta N_{s\beta}^i(t). \quad (15)$$

Здесь N_α^i , D_α , μ_α , z_α и γ_α - концентрация, коэффициент диффузии, подвижность, эффективный заряд и коэффициент скорости термической генерации α - заряженного центра (например, $\alpha=1$ для In_i^+ и $\alpha=2$ для V_{Cd}^-); n и p - концентрация свободных электронов и дырок, $N_{s\beta}^i$ - концентрация поверхностного β - уровня с зарядовым состоянием, z_β , e - абсолютное значение заряда электрона, ε_0 -электрическая постоянная, ε - диэлектрическая проницаемость КЗ.

Система уравнений (13)-(15) можно численно решить методом разностных схем. Однако мы ограничивались исходя из рис.3, грубой оценкой коэффициента биполярной диффузии центров (In_i^+) и (V_{Cd}^-). Если при этом допустить, что время оптимального очувствления $V_{A\Phi H}$ обратно пропорционально коэффициенту миграции (электродиффузии) индия (In_i^+)

(или вакансий кадмия (V_{Cd}^-))

$\tau \sim D^{-1} \sim \exp(\Delta E_D / kT)$, то для D из кривой вставки получим при $T=800$ K значение $D \sim 10^{-12} \text{ см}^2 / \text{с}$, что неплохо согласуется с литературными данными.

Далее анализом спектральной зависимости фототока короткого замыкания $I_{к.з.}(h\nu)$ методом Луковского выявлены следующие глубокие локальные центры: $E_1 = E_v + (0.06 \pm 0.02)$ эВ, $E_2 = E_v + (0.18 \pm 0.02)$ эВ, $E_3 = E_v + (0.47 \pm 0.02)$ эВ, $E_4 = E_c - (0.15 \pm 0.02)$ эВ, $E_5 = E_c - (0.75 \pm 0.02)$ эВ, причем уровни E_2 и E_3

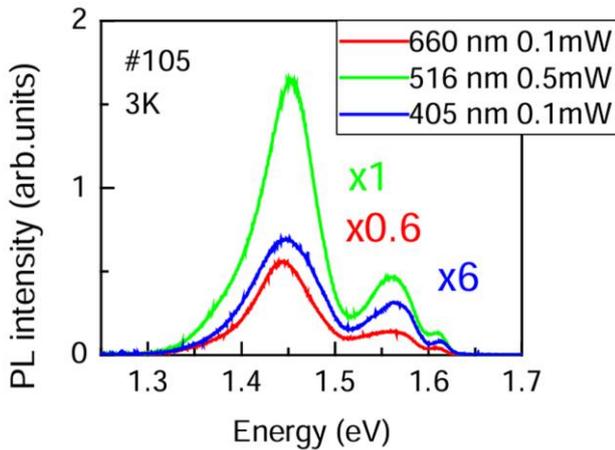


Рис.12. Спектр фотолюминесценции пленки $CdTe:In$ при температуре 3 К в зависимости от частоты и мощности лазера.

присутствуют во всех образцах, а E_1 - лишь в нелегированной пленке $CdTe$,

уровни E_4 и E_5 - в легированных $CdTe:In$. Известно, что уровни E_1 и E_3 создаются одно – и двукратно заряженными вакансиями кадмия (V_{Cd}^- , V_{Cd}^{2-}), а уровень E_2 - междоузельным Te_i , тогда как, естественно ожидать, что за уровни E_4 и E_5 ответственны комплексные центры с участием In^{+i} .

Приведены результаты исследования свойств пленки $CdTe:In$ с АВФ свойством, природу и механизма образования АФН в ней методом низкотемпературной фотолюминесценции **рис.12**. Спектр люминесценции пленок $CdTe:In$ в окрестности края собственного поглощения при температуре 3-5 K показывает, что основная широкая линия люминесценции для всех образцов обусловлена излучательной рекомбинацией с участием примесей, также обнаруживается линия с тонкой структурой, связанная с рекомбинацией горячих фотоносителей в областях объемных зарядов КЗ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании полученных результатов по определению оптимальных технологических режимов получения тонкопленочных структур на основе твердых растворов $CdSe_xS_{1-x}$ и легированного $CdTe:In$ методом вакуумного термического испарения и установлению новых фундаментальных фотоэлектрических свойств в них, можно сделать следующие основные выводы:

1. Разработан метод получения пленок $CdSe_xS_{1-x}$ и $CdTe:In$ с высокой fotocувствительностью, изготовленных методом вакуумного термического испарения, с последующей оптимальной термообработкой в специальной квазигерметичной камере в вакууме (480 °C), на воздухе (470 °C) и в присутствии паров $CdCl_2$ или $CuCl_2$ (300 °C). Это обеспечило равномерное распределение центров чувствительности и стабильные, воспроизводимые электрофизические свойства.
2. Исследована кинетика процессов термообработки в различных средах для свежевыращенных пленок $CdSe_{0.8}S_{0.2}$ и $CdTe:In$. Установлено, что при оптимальном соотношении концентраций $CdCl_2$ и $CuCl_2$ 0.8:0.2 время повышения чувствительности сокращается до (3-7) минут.
3. В fotocувствительных поликристаллических пленках $CdSe_xS_{1-x}$ в диапазоне температур 77÷523 К наблюдались температурная зависимость равновесной проводимости и явление инфракрасного гашения. Это явление объясняется перезарядкой глубоких r - ($E_r \sim 0.14-0.4$ эВ) и s - ($E_s \sim 0.6 \div 1.0$ эВ) центров рекомбинации в пространственно-зарядовой области и модуляцией дрейфовых барьеров на границах этой области и кристаллитов под действием нагрева или инфракрасного излучения.
4. Термическое $\sigma_T(T)$ гашение равновесной проводимости происходит в диапазоне температур 150÷300 К, а инфракрасное $\sigma_{ИК}(T)$ гашение – в спектральном диапазоне 1.0÷3.0 мкм. Кривая термического $\sigma_T(T)$ гашения состоит из двух частей: медленного (150÷230 К) и резкого спада (230÷300 К). Инфракрасное гашение равновесной проводимости проявляется заметно только при температурах $T < 300$ К и низких интенсивностях $I_{ИР} < 10^{-1}$ лк в интервале спектрального поглощения 1.0÷3.0 мкм, а при $I_{ИР} > 10^{-1}$ лк наблюдается примесная фотопроводимость.
5. Показано, что при отжиге тонких пленок $CdSe_{0.8}S_{0.2}$ в воздухе паров $CdCl_2$ в течение ~4 минут fotocувствительность возрастает до $S \approx 10^4$. Это обусловлено термополевой миграцией глубоколежащих центров, образованных вакансией кадмия и комплексом хлора с энергией активации $E_v+(0,42 \pm 0,02)$ эВ, вакансией кадмия с энергией $E_v+(0,63 \pm 0,02)$ эВ, центром быстрой рекомбинации с энергией $E_v+(0,92 \pm 0,02)$ эВ, а также комплексом вакансий селена и кадмия с энергией $E_c-(0,19 \pm 0,02)$ эВ.
6. Установлено, что в ТО $CdTe:In$ пленках, специально легированных индием и отжигаемых в вакууме или в воздухе паров $CdCl_2$, аномально высокое фотонапряжение ($2 \div 4 \cdot 10^3$ В) на порядок выше, а фототок короткого

замыкания – на два порядка ($4 \div 6 \cdot 10^{-8}$ А) выше, чем у нелегированных образцов. Предложен механизм этого физического явления: термополевая миграция ионов In^{+i} и V_{Cd} вакансий кадмия в области внутренних кристаллических асимметричных полей границ зерен и их самокомпенсация приводят к резкому увеличению свойств АФВ пленок $CdTe:In$.

7. Анализом спектральной зависимости фототока короткого замыкания $I_{к.з.}(h\nu)$ методом Луковского выявлены следующие глубокие локальные центры в пленках $CdTe:In$: $E_1 = E_v + (0.06 \pm 0.02)$ эВ, $E_2 = E_v + (0.18 \pm 0.02)$ эВ, $E_3 = E_v + (0.47 \pm 0.02)$ эВ, $E_4 = E_c - (0.15 \pm 0.02)$ эВ, $E_5 = E_c - (0.75 \pm 0.02)$ эВ, причем уровни E_2 и E_3 присутствуют во всех образцах, а E_1 - лишь в нелегированной пленке $CdTe$, уровни E_4 и E_5 - в легированных $CdTe:In$. Уровни E_1 и E_3 создаются одно- и двукратно заряженными вакансиями кадмия (V_{Cd}^- , V_{Cd}^{2-}), а уровень E_2 - междоузельным Te_i , тогда как, естественно ожидать, что за уровни E_4 и E_5 ответственны комплексные центры с участием In^{+i} .

**SCIENTIFIC COUNCIL PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 ON THE
AWARDING ACADEMIC DEGREES AT THE FERGANA
POLYTECHNIC INSTITUTE OF UZBEKISTAN**

FERGANA POLYTECHNIC INSTITUTE

MIRZAEV VALIJON TULQINOVICH

**THE INFLUENCE OF THERMAL FIELD MIGRATION OF IONS ON
PHOTOELECTRIC AND PHOTOVOLTAIC PROPERTIES OF
POLYCRYSTALLINE FILMS $\text{CdSe}_x\text{S}_{1-x}$ AND CdTe:In**

04.01.07 - Condensed matter physics

ABSTRACT

of dissertation of the doctor of philosophy (PhD) in physical and mathematical sciences

Ferghana-2025

The subject of doctoral dissertation (PhD) was registered by the Supreme Attestation Commission at the Ministry of Higher education, science and innovations of the Republic of Uzbekistan under number B2024.4.PhD/FM1199.

The Dissertation was implemented at the Ferghana Polytechnic Institute.

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

Scientific supervisor:

Yuldashev Nosirjon Khaydarovich
doctor of Physical and Mathematical, professor

Official opponents:

Kudratullo Mamarasulovich Kuchkarov
doctor of Physical and Mathematical sciences

Mahmud Mamarasulovich Sobirov
Candidate of Physical and Mathematical, dotsent

Leading organization

Namangan Institute of Engineering and Technology

The defense of the doctoral dissertation will be held on "___" _____2025 at ___ hours at a meeting of the Scientific Council PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 at the Ferghana Polytechnic Institute (Address: 150107, Ferghana, Ferghana St., house 86. Tel: (+99873) 241-12-06, fax (+99873) 241-12-06, e-mail: uzferfizika@mail.ru, small meeting room).

The dissertation can be found in the library of the institute. (registered under No. _____) (Address: 150107, Fergana, st. Fergana, house 86. Tel: (+99873) 241-12-06).

The abstract of the dissertation was distributed on “___” _____2025.

(Registry record No. _____ dated “___” _____2025)

N. A. Sultanov

Deputy chairman of the Scientific Council on award of PhD scientific degree, doctor of Physical and Mathematical, professor

B.J. Axmadaloyev

Scientific Secretary of Scientific Council on award of PhD scientific degree, PhD in physics and mathematics, docent

S.M. Otajonov

Chairman of Scientific seminar of Scientific Council on award of PhD scientific degrees, DSc in physics and mathematics, professor

INTRODUCTION (abstract of PhD dissertation)

The aim of the research work This research focuses on establishing the optimal technological regimes for obtaining thin-film structures based on $CdSe_xS_{1-x}$ solid solutions and doped $CdTe:In$ using the vacuum thermal evaporation method. The study aims to investigate and establish new fundamental photoelectric properties in these structures.

The objects of the research work Standard glass substrates were chosen for the deposition of $CdSe_xS_{1-x}$ and $CdTe:In$ polycrystalline films using the thermal vacuum evaporation method.

The scientific novelty of the research work: The scientific novelty of the research is as follows:

Optimal regimes for the technologies of obtaining photoresistive $CdSe_xS_{1-x}$ and photovoltaic $CdTe:In$ polycrystalline films have been determined through growth by thermal evaporation at a temperature of $T_s=250-350$ °C on a glass substrate with control of the evaporation rate and thickness, as well as through special thermal treatment;

A new region was observed in the initial part of the LAC of $CdSe_xS_{1-x}$ photoresistors, which is related to micropotential barriers. This region was explained by the influence of surface states at the grain boundaries on the generation-recombination processes in the quasineutral volume and space charge region;

Temperature and infrared radiation quenching effects of the dark conductivity of $CdSe_xS_{1-x}$ polycrystalline films were found. These effects were attributed to changes in the charge states of single and double charged cadmium vacancies formed due to thermo-field migration;

during the thermal treatment of CdTe films doped with indium, a significant enhancement of the photovoltaic properties of the sample was observed due to the thermo-field migration of indium ions, cadmium vacancies, and self-compensation effects. This was determined by analyzing the kinetics of the photovoltage during thermal treatment.

Implementation of research results. Based on the scientific results obtained in the development of the technology for obtaining thin-film polycrystalline $CdSe_xS_{1-x}$ and $CdTe:In$ structures and studying the effect of thermo-field migration on their photoelectric and photovoltaic properties, the following has been achieved:

The research methods used in this project, OT-F2-70 "Research and application of an intelligent (AI) renewable energy network system based on big data" (project leader: Ph.D Associate Professor S. Aliyev, Andijan Mechanical Engineering Institute, reference number 38-03-2358 dated November 22, 2024), involved studying the photoelectric properties of polycrystalline $CdSe_xS_{1-x}$ thin films and the high-voltage photo-EMF in $CdTe:In$ crystal grain linear periodic asymmetric structures. The scientific results obtained from this research allow for the analysis of the physical mechanisms of electron kinetic phenomena in highly

doped semiconductor structures during both specific and incident light absorption.

The results of establishing optimal technological regimes for obtaining photoresistive $\text{CdSe}_x\text{S}_{1-x}$ polycrystalline film structures using the thermal vacuum evaporation method and studying the kinetics of the process of increasing photosensitivity were used in the execution of the "Zenit" coded (closed) practical project within the framework of state scientific programs in 2022-2024 (Information and Communication Technologies and Communications Military Institute of the Ministry of Defense of the Republic of Uzbekistan, reference number 57 dated January 9, 2025). The scientific results obtained allowed for a certain degree of analysis of theoretical and experimental data obtained in the study of the effects of deformation and light on the digitization of analog control systems for armored vehicles.

Approbation of results of a research. The main results of the dissertation were presented and discussed at 7 international scientific and practical conferences.

Publication of results. A total of 13 scientific works have been published on the topic of the dissertation, of which 3 were published in scientific journals recommended by the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for the publication of the main scientific results of doctoral dissertations in philosophy, 1 was indexed in the Scopus database at a conference, 2 were published in international scientific journals with a high Impact Factor, 8 were published in the proceedings of international conferences held in our country, and 1 was published in the proceedings of a foreign conference.

The structure and scope of the dissertation. The dissertation includes an introduction, 4 chapters, a conclusion, and a list of 130 references, totaling 132 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; part I)

1. Yuldashev, N.K., Mamadieva, D.T., Mirzaev, V.T., & Xidirov, D.S. Effect of Heat Treatment Conditions on Photo sensitivity of $CdSe_xS_{1-x}$ Polycrystalline Films. // Journal of Applied Mathematics and Physics, (2022). 10(10), 3208-3217. doi: 10.4236/jamp.2022.1010213 (GJIF:1.00). (01.00.00, №¹25,)
2. Мирзаев В.Т., Юлдашев Н.Х., Маматов О.М. Role of intergranule barriers in photosensitivity of polycrystalline films from $CdSe_xS_{1-x}$ solid solution. // Евразийский Союз Ученых. Серия: технические и физико-математические науки. № 07 (122)/2024 Том 1. p. 24-30. DOI: 10.31618/ESU.24139335.2024.1.122.2075. (01.00.00, №¹12,35,).
3. Ayibzhanov, M., Mamatov, O., Mirzaev, V., & Tuychibaev, B. (2024). Luminescence spectrum of cadmium chalcogenide photovoltaic film structures and their power enhancement. // In E3S Web of Conferences (Vol. 583, p. 04003). EDP Sciences. Scopus. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202458304003>. (01.00.00, №¹3,25,)
4. Yuldashev, N.X., Mirzaev, V.T. Роль межгранульных барьеров в фоточувствительности поликристаллических пленок из твердого раствора $CdSe_xS_{1-x}$ // Научный Бюллетень Намгу 2024. №10. 82-87 с. (01.00.00, №14)
5. Б.К.Туйчибаев, В.Т.Мирзаев, Т.И.Рахмонов. Характеристики электрических свойств нанокристаллических систем селенида кадмия. // Andijan state university. Scientific Bulletin. Physical and Mathematical Research Vol. 6 Iss. 1 2024. (01.00.00, №13).
6. Мирзаев, В.Т., & Юлдашев, Н.Х. Фотопроводимость поликристаллических пленок из твердого раствора $CdSe_xS_{1-x}$ // Scientific-technical journal, 2022, T.26, №2. p. 9-14. (05.00.00, №20).

II бўлим (II часть; part II)

7. Мирзаев В.Т. ВАХ и температурные зависимости фотовольтаических свойств пленок CdTe:In. // Proceedings of the 5th International Scientific and Practical Conference «Progressive Science and Achievements». (December 16-18, 2024). Dallas, USA. (01.00.00, №¹25,).
8. В.Т. Мирзаев, М.М.Мадрахимов., Т.И.Рахмонов. Кинетика очувствления свежеприготовленных пленок из $CdSe_xS_{1-x}$ при различных средах. // Международная конференция по фундаментальным и прикладным проблемам физики полупроводников, современной электроники и энергетики. Наманган 18-19 сентября, 2024, с. 298-303
9. Мирзаев В.Т., Юлдашев Н.Х. Исследование люкс-амперной характеристики поликристаллической пленки твердого раствора $CdSe_xS_{1-x}$ с учетом границ раздела зерен. // Международная конференция по

фундаментальным и прикладным проблемам физики полупроводников, современной электроники и энергетики. Наманган 18-19 сентября, 2024, с. 596-602.

10. В.Т.Мирзаев., Т.И. Рахмонов, Ш.А. Мамазоитов. Фазовый переход, связанный с ростом зерен в тонких пленках CdSe: эволюция в ответ на активацию хлоридом кадмия. // Материалы Международной конференции Фундаментальные и прикладные исследования в области физики, Имени Мирзо Улугбека Национальный Университет Узбекистана, Май 24-25, 2024. с.118-120
11. Айибжонов, М., Мирзаев, В. Т., Туйчибаев, Б. К., & Юлдашев, Н. Х. Температурные зависимости холловской подвижности и концентрации носителей в пленках $CdSe_{0.8}S_{0.2}$. // Конференция Ферганского государственного университета, ноябрь 2023 г. с. 12-12.
12. В.Т. Мирзаев, О.Р. Нурматов, Т.И. Рахмонов, Х.М. Сулаймонов, Н.Х. Юлдашев. Влияние механической деформации на спектральные характеристики фотовольтаических пленок CdTe. // Международная научно-практическая конференция посвященная 80-летию Академии наук Узбекистана. «Полупроводниковая опто- и наноэлектроника, альтернативные источники энергии и их перспективы» Андижан 2023 г. с. 241-242.
13. Рахмонов Т.И., Мирзаев В., Нурматов О.Р., Сулаймонов Х.М., Юлдашев Н.Х. Спектральные характеристики фотопроводимости пленок $CdSe_xS_{1-x}$ // III Международная научная конференция "Наноструктурные полупроводниковые материалы в фотоэнергетике". Ташкент, 2022. с.304-307.

Ilmiy rahbar:

N.X.Yuldashev.

Talabgor:

V.T.Mirzayev

Avtoreferatning o‘zbek, rus va ingliz tillaridagi nusxalari Farg‘ona politexnika instituti muassisligidagi “**Scientific technical journal**” jurnal tahririyatida tahrirdan o‘tkazildi (23.01.2025 y.).

Bosishga ruxsat etildi: 2025 y. Nashriyot bosma tabog‘i–3,75.
raqamli bosma usuli. Times garniturası.
Shartli bosma tabog‘i–1,75. Bichimi 64x108 1/16. Adadi 60.

“ALPHA BRAND” MCHJ
150107. Farg‘ona shahar, Farg‘ona ko‘chasi 86-uy

