

**“TIQXMMI” MTU HUZURIDAGI FUNDAMENTAL VA AMALIY
TADQIQOTLAR INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR
BERUVCHI DSc.03/06.11.2025.K/FM.10.09 RAQAMLI ILMIY KENGASH
FUNDAMENTAL VA AMALIY TADQIQOTLAR INSTITUTI**

SAPAYEV IBROXIM BAYRAMDURDIYEVICH

**pSi/-nCdS GETEROSTRUKTURALARINING TEMPERATURAGA
BOG‘LIQ XUSUSIYATLARINI KOMPLEKS FIZIK-KIMYOVIY
TAHLILI**

02.00.04 – Fizik kimyo

**FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI DOKTORI (DSc) DISSERTATSIYASI
AVTOREFERATI**

Toshkent – 2026

**Fizika-matematika fanlari doktori (DSc) dissertatsiyasi avtoreferati
mundarijasi**

**Оглавление автореферата диссертации доктора (DSc) по физика-
математическим наукам**

**Contents of dissertation abstract of the Doctor (DSc) on physical and
mathematical sciences**

Sapayev Ibroxim Bayramdurdiyevich

pSi/n-CdS geterostrukturalarining temperaturaga bog'liq xususiyatlarini kompleks fizik-kimyoviy tahlili.....3

Сапаев Иброхим Байрамдурдыеви

Комплексный физико-химический анализ температурных особенностей гетероперехода pSi/n-CdS.25

Sapayev Ibrokxim Bayramdurdiyevich

Comprehensive physico-chemical analysis of the temperature-dependent properties of the pSi/n-CdS heterojunction.47

E'lon qilingan ishlar ro'yxati

Список опубликованных работ

List of published works.....53

**“TIQXMMI” MTU HUZURIDAGI FUNDAMENTAL VA AMALIY
TADQIQOTLAR INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR
BERUVCHI DSc.03/06.11.2025.K/FM.10.09 RAQAMLI ILMIY KENGASH**
FUNDAMENTAL VA AMALIY TADQIQOTLAR INSTITUTI

SAPAYEV IBROXIM BAYRAMDURDIYEVICH

**pSi/-nCdS GETEROSTRUKTURALARINING TEMPERATURAGA
BOG‘LIQ XUSUSIYATLARINI KOMPLEKS FIZIK-KIMYOVIY
TAHLILI**

02.00.04 – Fizik kimyo

**FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI DOKTORI (DSc) DISSERTATSIYASI
AVTOREFERATI**

Toshkent – 2026

Fizika-matematika fanlari doktori (DSc) dissertatsiyasi mavzusi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2026.1.DSc/FM 315 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya "TIQXMMI" Milliy tadqiqot universiteti huzuridagi Fundamental va amaliy tadqiqotlar institutida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz(rezyume)) Ilmiy Kengash veb-sahifasida (www.ifar.uz) hamda "Ziyonet" Axborot-ta'lim portalida(www.ziyonet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy maslahatchi: **Jamoliddin Inotullayevich Razzokov**
Kimyo fanlari doktori

Rasmiy opponenlar: **Ulug'bek Alisherovich Shaislamov**
Fizika-matematika fanlari doktori

Bahrom Toshmirza o'g'li Abdulazizov
Fizika-matematika fanlari doktori

Izzatillo Nuritdinov
Fizika-matematika fanlari doktori

Yetakchi tashkilot: Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti.

Dissertatsiya himoyasi "TIQXMMI" Milliy tadqiqot universiteti huzuridagi Fundamental va amaliy tadqiqotlar instituti huzuridagi DSc.03/06.11.2025.K/FM.10.09 raqamli Ilmiy Kengashning 2026 yil "____" _____ soat ____ dagi majlisida bo'lib o'tadi. (Manzil: 100000, Toshkent shahri, Mirzo Ulug'bek tumani, Qori Niyoziy 39A., Tel. (+99871) 237-09-61; faks (+99871) 237-09-62; e-mail: info@ifar.uz).

Dissertatsiya bilan Fundamental va amaliy tadqiqotlar institutining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (____ raqami bilan ro'yxatga olingan). (Manzil: 100000, Toshkent shahri, Mirzo Ulug'bek tumani, Qori Niyoziy 39A, FATI. Tel. (+99871) 237-09-61).

Dissertatsiya avtoreferati 2026 yil "____" _____ kuni tarqatildi.

(2026 yil "____" _____ dagi ____ raqamli reestr bayonnomasi).

O.N. Ro'zimurodov

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy Kengash raisi o'rinbosari, kimyo fanlari doktori, professor

E.X. Karimbayev

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy Kengash kotibi, fizika-matematika fanlari doktori, katta ilmiy xodim

U.B. Xalilov

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy Kengash qoshidagi ilmiy seminar raisi o'rinbosari, fizika-matematika fanlari doktori, katta ilmiy xodim

KIRISH (doktorlik (DSc) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahon miqyosida yangi turdagi optoelektron qurilmalarni yaratish hamda injeksion fotodiodlarni (IFD) takomillashtirishga alohida e'tibor qaratilmoqda. IFDlar hozirgi vaqtda optik aloqa tizimlari, sensor texnologiyalar, tibbiy diagnostika va quyosh energetikasi sohalarining muhim elementi sifatida qaralmoqda. Xalqaro tadqiqot markazlarining tahliliy ma'lumotlariga ko'ra, 2024 yilda fotodiodlarning jahon bozori hajmi 8,7 mlrd AQSH dollaridan oshgan bo'lib, 2026 yilga borib 14 mlrd dollardan ortishi, o'rtacha yillik o'sish sur'ati esa 8,5 % atrofida bo'lishi prognoz qilinmoqda. Bu esa mazkur qurilmalarning texnologik va iqtisodiy ahamiyati tobora ortib borayotganini ko'rsatadi. Fotopriyomnik qurilmalariga tezkorlik, fotosezgirlik va harorat barqarorligi bo'yicha talablar kuchayib borayotgan sharoitda 0,4–1,1 mkm spektral diapazonda va –60 dan +150 °C gacha bo'lgan haroratlarda ishlay oladigan yuqori samarali IFDlarni yaratish dolzarb ilmiy-texnik vazifa hisoblanadi.

So'nggi yillarda IFDlarning bazaviy sohasi parametrlari ularning elektr va fotoelektr xususiyatlariga ta'sirini o'rganishga alohida ilmiy qiziqish ortmoqda. Tajribalar shuni ko'rsatadiki, bazaviy soha kengligini 0,2–5 mkm oralig'ida va legirlovchi aralashmalar konsentratsiyasini 10^{15} – 10^{18} sm^{-3} diapazonda o'zgartirish fotosezgirlik koeffitsientini 30–60 % ga oshirish hamda qorong'u tokni 3–5 baravarga kamaytirish imkonini beradi. Biroq mavjud texnologik jarayonlar mazkur parametrlarni yetarli darajada boshqarishni ta'minlamayotgani sababli, fotodiodlarning kvant samaradorligi amaliy sharoitda 70–75 % bilan cheklanmoqda, holbuki nazariy jihatdan 90 % dan yuqori qiymatlarga erishish mumkin. Shu bois IFDlarda fizik jarayonlarni chuqur o'rganish, bazaviy soha parametrlarini optimallashtirish usullarini ishlab chiqish, texnologik yechimlarni takomillashtirish hamda CdS/Si geterotuzilmalari asosidagi fotodiodlarning spektral xususiyatlarini kompleks tahlil qilish o'zining yuqori ilmiy va amaliy ahamiyatini saqlab qolmoqda.

O'zbekiston Respublikasida yarimo'tkazgich qurilmalar sohasida fundamental va amaliy tadqiqotlar natijasida yuqori samarali foto- va yorug'lik diodlarini yaratish bo'yicha muhim natijalarga erishilgan. Geterotuzilmali fotodiodlarning funksional xususiyatlarini optimallashtirish natijasida ularning 0,4–1,1 mkm diapazondagi samaradorligi oshirildi, radiatsion va ultratovush ta'siri qo'llanilishi esa oqish toklarini 3–5 baravarga kamaytirish va fotosezgirlikni 30–60 % ga oshirish imkonini berdi. Respublikani rivojlantirish strategiyasiga muvofiq ilmiy yutuqlar va innovatsiyalarni amaliyotga joriy etish ustuvor vazifa hisoblanadi, bu esa yarimo'tkazgich geterotuzilmalarida elektron jarayonlarni tadqiq etishning dolzarbligini yanada oshiradi. CdS va Si asosida yangi texnologiyalarni ishlab chiqish, ko'p to'siqli tuzilmalarda bazaviy soha parametrlarini optimallashtirish, jumladan, yuqori qarshilikli kompensatsiyalangan n-CdS ($\rho = 10^8$ – 10^{10} $\text{Om}\cdot\text{sm}$) qatlamidan foydalanish n⁺CdS–nCdS–nSi va n⁺CdS–nCdS–pSi geterotuzilmalarida qurilmalarning fotosezgirliги va harorat barqarorligini –60 dan +150 °C gacha bo'lgan oraliqda ta'minlashga xizmat qiladi. Adabiyotlar tahlili shuni ko'rsatadiki, mazkur geterotuzilmalar asosida ichki kuchaytirishga ega injeksion fotodiodlarni yaratish

optoelektronika sohasini rivojlantirish uchun dolzarb va amaliy ahamiyatga ega ilmiy masaladir.

Mazkur dissertatsiya tadqiqoti O‘zbekiston Respublikasining davlat ilmiy-texnologik siyosatida belgilangan ustuvor vazifalarni amaliy jihatdan ro‘yobga chiqarishga yo‘naltirilgan. Jumladan, O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2020 yil 29 oktyabrdagi PF-6097-son Farmoni (ilm-fanni 2030 yilgacha rivojlantirishga oid), 2021 yil 19 martdagi PQ-5032-son Qarori (fizika sohasida ta‘lim va ilmiy tadqiqotlar sifatini oshirish to‘g‘risida) hamda 2017 yil 17 fevraldagi PQ-2789-son Qarori (Fanlar akademiyasi ilmiy faoliyatini tashkil etish va moliyalashtirish mexanizmlarini takomillashtirish to‘g‘risida) bilan belgilangan vazifalarga mos ravishda olib borilgan.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishi ustuvor yo‘nalishlariga mosligi. Mazkur tadqiqot ishi O‘zbekiston Respublikasining fan va texnologiyalar rivojlanishining III. «Energetika, energiya va resurs tejamkorligi, transport, mashina va asbobsozlik, zamonaviy elektronika, mikroelektronika, fotonika va elektron asbobsozlikni rivojlantirish» ustuvor yo‘nalishiga muvofiq bajarilgan.

Dissertatsiya mavzusi bo‘yicha xorijiy ilmiy tadqiqotlar sharhi:

So‘nggi o‘n yilliklarda yarimo‘tkazgich geterotuzilmalari sohasidagi xalqaro tadqiqotlar fotoelektr qurilmalar va fotodetektorlar samaradorligini oshirishga, xususan, nanostrukturali CdS/Si tizimlaridan foydalanish orqali erishishga qaratilgan. Nanostrukturalar, jumladan nanoyo‘llar (nanowires, NWs) va nanostajlar (nanorods, NRs) qo‘llanilishi tekis qatlamlarga nisbatan tushayotgan yorug‘lik qaytishini 20–40 % ga kamaytirish hisobiga yorug‘lik yutilishini va zaryad tashuvchilar fotogeneratsiyasini sezilarli darajada oshirish imkonini beradi (AL-Hilo va boshq., 2014; Alkallas va boshq., 2023).

Kanmaz (2023) SCAPS dasturi yordamida CdS/p-Si/p+-Si va ZnO/CdS/p-Si/p+-Si geterotuzilmalarini sonli modellashtirishni amalga oshirdi. Natijalar shuni ko‘rsatdiki, bir qatlamli CdS geterotuzilmasining maksimal samaradorligi 20,30 % ni tashkil etdi, ZnO qo‘sh qatlam sifatida qo‘shilganda esa CdS qatlami qalinligi 40–80 nm diapazonda bo‘lganda samaradorlik 21,82 % gacha oshdi. Bu natijalar energiya aylantirish koeffitsientini oshirishda qatlam qalinligi va tarkibini optimallashtirish muhimligini ko‘rsatadi.

Cai va boshq. (2019) dopantsiz p-Si/CdS/ITO quyosh elementlarini ishlab chiqib, 4 sm² maydonli namunalarda uchun 12,29 % samaradorlikka erishdilar. Ishda 50–60 nm qalinlikdagi CdS qatlamini DC-magnetron purkash usuli bilan hosil qilib, keyin termik kuydirish amalga oshirilgan. Bu usul energiya sarfini kamaytirish va yuqori haroratli n+ qatlam legirlanishini bartaraf etish imkonini berdi. Natijalar shuni ko‘rsatdiki, kuydirish haroratini to‘g‘ri tanlash fototokni 15–20 % ga oshiradi, ochiq zanjir kuchlanishi (V_{oc}) esa 0,05–0,07 V ga ortadi. Bu esa sifatli geterokontakt hosil qilishda termik ishlov berish muhimligini ko‘rsatadi.

Fotodeteksiya sohasida Alkallas va boshq. (2023) p-Si (111) yuzasida CdS nanoyo‘llarini hosil qilish uchun suyuq muhitda lazer ablyatsiyasi usulini taklif etdilar. Olingan qurilmalarda to‘g‘ri yo‘nalishdagi tokning chiziqli xarakteristikasi, 4,5 μ A qorong‘u tok qiymati va 15–30 Vt/sm² yoritilishda 580–690 μ A gacha fototok

qayd etildi. Geterotuzilma ideal koeffitsienti 3,1–3,3 ni tashkil etdi, bu interfeys sifati yuqori va zaryad tashuvchilar samarali ajralishini ko'rsatadi.

AL-Hilo va boshq. (2014) Core-Shell turidagi Si/CdS nanoyo'l geterotuzilmasini ishlab chiqdi. Bunda n-CdS nanozarrachalari kimyoviy vannada cho'ktirish (CBD) usuli bilan vertikal yo'naltirilgan p-Si nanoyo'llarga o'tkazilgan. SEM tahlili CdS ning Si nanoyo'llarga yuqori yopishishini tasdiqladi, XRD va UV-Vis spektroskopiya esa wurtzit kristall tuzilma va 2,1–2,4 eV to'g'ri taqiqlangan zona mavjudligini ko'rsatdi. Qo'shimcha ravishda Al bilan legirlangan ZnO (AZO) shaffof elektrod sifatida qo'llanganda fototok 50 % gacha oshdi. Bu nanostrukturalar va shaffof elektrodlar kombinatsiyasining qurilma samaradorligini oshirishdagi ahamiyatini ko'rsatadi. Xorijiy tadqiqotlar tahlili quyidagi asosiy xulosalarni chiqarish imkonini beradi: CdS/Si geterotuzilmalarida nanoyo'l va nanostajlardan foydalanish yorug'lik qaytishini 20–40 % ga kamaytiradi va zaryad tashuvchilar fotogeneratsiyasini oshiradi; CdS va ZnO qatlamlarining optimal qalinligi (40–80 nm) quyosh elementlari samaradorligini bir qatlamli tuzilmalarga nisbatan 1–2 % ga oshiradi; CBD, PLAL va DC-magnetron purkash kabi cho'ktirish usullari CdS kimyoviy tozaligi va morfologiyasini nazorat qilish imkonini beradi, bu esa barqaror fototok va past qorong'u tok uchun muhim; Si nanoyo'llar va CdS nanozarrachalar asosidagi Core-Shell geterotuzilmalar tekis CdS/Si qatlamlarga nisbatan fototokni 50 % gacha oshirish hamda fotodiodlarning spektral xarakteristikasini boshqarish imkonini beradi.

Muammoning o'rganilganlik darajasi. So'nggi o'n yilliklarda optoelektronika sohasidagi tadqiqotlar asosan Si/CdS geterotuzilmalarida elektron jarayonlarni o'rganish va ularning fotoelektrik xususiyatlari samaradorligini oshirishga qaratilgan. Ayniqsa, p- yoki n-Si tagliklariga yotqizilgan yupqa qatlamli CdS asosidagi injeksion fotodiodlar (IFD) istiqbolli hisoblanadi, ular cho'zilgan bazali diodlar turiga kiradi. Bunday qurilmalarning dastlabki prototiplari V.I. Stafeev rahbarligida yaratilgan bo'lib, bu Si/CdS tuzilmalarida zaryad tashuvchilarning injeksiya va rekombinatsiya mexanizmlarini aniqlash imkonini berdi. Zamonaviy tadqiqotlar doirasida CdS qatlami qalinligini va Si taglikdagi legirlovchi markazlar konsentratsiyasini aniq boshqarish orqali spektral sezgirlikni sozlash imkonini beruvchi yangi turdagi fotopriyomnik tuzilmalar taklif qilingan. Tajriba natijalari shuni ko'rsatadiki, CdS qatlamining optimal qalinligi 40–80 nm ni, Si dagi legirlovchi markazlar konsentratsiyasi esa 10^{15} – 10^{17} sm⁻³ ni tashkil etadi.

Bu esa 15–30 Vt/sm² yoritilishda fototokni 580–690 μ A gacha oshirish va qorong'u tokni 4–5 μ A gacha kamaytirish imkonini beradi. Bundan tashqari, CdS bilan qoplangan nanostrukturali Si-NWs dan foydalanish yorug'lik yutilishini 20–40 % ga oshiradi, bu esa tekis qatlamlarga nisbatan fotodiodlar samaradorligini 1–2 % ga oshishiga olib keladi. CdS/Si turidagi yarimo'tkazgich birikmalarining fizik va fizik-kimyoviy xossalari chuqur o'rganilganiga qaramay, ular asosidagi injeksion fotodiodlar hali yetarli darajada tadqiq etilmagan.

Xususan, CdS/Si yupqa qatlamli tuzilmalarni kristallografik yo'nalishini va interfeys sifatini nazorat qilgan holda shakllantirish texnologiyalarini ishlab chiqish masalasi hanuz to'liq hal etilmagan. Bu esa fotodiodlarning ichki kuchaytirishini

oshirish va spektral xarakteristikasini boshqarish uchun muhim hisoblanadi. Mazkur bo‘shliqlar yuqori samarali optoelektron qurilmalarni yaratishga qaratilgan keyingi nazariy va eksperimental tadqiqotlar uchun istiqbolli yo‘nalishlarni ochib beradi.

Zhang va Yu a-Si:H yupqa qatlamlarni kremniy ustiga joylashtirish orqali yengil va mexanik jihatdan barqaror 3D radial optoelektron qurilmalarni ishlab chiqqan¹. Piazza va hamkasblari MBE usuli bilan o‘stirilgan GaAs radial p–n o‘tishlarning elektr xususiyatlarini EBIC mikroskopiyasi orqali tahlil qilgan va aktiv yuzaning 38 barobar oshganini aniqlagan³. Cabrera-España va Rahman simulyatsiyada radial p-n o‘tishlarda samaradorlik planar strukturalarga nisbatan yuqoriligini ko‘rsatgan. Prashant va hamkasblar ITO/TiO₂ kontaktlar yordamida nanoo‘lchamli radial p-n strukturalarning samaradorligini oshirish usullarini o‘rganishgan⁴.

O‘zbekistonda diffuziya texnologiyasi asosida baza sohasi kambag‘allashgan kremniyli termorezistorlar ishlab chiqish bo‘yicha ilmiy tadqiqotlar olib borilgan. Jumladan, M.K. Bahadirxanov, S. Zaynobiddinov, B. Egamberdiev, M. Tashmetov tomonidan olingan natijalarga ko‘ra, ushbu materiallarning solishtirma qarshiligi 10⁴–10⁵ Om·cm diapazonda bo‘lib, ular 5–10 V kuchlanishlarda barqaror ishlashi aniqlangan. Shuningdek, p–n o‘tishli termodatchiklar yaratish bo‘yicha R.A. Mo‘minov va hamkasblari tomonidan muhim ilmiy natijalar olingan. Biroq, baza sohasi kambag‘allashgan radial strukturalarda keng temperatura diapazonida fizik jarayonlar yetarli darajada o‘rganilmagan hamda to‘liq bo‘lmagan ionlanish jarayonlarining ta’siri kompleks tarzda hisobga olinmagan. Shu bilan birga, radial p–n va p–i–n o‘tishli strukturalarda geometrik parametrlarning ta’siri yetarli darajada tizimli tadqiq etilmagan.

Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan ilmiy muassasaning ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog‘liqligi:

Mazkur dissertatsiya tadqiqoti Toshkent irrigatsiya va qishloq xo‘jaligini mexanizatsiyalash muhandislari instituti Milliy tadqiqot universiteti huzuridagi Fundamental va amaliy tadqiqotlar institutining “Resurslarni tejoychi texnologiyalar” va “Fundamental fizika hamda fizik kimyo” laboratoriyalarining tasdiqlangan ilmiy-tadqiqot rejalari doirasida amalga oshirilgan.

Tadqiqot maqsadi: Dissertatsiya ishining asosiy maqsadi p-Si/n-CdS geteroo‘tishli struktura asosidagi injeksion fotoqabulqilgichlarda elektron jarayonlar va fizik-kimyoviy xususiyatlarini, jumladan, geometrik parametrlar, CdS yupqa qatlamining qalinligi va konsentratsiyasi, turli harorat rejimlari hamda ultratovushning tok tashish mexanizmlariga ta’sirini tizimli aniqlash va kompleks tadqiq qilishdan iborat.

Tadqiqot vazifalari: Mazkur dissertatsiya doirasida p-Si/n-CdS geterotuzilmasi asosida turli haroratlarda va ultratovush ta’sirida modellashtirish,

¹ Zhang, S., & Yu, L. (2024). 3D radial junctions for robust and flexible optoelectronics. *Advanced Optical Materials*, 12(2), 2302121. <https://doi.org/10.1002/adom.202302121>

³ P Cabrera-España, F. J., Kamuka, A., Khaled, A., Hameed, M. F. O., Obayya, S. S. A., & Rahman, B. M. A. (2024). Optical and electrical characterization of solar cell with nanowires mimicking antireflection coating layers considering axial and radial PN junctions. *Energy Science & Engineering*, 12(4), e1722. <https://doi.org/10.1002/ese3.1722>

⁴ Prashant, D. V., Agnihotri, S. K., & Samajdar, D. P. (2022). Efficient GaAs nanowire solar cells with carrier selective contacts: FDTD and device analysis. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 141, 106410. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2021.106410>

eksperimental hamda nazariy hisoblashlarni amalga oshirish orqali quyidagi vazifalarni hal etish ko'zda tutilgan:

p-Si/n-CdS geterootishining morfologiyasi va kristall tuzilishini SEM (skanerlovchi elektron mikroskopiya) va XRD (rentgen difraksiyasi) usullari yordamida o'rganish, shuningdek, past haroratlarda aralashmalarning to'liq ionlashmasligi hisobga olingan holda elektrofizik taqsimotlarni tahlil qilish;

yuzaki zaryad holati yuzaga keladigan CdS qatlamining minimal qalinligini hamda injeksion rekombinatsiya jarayoni namoyon bo'ladigan maksimal qalinligini aniqlash;

qalinligi 400 nm bo'lgan CdS yupqa yupqa qatlamlarining chiziqli va nochiziqli optik xususiyatlarini, jumladan to'yinuvchi yutilish (SA), ikki fotonli yutilish (2PA) va mumkin bo'lgan teskari to'yinish (RSA) jarayonlarini ularning morfologiyasi va kristallit tuzilishiga bog'liq holda miqdoriy tavsiflash, optik cheklagichlar va rejimli sinxronlashgan lazerlarda qo'llash imkoniyatlarini aniqlash;

tashqi omillarning tanlangan tuzilmaning volt-amper xarakteristikalariga ta'sirini tahlil qilish va uning optimal parametrlarini belgilash;

p-Si/n-CdS tuzilmasida baza va emitter konsentratsiyasining samaradorlik hamda injeksion tok mexanizmlariga ta'sirini o'rganish;

harorat va ultratovush ta'sirining p-Si/n-CdS tuzilmasining C-V (sig'im-kuchlanish) xarakteristikalariga ta'sirini tadqiq etish;

p-Si/n-Cd_{1-m}Zn_mS geterootishlarining optoelektron xususiyatlarini tarkib va haroratni hisobga olgan holda modellashtirish, fotopriyomnik va fotoelektron qurilmalar parametrlarini optimallashtirish;

aralashmalarning to'liq ionlashmasligi effektini hisobga olgan holda p-Si/n-CdS geterootishlarining past haroratdagi elektrofizik va optik xususiyatlarini o'rganish.

Tadqiqotning ob'ekti; injeksion fotodiodlar yaratishda ishlatiladigan p-Si/n-CdS geterostrukturalari va ularning elektro-fizik xossalari, jumladan, tok o'tishi, kontakt jarayonlari, shuningdek harorat va ultratovush ta'sirining ularning xossalari ta'siri.

Tadqiqot predmeti: p-Si/n-CdS geterostrukturalaridagi tok o'tish mexanizmlari, shuningdek turli omillarning (harorat, ultratovush ta'siri, struktura geometriyasi) ularning fotoelektrik xossalari va spektral sezgirligiga ta'siri. Tadqiqotda injeksion rekombinatsiya jarayonlari, kontakt qarshilik shakllanishi va injeksion fotodiodlarning ish barqarorligi, shuningdek bu omillarning qurilmalar samaradorligiga ta'siri o'rganiladi.

Tadqiqot usullari: Tadqiqot usullari nazariy modellashtirish va eksperimental usullarni o'z ichiga oladi. Nazariy qismda analitik va sonli usullar, jumladan p-Si/n-CdS geterostrukturalarining elektro-fizik xossalari tahlil qilish uchun kompyuter modellashtirish qo'llaniladi. Eksperimental tadqiqotlar volt-amper (VAX), volt-farad (C-V) xossalari, shuningdek yorug'lik va qorong'ulik sharoitidagi volt-amper o'lchovlari orqali fotoelektrik xossalarni va tashqi omillar (harorat va ultratovush) ta'sirini baholash usullarini o'z ichiga oladi. Shuningdek, namunalarni morfologik tadqiq qilish va ularning strukturasi tahlili uchun mikroskopiya usullari qo'llaniladi.

Dissertatsiya ishining ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat: Dissertatsiya ishida p-Si/n-CdS geterostrukturalarida elektron jarayonlar va tok o'tish mexanizmlari kompleks tarzda o'rganilgan. Natijada asosiy quyidagi xulosalar olingan:

kremniy asoslarida CdS yupqa qatlamlarini (5–200 nm) kvaziyopiq vakuum tizimida CdS kukunlarini cho'kiltirish usuli bilan shakllantirish texnologiyasi ishlab chiqilgan. Bu qatlamlarning yuqori birxilligi, p-Si/n-CdS geterostrukturalarining elektro-fizik parametrlarining barqarorligi va qatlam qalinligi va strukturasi ta'sirini eksperimental tadqiq qilish uchun mosligini ta'minlaydi;

TCAD Sentaurus dasturiy kompleksida p-Si/n-CdS strukturasi fizik modeli yaratilgan va eksperimental tarzda kalibrlangan. Ushbu model teskari zonaning kengligini ($R^2 = 0,9793$) va volt-amper xossalarni ($R^2 = 0,9815$) yuqori aniqlik bilan tasvirlash imkonini beradi, bu elektro-fizik jarayonlarni raqamli modellashtirish uchun taklif qilingan yondashuvning ishonchliligini tasdiqlaydi;

400 nm qalinlikdagi CdS yupqa qatlamining ~ 24 nm o'lchamli kristallitlardan, 50–150 nm o'lchamli donalardan, 5–8 μm konqlomeratlardan tashkil topganligi va Cd:S stexiometrik nisbati $\approx 51:49$ ekanligi aniqlangan. Bu teskari zonaning kengligi $E_g \approx 2,33$ eV va yutilish koeffitsienti $\alpha \approx 5 \times 10^4 - 2 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ ni ta'minlab, morfologiya va kristallit strukturasi bilan optik xossalar orasidagi miqdoriy bog'liqlikni belgilaydi;

$\lambda = 1030$ nm va 515 nm da OA Z-scan o'lchovlari shuni ko'rsatdiki, $I < 2 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ da to'yingan yutilish dominant bo'ladi, $I > 3 - 5 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ da esa ikki fotonli yutilish (2PA) paydo bo'ladi ($\beta_{2PA} \approx 4.7 - 8 \times 10^{-8} \text{ cm} \cdot \text{W}^{-1}$, to'yingan intensivlik $I_{\text{sat}} \approx 1.3 - 1.7 \times 10^{11} - 10^{12} \text{ W/cm}^2$), bu birinchi marta 400 nm qalinlikdagi CdS qatlamlarida SA, 2PA va mumkin bo'lgan RSA raqobatini aniq miqdoriy tasvirlash imkonini beradi;

300 K da teskari tok sezgirligi p-Si bazasining konsentratsiyasiga nisbatan deyarli 10 marta yuqori ekanligi aniqlangan, bu esa kremniy bazasi parametrlarining fotodiod ish xossalarini shakllantirishda asosiy rolini ko'rsatadi;

eksperimental va raqamli tadqiqotlar shuni ko'rsatdiki, cho'kiltirilgan n-Cd_mZn_{1-m}S qatlamlari donali morfologiyaga ega ($\sim 179,5$ nm qiyshiq sirt, $20 \times 20 \mu\text{m}^2$), teskari zonaning kengligi $\approx 2,6$ eV dan $> 3,8$ eV gacha boshqariladi; yetarli ionizatsiyalanmagan donorlar effekti depletsiya zonasini kengaytiradi va maksimal elektr maydonini taxminan 3,5 marta kamaytiradi;

$S_{\text{int}} = 2,8 \cdot 10^4$ oq yorug'likda, $E = 0,1$ lux; spektral fotosezgirlik $S_\lambda \approx 2,3 \cdot 10^4 \text{ A/W}$, $\lambda = 0,625 \mu\text{m}$, $P = 10 \mu\text{W/cm}^2$, bu fototokning ichki kuchayishini interfaz qatlam va n-CdS da teshiklar akkumulyatsiyasi orqali ko'rsatadi;

n-CdS/p-Si chegarasida $\psi_s = 0,04$ eV da manfiy zaryadlangan sirt holatlarining shakllanishi aniqlangan, ular tashuvchilarni injeksiyalashga sezilarli ta'sir ko'rsatadi, fotosezgirlikni o'zgartiradi va elektr xossalarni optimallashtirishda muhim hisoblanadi.

Tadqiqotning amaliy natijalari.

Tadqiqot jarayonida p-Si/n-CdS injeksion fotodiodlaridagi tok o'tish mexanizmlari ularning texnologik (legirlash konsentratsiyasi $10^{15} - 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, CdS

qatlam qalinligi 5–400 nm) va geometrik parametrlariga (yupqa qatlam radiusi 0,3–2,5 μm , teskari zonaning uzunligi 1–10 μm) bog‘liqligi aniqlangan. Ushbu bog‘liqlik asosida qurilmalarning ishchi tokini 35–50 % ga kamaytirish va quvvat sarfini 30–45 % ga qisqartirish imkonini beruvchi past quvvatli fotodiodlarni optimallashtirish usuli ishlab chiqildi.

TCAD Sentaurus dasturiy muhitida modellashtirish natijalariga ko‘ra, p–n va p–i–n strukturalarda kuchlanish (0–5 V), temperatura (–50...+150 °C) va legirlash darajasi (10^{15} – 10^{18} cm^{-3}) o‘zgarishi zaryad tashuvchilar zichligini 1,8–2,6 barobar, elektr maydonining maksimal qiymatini esa $(3–6)\times 10^5$ V/cm diapazonida boshqarish imkonini beradi. Radial p-Si/n-CdS strukturalarning planar strukturalarga nisbatan sezuvchanligi 1,5–2,2 barobar yuqori va quvvat sarfi 25–40 % ga past ekanligi eksperimental va hisoblash natijalari bilan tasdiqlangan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi: matematik modellar qat‘iy hisoblashlarga asoslangan bo‘lib, nazariy natijalar tajribaviy ma‘lumotlar bilan sifat va miqdoriy jihatdan mos kelishi orqali tasdiqlangan. Eksperimental natijalar bir-birini to‘ldiruvchi turli o‘lchash va tahlil usullari yordamida tekshirilgan. Shuningdek, yarimo‘tkazgichlar uchun taqiqlangan soha kengligi modelimizdagi hisoblangan natijalar bilan solishtirilib, nisbiy xatolik 3 % dan oshmagan. Determinatsiya koeffitsiyenti $R^2 = 0,97$ dan yuqori.

Ilmiy va amaliy ahamiyati: dissertatsiyada p-Si/n-CdS geterostrukturalarida elektron o‘tish jarayonlari chuqur tahlil qilinib, to‘liq bo‘lmagan ionlanish effektlarini hisobga oluvchi yangi analitik ifodalar ishlab chiqildi. Bu esa temperatura (–60...+200 °C), qatlam qalinligi (5–400 nm) va legirlash darajasi (10^{15} – 10^{18} cm^{-3}) o‘zgarishlarining elektron jarayonlarga ta‘sirini miqdoriy baholash imkonini berdi.

Ushbu natijalar asosida ishlab chiqilgan modellar yuqori sezgirlikka ega fotodetektorlar, sensorlar va past quvvat talab qiluvchi foton qurilmalarni loyihalashda qo‘llanilib, qurilmalar sezgirligini 1,7–2,3 barobar, energiya samaradorligini 30–45 % ga oshirish imkonini beradi. Shuningdek, natijalar nanoelektronika va optoelektronika sohalarida yuqori samarali va raqobatbardosh qurilmalarni ishlab chiqish uchun muhim amaliy asos bo‘lib xizmat qiladi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi: pSi/n-CdS geterostrukturalarining temperaturaga bog‘liq xususiyatlarini kompleks fizik-kimyoviy tahlili bo‘yicha olingan ilmiy natijalar asosida:

p-Si/n-CdS geterostrukturalarining temperaturaga bog‘liq xususiyatlarini kompleks fizik-kimyoviy tahlil qilish natijalari asosida, p-Si/n-CdS geterostrukturalarining elektrofizik xususiyatlariga legirlanish darajasi va temperaturaning ta‘sirini hisobga oluvchi fizik modellar Synopsys Sentaurus TCAD dasturiy majmuasi yordamida ishlab chiqildi. Shu asosida “p-Si/n-CdS geterostrukturalarning I–V xarakteristikasini yuqori aniqlikda o‘lchash uchun dasturiy ta‘minot” (Guvohnoma № DGU 55079, 04.10.2025) hamda “C–V xarakteristikasini keng temperaturalar diapazonida yuqori aniqlikda o‘lchash uchun dasturiy ta‘minot” (Guvohnoma № DGU 55080, 04.10.2025) ishlab chiqilib, tegishli guvohnomalar olindi.

Olingan ilmiy natijalar Toshkent irrigatsiya va qishloq xo'jaligini mexanizatsiyalash muhandislari instituti Milliy tadqiqot universiteti 60720600 — "Materialshunoslik va yangi materiallar texnologiyasi (yarimo'tkazgichlar va lazer texnologiyasi)" bakalavriat ta'lim yo'nalishi doirasida "Yarimo'tkazgichlar fizikasi" va "Yarimo'tkazgichli qurilmalarni modellashtirish" fanlarini o'qitish jarayonida joriy etildi (17.03.2026, dalolatnoma). Natijada, talabalarning yarimo'tkazgichli qurilmalarni modellashtirish bo'yicha amaliy ko'nikmalari 20% ga oshgan va hisoblash aniqligi 3 baravar yaxshilangani aniqlandi.

p-Si/n-CdS injeksiyon fotodiodlarining elektr va fotoelektr xususiyatlariga ultratovushli ishlov berish ta'siri o'rganildi. Tadqiqot shuni ko'rsatdiki, ultratovushli ishlov berish heterostrukturaldagi sirtiy holatlar zichligini kamaytirib, nuqsonlarni qayta qizdirish orqali fotodiodlarning spektral va integrallashgan sezgirligini oshiradi. Ushbu yondashuv xorijiy tadqiqotchilar tomonidan qo'llanilgan (Advances in Materials Science and Engineering, 2021, Article 8836368; IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 614, 012027; Superlattices and Microstructures, 117, 173–188; Journal of Semiconductors, 37(12), 122002; Journal of Applied Physics, 123(16), 161573).

Si asosga yupqa qatlamli geterostrukturalarni vakuum sharoitida (10^{-3} Pa) issiq bug'lanish usuli bilan o'stirish usuli ham xorijiy tadqiqotchilar tomonidan qo'llanilgan (Journal of Alloys and Compounds, 1040, 183530; East European Journal of Physics, (3), 325–335; Chalcogenide Letters, 22(8), 753–764).

Ultratovush orqali ishlov berish orqali p-Si-n-CdS geterostrukturalarning sirtiy holatlar zichligi kamayishi, bu esa fotodiodlarning spektral ($S_{\lambda} = 2.3 \cdot 10^4$ A/W) va integrallashgan ($S_{\text{int}} = 2.8 \cdot 10^4$ A/lm) sezgirligini oshiradi. Drift va diffuziya qarshi oqimlarining kompensatsiyasi fotosezgirlik va teskari tok-volt xususiyatlariga yangi fizik effektlar kiritadi. Bu yondashuv xorijiy tadqiqotchilar tomonidan qo'llanilgan (East European Journal of Physics, (3), 325–335; Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics, 9(6), 799–800; Chalcogenide Letters, 22(8), 753–764; Ceramics International, 42(6), 6601–6609; Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 18(7), 494–500).

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Tadqiqotning asosiy natijalari 4 ta xalqaro va 5 ta respublika ilmiy-amaliy anjumanlarda muhokama qilingan.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi. Dissertatsiya mavzusi bo'yicha jami 32 ta ilmiy ish chop etilgan, 20 ta maqola OAK tavsiya etgan nashrlarda, shundan 16 tasi Scopus indeksli xorijiy jurnallarda, 4 tasi mahalliy jurnallarda; 9 ta tezis xalqaro va mahalliy konferensiyalarda; 2 ta EHM dasturi intellektual mulk agentligi tomonidan guvohnoma olingan.

Dissertatsiyaning hajmi va tuzilishi. Dissertatsiya kirish, 5 ta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro'yxatidan iborat. Dissertatsiya matni 200 betdan iborat.

DISSERTATSIYA ASOSIY MAZMUNI

Dissertatsiya kirish qismida olib borilgan tadqiqotning dolzarbligi va zarurligi asoslangan, ishning maqsadi va vazifalari belgilangan, tadqiqot obyekti, predmeti va usullari aniqlangan. Ishning Respublika O'zbekiston fan va texnologiyalarni

rivojlantirishning ustuvor yoʻnalishlariga muvofiqligi oʻrnatilgan. Tadqiqotning ilmiy yangiligi va olingan natijalarning ishonchliligi asoslangan, ularning nazariy va amaliy ahamiyati ochib berilgan. Natijalar joriy etilishi, ishning sinovdan oʻtkazilishi hamda dissertatsiya tuzilmasi va hajmi haqida qisqacha maʼlumot berilgan.

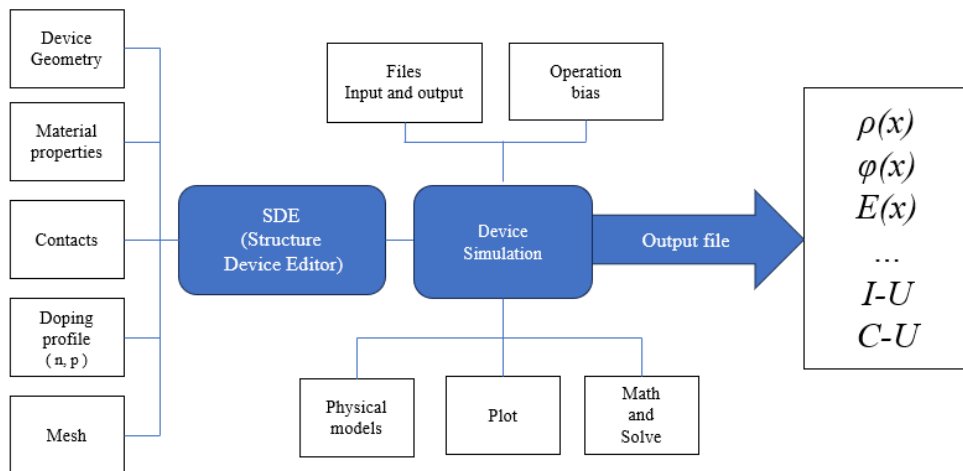
Dissertatsiyaning birinchi bobida “Injeksiya fotosensorli strukturalarini qoʻllash boʻyicha zamonaviy holat, dolzarb muammolar va tadqiqot vazifalarini tahlil qilish (adabiyot sharhi)” mavzusida injeksiya fotosensorli strukturalarni ishlab chiqish va tadqiq etish boʻyicha zamonaviy ilmiy yondashuvlar tizimli tarzda umumlashtirilgan. Ushbu sohadagi tadqiqotlarning joriy holati keng qamrovli tahlil qilingan, injeksiya fotosensorli qurilmalarning amaliy qoʻllanilishi sohalari va turli zaryad tashuvchilari tashish va kuchaytirish mexanizmlari sharoitida ularning ishlash xususiyatlari koʻrib chiqilgan. Tashqi omillarning, jumladan harorat va ultratovush taʼsirining yarimoʻtkazgichli strukturalarning elektrofizik xususiyatlariga taʼsiriga alohida eʼtibor qaratilgan. A^2B^6 va A^3B^5 guruhlaridagi yarimoʻtkazgich birikmalari asosida yaratilgan zamonaviy injeksiya fotodiodlar, mavjud injeksiya fotodiodli strukturalar modellari va ularning matematik modellashtirishning joriy holati koʻrib chiqilgan. Oʻtkazilgan tahlil asosida asosiy hal qilinmagan ilmiy-texnik muammolar aniqlangan, keyingi tadqiqot yoʻnalishlari belgilangan, shuningdek, vazifa qoʻyilishi va tadqiqot obyekti uchun asosiy talablar asoslangan.

Dissertatsiyaning ikkinchi bobida “Kremniy/kadmiy sulfidi geterostrukturalari asosida injeksiya fotosensorli strukturalarni shakllantirish usullari va ularning asosiy parametrlari” mavzusida geterostrukturalarni olish texnologik usullari taqdim etilgan, ularning asosiy parametrlari va shakllanish xususiyatlari oʻrganilgan. Hozirgi vaqtda yarimoʻtkazgichli elektron qurilmalarni modellashtirish faol rivojlanmoqda va maxsus dasturiy taʼminotlar spektri kengaymoqda. Bunday dasturlar qurilmalarning geometriyasini belgilash va mikro- va nano-darajalarda elektrofizik va optik jarayonlarni oʻrganish imkonini beradi. Ushbu strukturalar TCAD Sentaurus dasturi yordamida modellashtirilgan. Qurilmalar geometriyasi, baza va emmitter sohalari, kontaktlar va tarmoq Structure Editor modulida shakllantirilgan, bu strukturada parametrlarni aniqlik va hisoblash xarajatlari optimalligi bilan taqsimlash imkonini bergan. Materiallar tayinlash, fizik modellar va xususiyatlarni hisoblash Device modulida bajarilgan, bu yerda chegaraviy shartlar, fizik modellar, raqamli yechim usullari va hisoblash rejimlari belgilangan. Modellashtirishning asosiy bosqichlari va kirish/chiqish parametrlar 1-rasmda keltirilgan.

Oʻrganilgan asosiy strukturalarda – p–n va p–i–n oʻtishlarda – tok tashish mexanizmlari yarimoʻtkazgich qurilmalarda tavsiflash imkonini beruvchi drift-diffuziya transport modeli qoʻllanilgan.

Ushbu model doirasida Puasson tenglamasi, elektron va teshiklar uchun uzluksizlik va tok zichligi tenglamalari sonli usulda, chekli elementlar metodi yordamida yechilgan, bu esa elektrofizik jarayonlarni aniq tavsiflash imkonini bergan. Yuqori samarali optoelektron va fotoelektron qurilmalar materiali sifatida

CdS tanlangan. Volt-amper xususiyatlari Keithley 2400 qurilmasi yordamida o‘lchangan va modellashtirish natijalari bilan yaxshi moslik ko‘rsatgan.



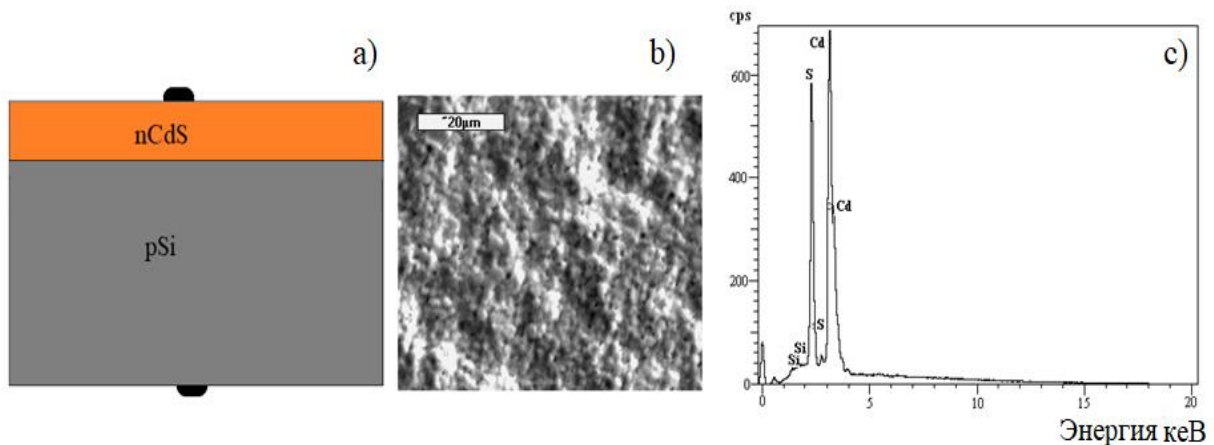
1-rasm. Modellashtirish bosqichlari

Modellashtirilgan pSi/nCdS struktura omik kontaktlar bilan shakllantirilgan (In/p-Si, Al/n-CdS). p-Si (100) asoslar ishlatilgan, ularning o‘ziga xos qarshiligi 1–10 $\Omega \cdot \text{sm}$ va qalinligi taxminan 500 μm bo‘lgan. CdS yupqa qatlamlar belgilangan qalinlik diapazonlarida shakllantirilgan. CdS II–VI guruh birikmalarining tipik vakili sifatida fotodiodlar, quyosh elementlari va nurlanish detektorlarda keng qo‘llaniladi. Yupqa qatlamlar optimallashtirilgan harorat va texnologik rejimlarda termovakuum bug‘latish, ALD, CVD va PECVD usullari yordamida olinadi. Getero-o‘tishlar CdSni p-Si ustiga cho‘kishi orqali va keyinchalik omik kontaktlar yaratish bilan shakllantiriladi. CdS II–VI birikmalarining elektrofizik va optik xususiyatlarini o‘rganish uchun model materiali sifatida ishlatiladi va uning kremniy bilan mosligi istiqbolli pSi/nCdS geterostrukturalarini shakllantirish imkonini beradi. Cho‘kkan CdS qatlamlari XRD va EDS usullari yordamida tavsiflangan. CdS/Si sifatli interfeysini shakllantirishdagi asosiy qiyinchilik – kristall panjaraning parametrlari va materiallarning issiqlik kengayish koeffitsiyentlaridagi farqdir. CdS epitaksiya yupqa qatlamlar asos va manba optimallashtirilgan haroratlarda vakuum sharoitida o‘sdirilgan, bu qalinlikning bir xilligi va nazoratli dopirovka uchun amalga oshiriladi. Belgilangan geometriyaga ega shottki va omik kontaktlar shakllantirilgan. Tok xususiyatlari, to‘g‘ridan-to‘g‘ri siljish parametrlari, ideal koeffitsiyent va kontakt effektlarini kalibrlash eksperimental VAX bilan modellashtirish natijalarini solishtirish orqali amalga oshiriladi.

2-rasmda pSi/nCdS getero-o‘tishining struktura va xususiyatlari ko‘rsatilgan. 2D ko‘rinish (a) o‘tish geometriyasini namoyish qiladi, bu esa zaryad tashuvchilarini samarali ajratishni ta‘minlaydi.

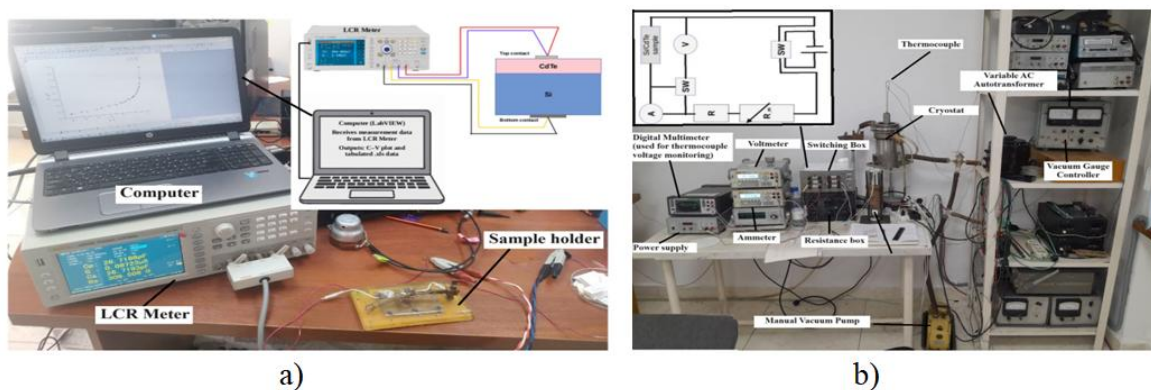
Rentgen tahlili (b) CdS kristall strukturasi va uning II–VI guruh yarimo‘tkazgich standartlariga mosligini tasdiqlaydi. Energiya dispersiyali spektroskopiya (c) elementlarning bir xillik taqsimlanishini va aniq dopirovkani

ko'rsatadi, bu esa strukturadagi elektrofizik xususiyatlarning barqarorligini ta'minlaydi.



2-rasm. Model namunasi a) pSi/nCdS getero-o'tishining 2D ko'rinishi; b) rentgen difraksiya (XRD) metodi bilan tahlil; c) energiya dispersiyali spektroskopiya (EDS) metodi bilan spektral tahlil.

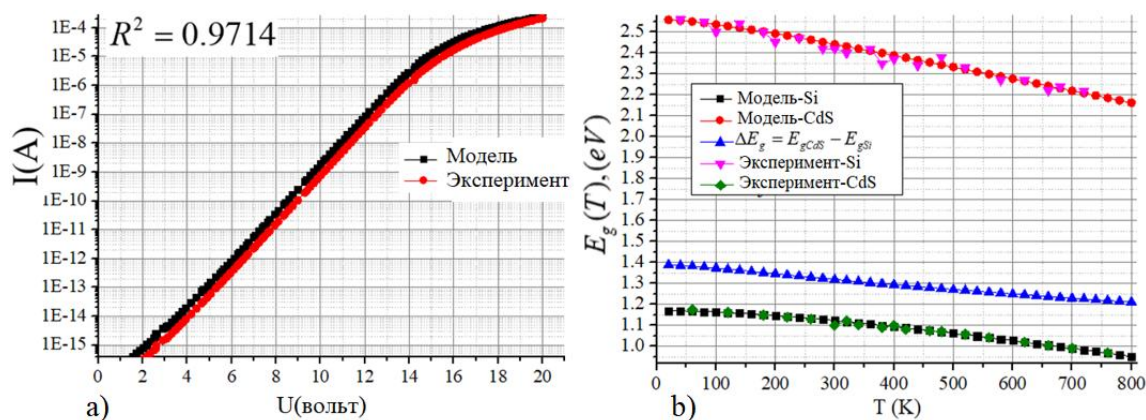
Past kuchlanishlarda ($V < 0,3 \text{ V}$) Si/CdS getero-o'tish orqali oqim siyraklashgan hududdagi rekombinatsiya jarayonlari bilan belgilanadi.



3-rasm. Tadqiq qilingan elektron elementning volt-ampere xususiyatini (I-V xususiyatlari) o'lchash sxemasi

Ushbu diapazonda oqim kichik bo'ladi va kuchlanish bilan eksponent tarzda oshadi. O'rta kuchlanishlarda ($0,3 \text{ V} < V < 0,5 \text{ V}$) o'tish rejimi kuzatiladi, bunda rekombinatsiya va drift-diffuziya transporti birgalikda ishlaydi. Ushbu hududdagi oqim oshadi. Yuqori kuchlanishlarda ($V > 0,5 \text{ V}$) drift-diffuziya mexanizmi to'liq ustunlik qiladi. Ushbu rejimda oqim maksimal darajaga yetadi va I-Vning yarim-logarifmik grafikida deyarli chiziqli bog'lanishni namoyish qiladi, bu yarimo'tkazgichlarda klassik tashish modellariga mos keladi. Shunday qilib, Si/CdS getero-o'tishida aniq hududlar ajratilishi kuzatiladi: past kuchlanishlarda oqim rekombinatsiya tomonidan boshqariladi, yuqori kuchlanishlarda esa drift-diffuziya asosiy rol o'ynaydi.

Bu nafaqat eksperimental ma'lumotlar, balki sonli modellashtirish natijalari bilan ham tasdiqlanadi. Yuqori R^2 qiymatlari va ideal koeffitsiyent getero-o'tish strukturadagi elektrofizik jarayonlarni modelning to'g'ri tavsiflashini ko'rsatadi va shunga o'xshash getero-o'tish xususiyatlarini prognoz qilishda ishlatilishi mumkin.



4-rasm. a) pSi/nCdS getero-o'tishining 300 K haroratidagi volt-ampér xususiyati; b) Ta'qiqlangan zona kengligining haroratga bog'liqligi

Si/CdS getero-o'tishining eksperimental va modellashtirilgan VAH (volt-ampér xususiyatlari) solishtirilgan. Olingan qiymatlar va ideal koeffitsiyent modelning eksperiment bilan yuqori mosligini va tanlangan parametrlarning to'g'riligini tasdiqlaydi. p-Si/n-CdS elektrofizik xususiyatlari 77–400 K harorat oralig'ida I–V va C–V metodlari yordamida o'rganilgan, o'lchash aniqligi taxminan $\pm 0,5\%$ ni tashkil qilgan. Si va CdS ning ta'qiqlangan zona kengligining haroratga bog'liqligi 100–500 K oralig'ida tadqiq qilingan. Modellashtirish eksperiment bilan yaxshi mos keladi: Si uchun 1,12 eV, CdS uchun 2,4 eV (qiymatlar kiritiladi).

Si uchun ta'qiqlangan zona kengligi 1,12 eV (300 K) dan 1,07 eV (400 K) gacha kamayadi, CdS uchun esa 2,4 eV dan 2,38 eV gacha o'zgaradi. Modelning eksperimental ma'lumotlar bilan yuqori mosligi uning to'g'riligini va Si/CdS getero-o'tish parametrlarini keng harorat diapazonida aniq prognoz qilish imkonini tasdiqlaydi. Model to'g'ri kalibrlangan va tashqi omillar hisobga olingan taqdirda, hisoblash xatoligi 3% dan kamga tushirilishi mumkin.

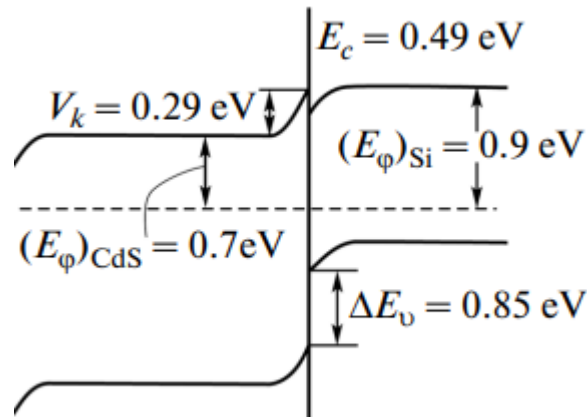
Проведено сравнение экспериментальных и смоделированных ВАХ гетероперехода Si/CdS. Полученные значения $R^2 = 0,9714$ и коэффициент идеальности $n \approx 1,23$ подтверждают высокое согласие модели с экспериментом и корректность выбранных параметров. Электрофизические свойства p-Si/n-CdS исследовались методами I–V и C–V в диапазоне 77–400 K при точности измерений около $\pm 0,5\%$. Температурная зависимость ширины запрещённой зоны $E_g(T)$ для Si и CdS исследована в диапазоне 100–500 K. Моделирование хорошо согласуется с экспериментом: для Si $R^2 \approx 0,986$, для CdS $R^2 \approx 0,973$. При этом для Si E_g уменьшается с 1,12 эВ (300 K) до 1,07 эВ (400 K), а для CdS — с 2,4 эВ до 2,38 эВ. Высокая корреляция модели с экспериментальными данными подтверждает её адекватность и возможность точного прогнозирования параметров гетеропереходов Si/CdS в широком

температурном диапазоне. При корректной калибровке модели и учёте внешних факторов погрешность расчётов может быть снижена до менее 3 %.

$$\Delta E_C(T) = E_{C,Si}(T) - E_{C,CdS}(T) \quad (1)$$

1 va 2 ifodalar mos ravishda $E_C(T)$ o'tkazuvchan zonaning pastki chegarasini va $E_V(T)$ valent zonaning yuqori chegarasini temperaturaga bog'liqligini ifodalaydi.

$$\Delta E_V(T) = E_{V,Si}(T) - E_{V,CdS}(T) \quad (2)$$



5-rasm. Si/CdS geterostrukturasiining energiya zonasi

5-rasmda pSi/nCdS getero-o'tishining energiya diagrammasi ko'rsatilgan, u o'tkazuvchanlik darajalari, valent zonasi, ish funksiyalari va potensial to'siqlarni belgilaydi. Xona haroratida quyidagi parametrlar aniqlangan: (Si), Si ish funksiyasi — 0,9 eV, CdS — 0,7 eV, o'tkazuvchanlik zonasi farqi 0.49 eV, potensial to'siq 0.29 eV. Ushbu parametrlar zaryad tashuvchilar transportini belgilaydi: 0.9 eV elektronlarning tashilishini cheklaydi, 0.29 kontakt potensialini beradi, ish funksiyalari farqi (0,2 eV) ichki elektr maydonini hosil qiladi va elektronlarning diffuziyasini rag'batlantiradi.

Dissertatsiyaning uchinchi bobida "pSi/nCdS asosidagi geterostrukturalarda kontakt hodisalarini tahlil qilish" mavzusida kontaktlarni shakllanish jarayonlari, ularning elektr xususiyatlariga ta'siri va strukturalarda oqimlarning xususiyatlari o'rganilgan. Natijalar shuni ko'rsatdiki, elektrod materiali tanlovi pSi/nCdS parametrlariga sezilarli ta'sir qiladi: Barrier balandligi 0,32–0,78 eV oralig'ida o'zgaradi, Kontakt qarshiligi $(1,8-6,5) \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{sm}^2$, To'g'rilash koeffitsiyenti 10^3-10^4 gacha yetadi. Eng samarali tuzilma In-pSi/nCdS-In bo'lib, minimal yo'qotishlarni ta'minlaydi va omik tok tashilishga yaqin bo'ladi ($\Phi_B \approx 0,35-0,42$ eV, $R_c \leq 2,1 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{sm}^2$). Al-pSi/nCdS-Al tuzilmasida 350–400 °C dagi annealingdan keyin barqaror omik kontakt hosil bo'ladi ($R_c \approx 2,5-3,2 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{sm}^2$, to'g'rilash koeffitsiyenti $(3-5) \times 10^3$). Au-pSi/nCdS-Au tuzilmasida esa to'siqli kontakt hosil bo'ladi ($\Phi_B \approx 0,65-0,78$ eV, $R_c \approx 5,0-6,5 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{sm}^2$). Ag-pSi/nCdS-Ag kontaktlari o'rta parametrga ega ($\Phi_B \approx 0,48-0,58$ eV, $R_c \approx 3,6-$

$4,4 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{sm}^2$) va ftohisoyati $0,42-0,55 \text{ A/Vt}$. Metall-yarimo'tkazgich kontaktlari quyidagi shartlar bilan tavsiflanadi: n-turi uchun: $\Phi_B(n) = \Phi_M - \chi \approx 0$ (omik kontakt), p-turi uchun: $\Phi_B(p) = E_g - (\Phi_M - \chi) \approx 0$, To'siq kontaktlar: n-turi uchun: $\Phi_B(n) = \Phi_M - \chi$, p-turi uchun: $\Phi_B(p) = E_g - (\Phi_M - \chi)$, To'siq orqali tok quyidagi formula bilan tavsiflanadi (3):

$$I = I_s \left(\exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right) \quad (3)$$

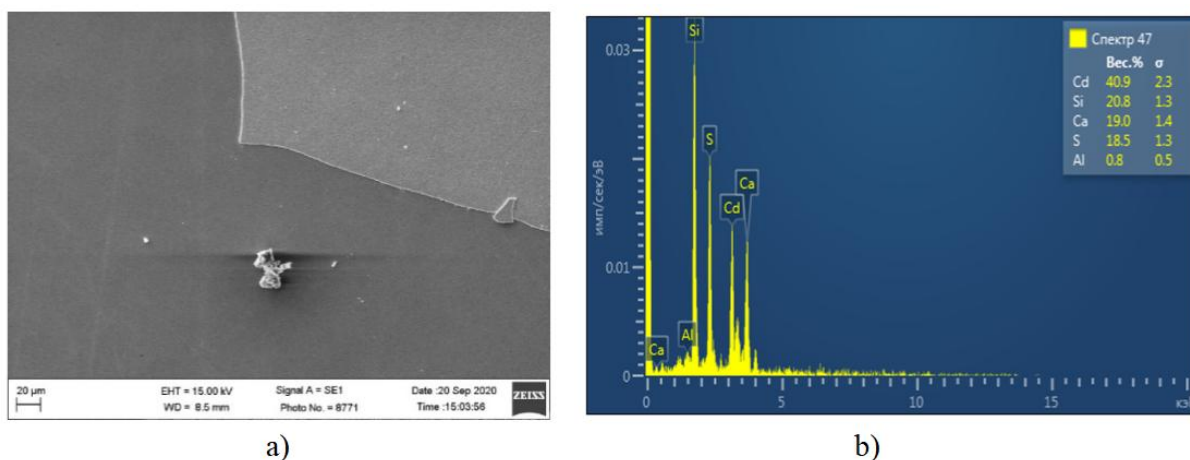
Rekombinatsiyani hisobga olinsa (4):

$$I = I_s \left(\exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right) + I_s \left(\exp\left(\frac{qU}{2kT}\right) - 1 \right) \quad (4)$$

Strukturani umumiy elektr qarshilik quyidagicha yozish mumkin.

$$R = R_C + R_{pSi} + R_{nCds} + R_T + R_p + R_m \quad (5)$$

Eksperimental ma'lumotlar: In: $\rho_c \approx 1 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{sm}^2$, Al: $\rho_c \approx (1-10) \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{sm}^2$, Ag: $\rho_c \approx 1 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{sm}^2$, Au: $\rho_c \approx (1-10) \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{sm}^2$. $\rho_c = \rho_{c1} + \rho_{c2}$ ikki komponentli model kontaktlarning haroratga bog'liqligini to'g'ri tavsiflaydi. Minimal qarshilikni Al va In ta'minlaydi, maksimal barqarorlikni esa Au va Ag ta'minlaydi, bu esa optoelektron qurilmalar uchun kontaktlarni optimallashtirish imkonini beradi.

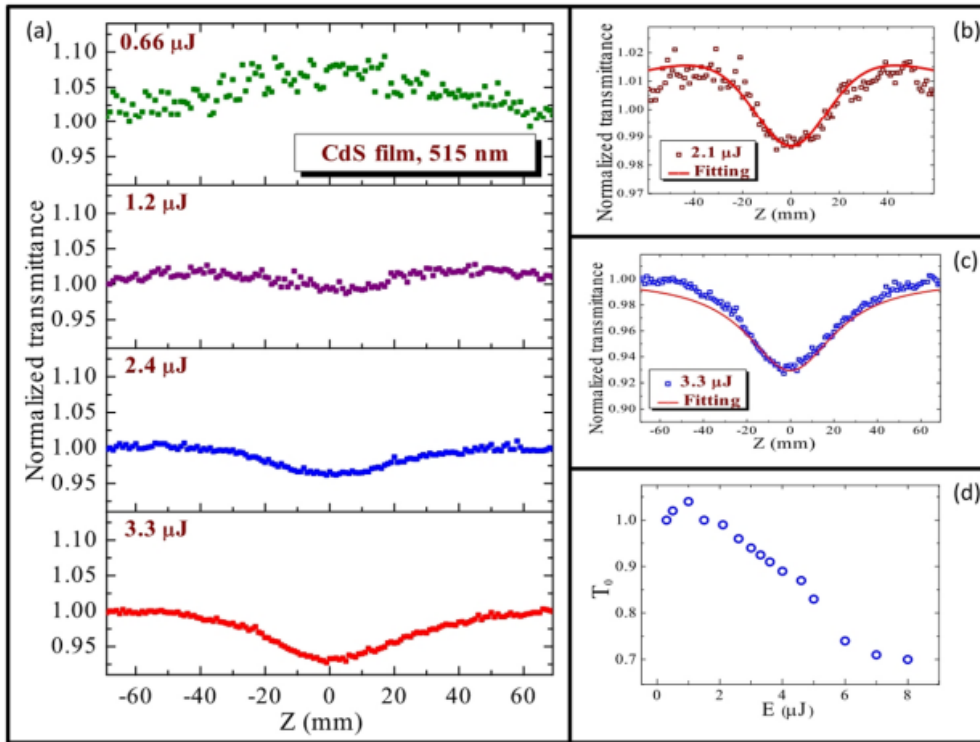


6-rasm. a) SEM yordamida ingichka CdS/Si geterosistemasining n-turi CdS asosidagi yupqa qatlam yuzasi tasviri; b) Element tahlili

Dissertatsiyaning to'rtinchi bobida "pSi/nCdS getero-o'tishlarining elektrofizik va optik xususiyatlariga tashqi ta'sirlar" mavzusida harorat, elektr va boshqa tashqi omillarning getero-o'tish xususiyatlariga ta'siri o'rganilgan. 6-rasmda kremniy asosiga cho'kkan CdS ingichka yupqa qatlamsining morfologiyasi va element tarkibi ko'rsatilgan.

CdS ingichka yupqa qatlamlari yuqori ftohisoyot, ta'qiqlangan zona kengligi $\sim 2,42 \text{ eV}$ (300 K) va kremniy texnologiyasi bilan mosligi tufayli fotokonvertorlar, sensorlar, fotodiodlar va quyosh elementlarida keng qo'llaniladi.

CdS/Si geterostrukturalarining samaradorligi yuzaning morfologiyasi, o‘rtacha don o‘lchami, donlararo chegaralar zichligi va yupqa qatlam stexiometriyasi bilan belgilanadi.

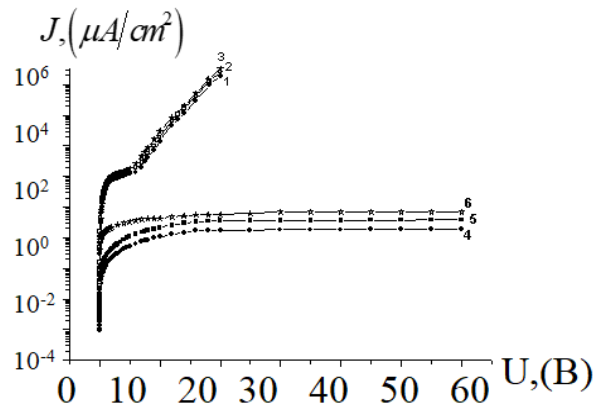


7-rasm. OA Z-scan CdS yupqa qatlamsi (400 nm) uchun, $\lambda = 515 \text{ nm}$, $\tau = 200 \text{ fs}$ sharoitida impuls energiyasi $0,66\text{--}3,3 \mu\text{J}$ ($I \approx 1,2 \times 10^{10} - 6,6 \times 10^{10} \text{ Vt/sm}^2$) o‘shishi bilan to‘ygan so‘rilish (SA) dan ikki fotonli so‘rilish (2PA) ga o‘tish jarayoni ko‘rsatilgan.

Past energiyalarda SA ustunlik qiladi, o‘rta energiyalarda so‘rilish to‘yingan holatga yetadi ($I_{\text{sat}} \approx 1,3 \times 10^{11} \text{ Vt/sm}^2$), yuqori energiyalarda esa SA va 2PA o‘rtasida raqobat kuzatiladi, 2PA koeffitsienti $\beta_{2\text{PA}} \approx 8 \times 10^{-8} \text{ sm} \cdot \text{Vt}^{-1}$ ga teng.

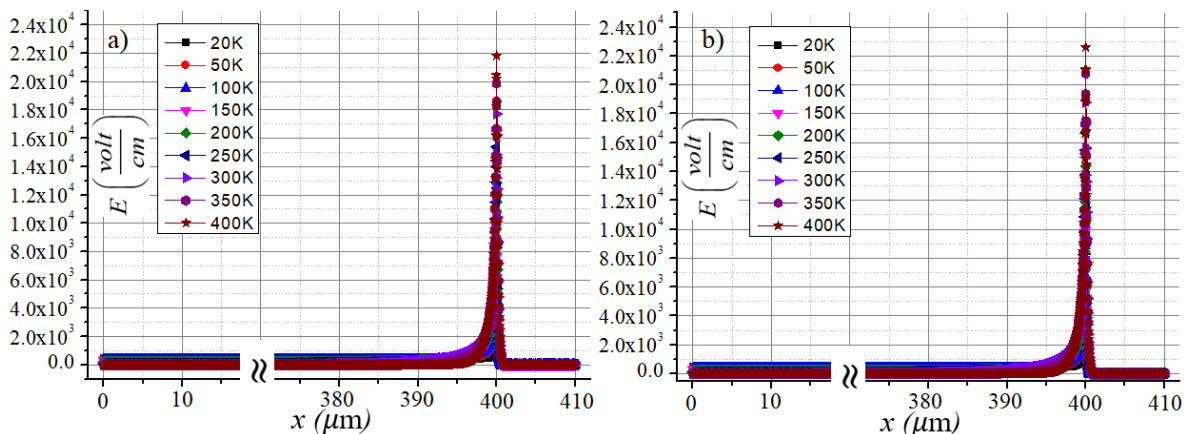
515 nm to‘lqin uzunligidagi foton energiyasi ($E_p \approx 2,4 \text{ eV}$) $E_g \approx 2,33\text{--}2,42 \text{ eV}$ dan yuqori bo‘lib, bu bir fotonli so‘rilish, SA, 2PA va ehtimoliy RSA jarayonlarining birgalikda namoyon bo‘lishiga olib keladi. CdS yupqa qatlamlar optik cheklash, lazerlarda mode-locking va femtosekundli fotonika uchun istiqbolli hisoblanadi. Ultratovush ta’siridan keyin to‘g‘ri oqim $1,2 \cdot 10^{-6} \text{ A}$ dan $3,5 \cdot 10^{-6} \text{ A}$ gacha ($\sim 191 \%$) oshadi, bu kontakt xususiyatlarining yaxshilanishi va to‘siq qarshiligining kamayishi bilan bog‘liq. Yorug‘likda oqim $1,15 \cdot 10^{-5} \text{ A}$ gacha oshadi, fotoko‘paytirish koeffitsienti $K_{\text{photo}} \approx 3,3$, bu ichki fototok kuchayishini ko‘rsatadi.

Ultratovush ta’siridan keyin teskari oqim $4,2 \cdot 10^{-8} \text{ A}$ dan $1,1 \cdot 10^{-7} \text{ A}$ gacha oshadi, yorug‘likda esa $3,8 \cdot 10^{-6} \text{ A}$ ga yetadi ($K_{\text{reverse}} \approx 34,5$), bu fototok hosil bo‘lishi va zaryad tashuvchilar drift injeksiyasi bilan izohlanadi. Oqimlarning o‘shishi pSi/nCdS chegarasidagi nuqsonlarning kamayishi va qo‘shimcha tashish kanallarining faollashishi bilan bog‘liq.



8-rasm. pSi/nCdS strukturasiining volt-ampere xususiyatlari (V–I) qorong‘uda va yorug‘likda ($E = 0,1$ lux) $T = 300$ K da, ultratovush ta‘siridan oldin va keyin ($P = 5$ W, $f = 1,1$ MHz) ko‘rsatilgan.

Drift modeli bo‘yicha hisoblangan samarali ambipolyar harakatlilik $\mu_{eff} \approx 2,9$ $\text{sm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ ga teng bo‘lib, bu doplangan yarimo‘tkazgich strukturalari uchun odatiy qiymatga mos keladi.

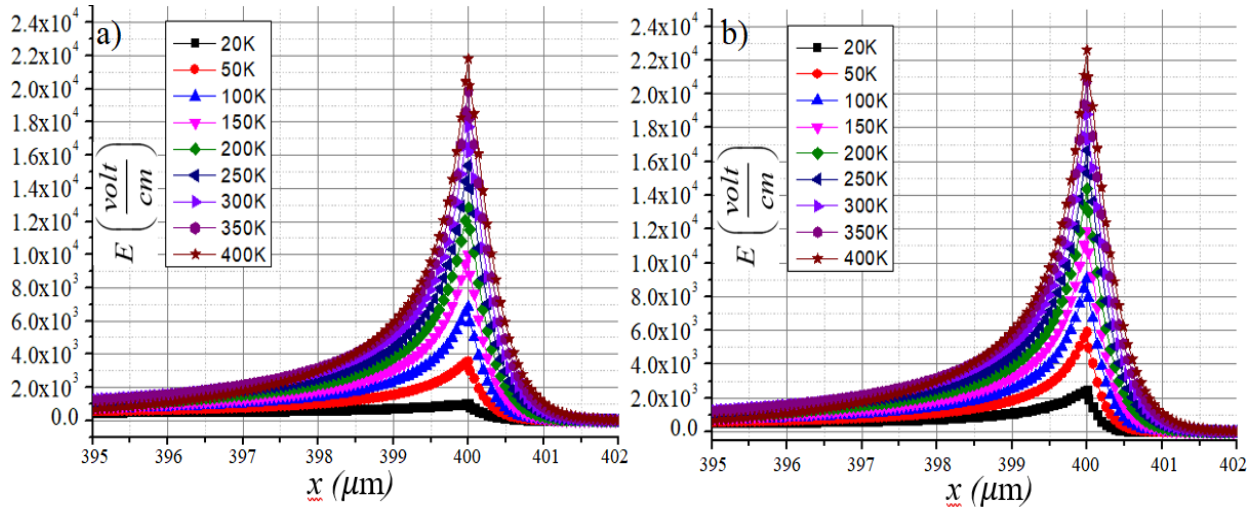


9-rasm. Getero-o‘tishda elektr maydon taqsimoti: a) kirishma atomlarning to‘liq ionlashmasini hisobga olgan holda; b) iflosliklarning to‘liq ionlashmasini hisobga olmagan holda.

Dissertatsiyaning beshinchi bobida “Nazorat qilinadigan ta‘qiqlangan zona kengligi bilan pSi/n-CdS geterostrukturalarning elektrofizik xususiyatlari” mavzusida ta‘qiqlangan zona parametrlarini boshqarish xususiyatlari va ularning geterostrukturalarning elektrofizik xususiyatlariga ta‘siri o‘rganilgan.

10-rasmda 395–402 μm tor diapazondagi elektr maydon profillari ko‘rsatilgan, bu getero-o‘tish hududidagi maksimal kuchlanish zichligini batafsil

o‘rganishga imkon beradi (9-rasmga qarang). Ko‘rsatilganidek, maydonning shakli va kattaligi haroratga sezilarli darajada bog‘liq.



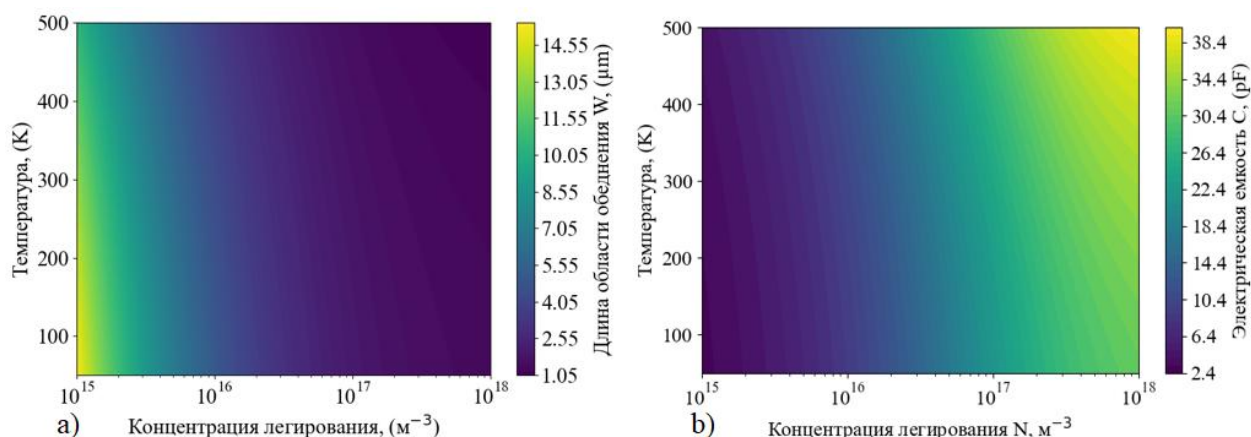
10-rasm. Getero-o‘tishda elektr maydon taqsimoti: a) iflosliklarning to‘liq ionlashmasini hisobga olgan holda; b) iflosliklarning to‘liq ionlashmasini hisobga olmagan holda.

Ko‘pgina mavjud analitik modellarda harorat o‘zgarishlari to‘liq hisobga olinmaydi. Ushbu ishda taklif qilingan ifodalar iflosliklarning to‘liq ionlashmasini hisobga olish orqali eksperimental ma‘lumotlarni to‘g‘ri tavsiflaydi va keng harorat diapazonida maydon taqsimotini aniq modellashtirishni ta‘minlaydi. Shunday qilib, iflosliklarning haroratga bog‘liq ionlashini hisobga olish geterostrukturalarning elektrostatik jarayonlari va ish xususiyatlarini turli ishlash rejimlarida prognoz qilish uchun muhimdir.

p-Si/n-CdS getero-o‘tishining siyraklashgan qatlam kengligi va sig‘imini tahlil qilish (11-rasm, a–b). p-Si ning dope konsentratsiyasi ($N_A = 10^{15}–10^{18} \text{ m}^{-3}$) va harorat (100–400 K) ning p-Si/n-CdS getero-o‘tishidagi siyraklashgan qatlam $W(T, N_A)$ va sig‘im $C(T, N_A)$ ga ta‘siri o‘rganilgan. Siyraklashgan qatlam kengligi W : $N_A \approx 10^{15} \text{ m}^{-3} \rightarrow W \approx 2,5–3,0 \mu\text{m}$ (zaif maydon, past zaryad tashuvchi zichlik). $N_A \approx 10^{16}–10^{17} \text{ m}^{-3} \rightarrow W \approx 0,5–1,0 \mu\text{m}$ (zaryad zichligi oshishi bilan maydon kuchayadi). $N_A \approx 10^{18} \text{ m}^{-3} \rightarrow W \approx 0,05–0,1 \mu\text{m}$ (juda kuchli lokal maydon). W 100→400 K oralig‘ida 5–10 % ga kamayadi, bu past dope darajalarida kuchliroq namoyon bo‘ladi. Fizik mexanizm: $n_i(T)$ oshishi va o‘rnatilgan potensial $V_{bi}(T)$ kamayishi $\rightarrow W(T)$ kamayadi.

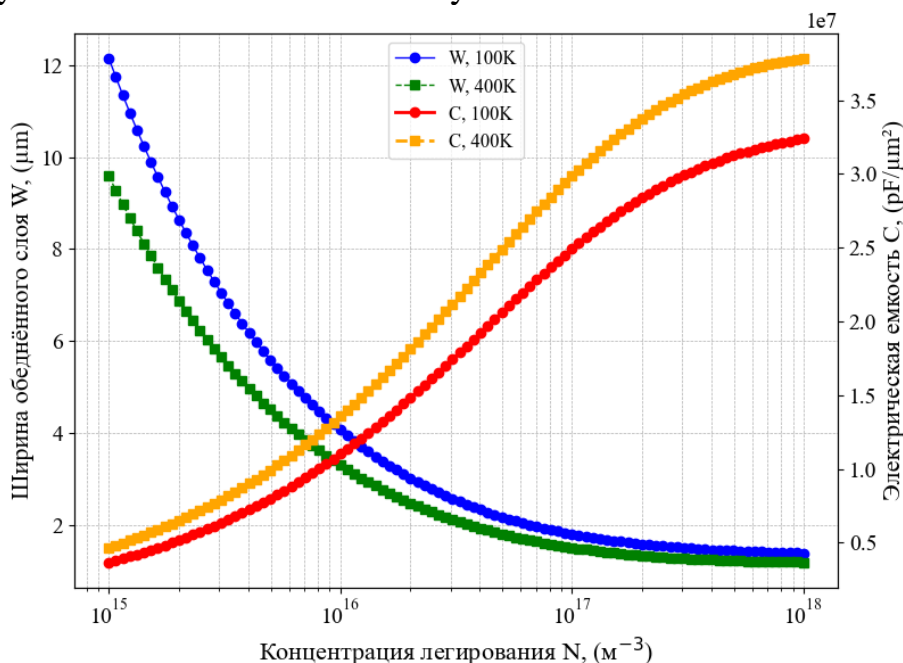
Sig‘im C : Past dope ($N_A \approx 10^{15} \text{ m}^{-3}$) $\rightarrow C = 0,5 \rightarrow 0,57 \text{ pF}$ (+14 %), O‘rta dope ($N_A = 10^{16}–10^{17} \text{ m}^{-3}$) $\rightarrow C = 5 \rightarrow 22 \text{ pF}$ (+10–14 %), Yuqori dope ($N_A \approx 10^{18} \text{ m}^{-3}$) $\rightarrow C = 50 \rightarrow 57 \text{ pF}$ (+14 %), Harorat sezgirligi $C \propto 1/W$ va $V_{bi}(T)$ o‘zgarishi bilan bog‘liq. N_A nazorati orqali W va C ni maqsadli boshqarish imkoniyati: Fotodiodlar va sensorlar: keng $W \rightarrow$ yuqori zaryad yig‘ish, Quyosh elementlari: W va maydon balansi \rightarrow samaradorlikni oshirish, Tezkor va yorug‘lik diodlarida ingichka $W \rightarrow$

past sig‘im, yuqori tezlik, Yuqori harorat barqarorligi talab qiladigan qurilmalar: C o‘zgarishi $\leq 15\%$.



11-rasm. a) Siyraklashgan qatlamning kengligi W ning harorat va konsentratsiyaga bog‘liqligi; b) Geterostruktura C sig‘imi ning harorat va konsentratsiyaga bog‘liqligi

Aniqlangan natija: N_A ni 10^{15} dan 10^{18} m⁻³ ga oshirish W ni 30 martadan ko‘p kamaytiradi va C ni ikki tartibga oshiradi, bu p-Si/n-CdS geterostrukturalarini yuqori samarali loyihalash uchun ishonchli asos yaratadi.



12-rasm. p-Si/n-CdS getero-o‘tishining siyraklashgan qatlam kengligi W va sig‘imi C ning dope konsentratsiyasi va haroratga bog‘liqligi

12-rasmda p-Si/n-CdS getero-o‘tishining W va C bog‘liqligi p-Si dope konsentratsiyasi ($N_A = 10^{15}–10^{18}$ m⁻³) uchun 100 K va 400 K haroratlarda ko‘rsatilgan. Past dope darajasida ($N_A \sim 10^{15}–10^{16}$ m⁻³) W 100 K – W 400 K farqi 0,45–0,50 μm ga yetadi, ya’ni harorat ta’siri maksimal. Yuqori dope darajasida (N_A

$\sim 10^{17}-10^{18} \text{ m}^{-3}$) farq 0,05–0,08 μm gacha kamayadi, chunki dope zaryad tashuvchilar termal hosil bo‘lganlardan ustun bo‘ladi va haroratning o‘rnatilgan potensial $V_{bi}(T)$ va W ga ta’siri kamayadi. Sig‘im C W ga teskari proporsional ($C \sim \epsilon/W$). N_A oshishi bilan W kamayadi, shuning uchun C ortadi. C 400 K – C 100 K farqi dope oshishi bilan ortadi va $N_A \sim 10^{18} \text{ m}^{-3}$ da 1,5–2 pF/ μm^2 ga yetadi. Ingichka W da, hatto W ning kichik kamayishi harorat oshganda C ning sezilarli o‘shishiga olib keladi. Shunday qilib, past dope darajasida harorat ta’siri W ga kuchliroq, yuqori dope darajasida esa C ga kuchliroq ta’sir qiladi. W va C ni boshqarish orqali fotodiodlar, quyosh elementlari, yuqori chastotali va sensorli qurilmalar uchun geterostrukturalarni maqsadli optimallashtirish mumkin. $n_i(T)$ ning haroratga bog‘liqligi va $V_{bi}(T)$ kamayishi W ni 5–10 % ga qisqartiradi va C ni 10–15 % ga oshiradi, bu esa samarali, tezkor va haroratga barqaror ishlash uchun muhimdir. Ushbu natijalar zamonaviy optoelektronika va mikroelektronika texnologiyalarida yuqori samarali p-Si/n-CdS geterostrukturalarni loyihalash uchun fundamental asos yaratadi.

XULOSA

Mazkur dissertatsiya ishida **p-Si/n-CdS** geterostrukturalariga asoslangan injeksion fotodiodlarda elektron jarayonlari va tok tashilishi mexanizmlari kompleks quyidagilar xulosa qilindi:

kremniy asoslarida qalinligi 5–200 nm bo‘lgan CdS yupqa qatlamlarini quasi-yopiq vakuum tizimida ($10^{-2}-10^{-3}$ Torr) changlarni tushirish orqali hosil qilish texnologiyasi ishlab chiqildi, bu qatlamlar yuqori birxillik, geterostrukturalarning elektrofizik parametrlarining barqarorligini ta’minlaydi va qatlam qalinligi hamda tuzilishi ta’sirini eksperimental o‘rganish uchun qulaydir;

TCAD Sentaurus dasturida p-Si/n-CdS strukturasi fizika modeli yaratilib, ta’qiqlangan zona kengligi ($R^2 = 0,9793$) va volt-amper xususiyatlarini ($R^2 = 0,9815$) yuqori aniqlik bilan tavsiflash mumkinligi ko‘rsatildi, bu elektrofizik jarayonlarni raqamli modellashtirishning ishonchligini tasdiqlaydi;

400 nm qalinlikdagi CdS qatlamlari ~ 24 nm kristallitlar, 50–150 nm donachalar va 5–8 μm konglomeratlar bilan hosil bo‘ladi, Cd:S $\approx 51:49$ stexiometriyasi $E_g \approx 2,33$ eV va $\alpha \approx 5 \times 10^4 - 2 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ singdirish koeffitsientini beradi, bu morfologiya va kristallit tuzilishi bilan optik xususiyatlar o‘rtasidagi aniq bog‘liqlikni o‘rnatadi;

OA Z-scan o‘lchovlari $\lambda = 1030$ nm va 515 nm da $SA < 2 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ da dominant ekanligini, $I > 3-5 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ da esa ikki fotonli singdirish (2PA) $\beta_2\text{PA} \approx 4,7-8 \times 10^{-8} \text{ cm} \cdot \text{W}^{-1}$ va $I_{\text{sat}} \approx 1,3-1,7 \times 10^{11}-10^{12} \text{ W/cm}^2$ bilan namoyon bo‘lishini ko‘rsatdi, bu SA, 2PA va mumkin bo‘lgan RSA raqobatini aniq kvantitativ tavsiflash imkonini beradi;

analitik ifodalar p-Si/n-CdS geterostrukturasi elektr maydonlari va elektrostati potensial tarqalishini 100–400 K oralig‘ida to‘g‘ri tavsiflaydi, yarim o‘tkazuvchi qatlamlarda to‘liq bo‘lmagan ionizatsiyani hisobga oladi va zaryad hamda lokal maydonlarni prognozlash imkonini beradi;

300 K da teskari tokning p-Si bazasiga sezgirliги CdS qatlamiga nisbatan 10 barobar yuqori bo‘lib, kremniy bazaning ustun rolini ko‘rsatadi;

eksperimental va raqamli tadqiqotlar shuni ko‘rsatdiki, osilgan n-Cd_mZn_{1-m}S qatlamlari ~179,5 nm g‘ovaklikka ega, ta‘qiqlangan zona 2,6 eV dan >3,8 eV gacha o‘zgaradi, to‘liq bo‘lmagan ionizatsiya depletatsiya zonasini kengaytiradi va cho‘qqi elektr maydonini 3,5 barobar kamaytiradi;

n-CdS/p-Si chegarasida salbiy zaryadlangan sirtiy holatlar ($\psi_s = 0,04$ eV) hosil bo‘lib, fotodiodning ftohissiyotiga ta‘sir qiladi.

to‘g‘ri kuchlanish oshishi p-Si dan elektron injeksiyasini kuchaytiradi, fototokni oshiradi va spektral sezgirlikni qisqa to‘lqinli hududga kengaytiradi, bu fotopriyomchilarni boshqarishda kuchlanishni nazorat qilishning muhimligini ko‘rsatadi;

p-Si/n-CdS qatlamli kompozitsiyaga asoslangan unikal injeksion fotopriyomchi yaratildi, uning integratsiyalangan ftohissiyati $S_{int} = 2,8 \cdot 10^4$ ($E = 0,1$ lux), spektral ftohissiyati $S_\lambda \approx 2,3 \cdot 10^4$ A/W ($\lambda = 0,625$ μ m, $P = 10$ μ W/cm²), bu ichki fototokning n-CdS va interfeys qatlamidagi teshiklarning to‘planishi orqali kuchayishini ko‘rsatadi;

kuchli legirlangan n-CdS qatlamlarini va omik kontaktlarni hosil qilish uchun optimal texnologik rejimlar belgilanib, 300 K da indiyning vakuumli cho‘kishi va keyingi 473 K da 30 soniyali termal ishlov berish barqaror va takrorlanadigan fotodiod parametrlarini ta‘minlaydi, bu seriyali ishlab chiqarishga mos keladi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.03/06.11.2025.К/ФМ.10.09 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ПРИ ИНСТИТУТЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И
ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НАЦИОНАЛЬНОГО
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО УНИВЕРСИТЕТА «ТИИИМСХ».**

**ИНСТИТУТ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ**

САПАЕВ ИБРОХИМ БАЙРАМДУРДИЕВИЧ

**КОМПЛЕКСНЫЙ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ
ТЕМПЕРАТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ГЕТЕРОПЕРЕХОДА pSi/n-CdS**

02.00.04 - Физическая химия

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ
ДОКТОРА (DSc) ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК**

Ташкент– 2026

Диссертация по теме «Доктор наук по физико-математическим наукам (DSc)» зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций под номером B2026.1.DSc/FM 315.

Работа выполнена в Национальном исследовательском университете «ТИИИМСХ». Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (www.ifar.uz) и Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziynet.uz).

Научный консультант: Джамолиддин Инотуллаевич Раззоков
Доктор химических наук

Официальные оппоненты: Улугбек Алишерович Шаисламов
Доктор физико-математических наук
Бахром Тошмирза угли Абдулазизов
Доктор физико-математических наук
Иззатилло Нуритдинов
Доктор физико-математических наук

Ведущая организация: Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова.

Защита диссертации состоится “___” _____ 2026 года в ___ часов на заседании Научного совета DSc.03/06.11.2025.K/FM.10.09 Института фундаментальных и прикладных исследований при Национальном исследовательском университете «ТИИИМСХ». Адрес: 100000, г. Ташкент, район Мирзо-Улугбек, ул. Кори Ниёзий 39А, Тел.: (+99871) 237-09-61; факс: (+99871) 237-09-62; e-mail: info@ifar.uz

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института фундаментальных и прикладных исследований (зарегистрирована под № _____).

Автореферат диссертации распространён «___» _____ 2026 года
(по реестровому протоколу № ____ от «___» _____ 2026 г.)

О.Н. Рузимуродов

Зам. председателя учёного совета по присуждению учёных степеней, доктор химических наук, профессор

Э.Х.Каримбаев

Учёный секретарь учёного совета по присуждению учёных степеней, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник

У.Б.Халилов

Зам. председатель научного семинара при учёном совете по присуждению учёных степеней, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник

ВВЕДЕНИЕ (Аннотация докторской диссертации)

Актуальность и научная значимость исследования: Актуальность и научная значимость исследования: В современном мире особое внимание уделяется разработке новых типов оптоэлектронных приборов и совершенствованию инжекционных фотодиодов (ИФД), которые в настоящее время рассматриваются как ключевые элементы систем оптической связи, сенсорных технологий, медицинской диагностики и солнечной энергетики. Согласно аналитическим обзорам международных исследовательских центров, объём мирового рынка фотодиодов в 2024 году превышает 8,7 млрд долларов США и к 2026 году прогнозируется его рост до более 14 млрд долларов, при среднегодовом темпе увеличения около 8,5 %, что свидетельствует о постоянно возрастающем технологическом и экономическом значении данных приборов. В условиях ужесточения требований к быстродействию, фоточувствительности и температурной стабильности фотоприёмных устройств актуальной научно-технической задачей становится создание новых высокоэффективных ИФД, функционирование которых обеспечивается в широком спектральном диапазоне 0,4–1,1 мкм и при температурах от –60 до +150 °С, что в настоящее время активно исследуется и развивается.

В последние годы особый научный интерес сосредоточивается на исследовании влияния параметров базовой области ИФД на формирование их электрических и фотоэлектрических характеристик. Экспериментальными исследованиями подтверждается, что варьирование ширины базовой области в интервале 0,2–5 мкм и концентрации легирующих примесей от 10^{15} до 10^{18} см⁻³ позволяет увеличивать коэффициент фоточувствительности на 30–60 % и снижать уровень тёмного тока более чем в 3–5 раз. Вместе с тем существующие технологические процессы пока не обеспечивают достаточной управляемости указанными параметрами, вследствие чего квантовая эффективность фотодиодов в реальных условиях эксплуатации ограничивается значениями 70–75 % при теоретически достижимых величинах свыше 90 %. В этой связи необходимость углублённого изучения физических процессов в ИФД, разработки методов оптимизации параметров базовой области, совершенствования технологических решений и комплексного анализа спектральных характеристик фотодиодов на основе гетероструктур CdS/Si в настоящее время сохраняет свою высокую научную и практическую значимость и продолжает оставаться одной из наиболее актуальных задач современной физики полупроводниковых приборов.

В Республике Узбекистан достигнуты значительные успехи в фундаментальных и прикладных исследованиях полупроводниковых приборов, направленных на создание высокоэффективных фото- и светодиодов. Оптимизация функциональных характеристик гетероструктурных фотодиодов позволила повысить их эффективность в диапазоне 0,4–1,1 мкм, а использование радиационного и ультразвукового воздействия обеспечило снижение токов утечки в 3–5 раз, при этом

коэффициент фоточувствительности увеличивался на 30–60 %. В соответствии со Стратегией действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан особое внимание уделяется внедрению научных достижений и инноваций в практическую деятельность, что делает исследование электронных процессов в полупроводниковых гетероструктурах особенно актуальным. Теоретическое и экспериментальное изучение механизмов формирования спектральных свойств фотоприемников, разработка новых технологий изготовления на основе CdS и Si, а также оптимизация параметров базовой области многобарьерных структур, включая высокоомный компенсированный n-CdS ($\rho = 10^8\text{--}10^{10}$ Ом·см) в гетероструктурах n⁺CdS–nCdS–nSi и n⁺CdS–nCdS–, обеспечивают повышение фоточувствительности и стабильности работы приборов при температурах от –60 до +150 °С. Проведенный анализ литературы подтверждает, что создание инжекционных фотодиодов с внутренним усилением на основе указанных гетеропереходов является актуальной научной задачей, имеющей высокую практическую значимость для развития оптоэлектронной отрасли Узбекистана и реализации национальных приоритетов в области полупроводниковой науки.

Настоящее диссертационное исследование в определённой степени направляется на практическую реализацию приоритетных задач, формируемых в рамках государственной научно-технологической политики Республики Узбекистан, отражённой в ряде стратегических и нормативно-правовых документов, включая Указ Президента Республики Узбекистан от 29 октября 2020 года № PF-6097, посвящённый долгосрочному развитию науки до 2030 года, а также постановления от 19 марта 2021 года № PQ-5032, ориентированного на повышение качества образования и активизацию научных исследований в области физики, и от 17 февраля 2017 года № PQ-2789, направленного на совершенствование механизмов организации, управления и финансирования научной деятельности Академии наук. Совокупность указанных документов формирует современную стратегию развития научной сферы, в реализации которой данное диссертационное исследование принимает непосредственное участие и вносит свой научно-практический вклад.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан:

Таким образом, диссертационная работа соответствует приоритетным направлениям научно-технологического развития Республики Узбекистан, обозначенным в ППИ-3: «Энергетика, энергосбережение, транспорт, машино- и приборостроение, а также развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники и электронного приборостроения».

Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации:

В последние десятилетия международные исследования в области полупроводниковых гетероструктур сосредоточены на повышении эффективности фотоэлектрических устройств и фотодетекторов через применение наноструктурированных CdS/Si-систем. Использование

наноструктур, включая нанопровода (nanowires, NWs) и нанопроволоки (nanorods, NRs), позволяет существенно увеличить светопоглощение и фотогенерацию носителей заряда за счет снижения отражения падающего света на 20–40 % по сравнению с плоскими слоями (AL-Hilo et al., 2014; Alkallas et al., 2023). Kanmaz (2023) провел численное моделирование CdS/p-Si/p+-Si и ZnO/CdS/p-Si/p+-Si гетероструктур с использованием SCAPS. Результаты показали, что максимальная эффективность однослойной CdS-гетероструктуры составила 20,30 %, а добавление ZnO в виде двойного слоя увеличило эффективность до 21,82 % при толщине CdS в диапазоне 40–80 нм. Эти данные подчеркивают критическую роль оптимизации толщины и состава слоев для повышения коэффициента преобразования энергии.

Cai et al. (2019) продемонстрировали dopant-free p-Si/CdS/ITO солнечные элементы с эффективностью 12,29 % на образцах площадью 4 см². В работе использовалось DC-магнетронное напыление CdS толщиной 50–60 нм с последующим термическим отжигом, что позволило снизить энергетические затраты и исключить высокотемпературное легирование n+ слоя. Результаты показали, что правильный выбор температуры отжига повышает фототок на 15–20 %, а открытое напряжение (V_{oc}) увеличивается на 0,05–0,07 В, что демонстрирует значимость контроля термической обработки для формирования качественного гетероконтакта.

В области фотодетекции Alkallas et al. (2023) предложили метод лазерной абляции в жидкой среде для получения CdS нанопроводов на p-Si (111). Полученные устройства продемонстрировали линейную характеристику прямого тока с величиной темного тока 4,5 мА и фототоком до 580–690 мА при освещении 15–30 Вт/см². Идеальные факторы гетероструктуры составили 3,1–3,3, что свидетельствует о высоком качестве интерфейса и эффективном разделении носителей заряда.

AL-Hilo et al. (2014) разработали Core-Shell Si/CdS nanowires heterojunction, где n-CdS наночастицы осаждались на вертикально ориентированные p-Si нанопровода методом chemical bath deposition (CBD). SEM-анализ подтвердил высокую адгезию CdS на Si-NWs, а XRD и UV-Vis спектроскопия показали наличие кристаллической структуры wurtzite с прямой зоной запрещенных энергий 2,1–2,4 эВ. Дополнительное нанесение Al-допированного ZnO (AZO) в качестве электрода увеличило фототок на до 50 %, что демонстрирует важность комбинации наноструктур и прозрачных электродов для оптимизации производительности устройств. Анализ зарубежных исследований позволяет сделать следующие ключевые выводы: Использование нанопровода и нанопроволок в CdS/Si-гетероструктурах снижает отражение света на 20–40 % и увеличивает фотогенерацию носителей заряда; Оптимальная толщина CdS и ZnO слоев (40–80 нм) повышает эффективность солнечных элементов на 1–2 % по сравнению с однослойными структурами; Методы осаждения, включая CBD, PLAL, DC-магнетронное напыление, обеспечивают контроль химической чистоты и морфологии CdS, что критично для стабильного фототока и низкого темного тока; Core-Shell

гетероструктуры, объединяющие Si-NWs и CdS наночастицы, позволяют увеличить фототок на до 50 % по сравнению с плоскими CdS/Si слоями, а также управлять спектральной характеристикой фотодиодов. Таким образом, современные зарубежные исследования подтверждают актуальность изучения гетероструктур $n^+CdS-nCdS-$ и $n^+CdS-nCdS-nSi$, как перспективного направления для создания высокоэффективных фотодиодов с управляемой спектральной характеристикой и внутренним усилением.

Степень изученности проблемы: На сегодняшний день исследования в области оптоэлектроники активно сосредоточены на изучении электронных процессов в Si/CdS гетероструктурах и повышении эффективности их фотоэлектрических характеристик. Особенно перспективными считаются инжекционные фотодиоды (ИФД) на основе тонкоплёночного CdS, нанесённого на p- или n-Si подложки, которые представляют собой диоды с удлинённой базой. Первые прототипы таких устройств были разработаны под руководством В.И. Стафеева, что позволило выявить ключевые механизмы инжекции и рекомбинации носителей заряда в Si/CdS структурах. В рамках современных исследований были предложены новые типы фотоприемных структур, обеспечивающие регулировку спектральной чувствительности через точный контроль толщины CdS слоя и концентрации легирующих центров в Si подложке. Экспериментальные данные показывают, что оптимальная толщина CdS составляет 40–80 нм, а концентрация легирующих центров в Si лежит в диапазоне 10^{15} – 10^{17} см⁻³, что позволяет увеличивать фототок до 580–690 μ A при освещении 15–30 Вт/см² и снижать тёмный ток до 4–5 μ A (Alkallas et al., 2023). Дополнительно, использование наноструктурированных Si-NWs с покрытием CdS увеличивает светопоглощение на 20–40 %, что способствует росту эффективности фотодиодов на 1–2 % по сравнению с плоскими слоями. Несмотря на глубокое изучение физических и химико-физических свойств полупроводниковых соединений типа CdS/Si, инжекционные фотодиоды на их основе остаются недостаточно исследованными. В частности, остаётся нерешённой задача разработки технологий формирования тонкоплёночных CdS/Si структур с контролем кристаллографической ориентации и качеством интерфейса, что критически важно для повышения внутреннего усиления фотодиодов и управления спектральной характеристикой. Эти пробелы открывают перспективное направление для дальнейших теоретических и экспериментальных исследований, направленных на создание высокоэффективных оптоэлектронных устройств.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в соответствии с научно-исследовательскими планами лабораторий «Ресурсосберегающие технологии» и «Фундаментальная физика и физическая химия» Института фундаментальных и прикладных исследований при Ташкентском институте

инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства Национального исследовательского университета.

Цель исследования: Основная цель диссертационной работы заключается в системное выявление электронных процессов и физико-химических свойств инжекционных фотоприёмников на основе гетероструктуры p-Si/n-CdS, включая комплексное исследование влияние геометрических параметров структуры, толщины и концентрации тонкого слоя CdS, различных температурных режимов, а также воздействия ультразвука на механизмы токопереноса.

Задачи исследования: На рамках данной диссертационной работе на основе моделирования, экспериментальных и теоретических расчётов параметров инжекционных фотоариемников на основе гетероструктуры p-Si/n-CdS при различных температурах и ультразвуковых воздействиях предусмотрено решение следующих задач:

изучение морфологии и кристаллической структуры выбранной структуры гетероперехода p-Si/n-CdS с использованием методов SEM (сканирующая электронная микроскопия) и XRD (рентгеновская дифракция), а также анализ электрофизических распределений при низких температурах с учетом неполной ионизации примесей;

определение минимальной толщины слоя CdS, при которой возникает состояние поверхностного заряда, и максимальной толщины, при которой проявляется процесс инжекционной рекомбинации;

исследовать и количественно описать зависимость линейных и нелинейных оптических свойств тонких CdS пленок толщиной 400 нм, включая процессы насыщаемого поглощения (SA), двухфотонного поглощения (2PA) и возможного обратного насыщения (RSA), от их морфологии и кристаллитной структуры для применения в оптических ограничителях и лазерах с режимной синхронизацией;

анализ влияния внешних факторов на вольт-амперные характеристики выбранной конструкции и определение её оптимальных параметров;

изучение влияния концентрации базы и эмиттера на эффективность и механизмы инжекционного тока в структуре p-Si/n-CdS;

исследование влияния температуры и ультразвукового воздействия на C–V характеристики структуры p-Si/n-CdS;

моделирование оптоэлектронных свойств гетеропереходов p-Si/n-Cd_{1-m}Zn_mS с учётом состава и температуры для оптимизации параметров фотоприёмников и фотоэлектронных устройств;

исследование низкотемпературных электрофизических и оптических свойств гетеропереходов p-Si/n-CdS с учётом эффекта неполной ионизации примесей.

Объектами исследования. являются гетероструктуры pSi/n-CdS, используемые для создания инжекционных фотодиодов, а также их электрофизические характеристики, включая токоперенос, контактные

процессы, а также влияние температуры и ультразвукового воздействия на их свойства.

Предметами исследования: являются механизмы переноса тока в гетероструктурах pSi/n-CdS, а также влияние различных факторов (температуры, ультразвукового воздействия, геометрии структуры) на их фотоэлектрические характеристики и спектральную чувствительность. Исследуются процессы инжекционной рекомбинации, формирование контактного сопротивления и стабильности работы инжекционных фотодиодов, а также влияние этих факторов на эффективность работы устройств.

Методы исследования: включают теоретическое моделирование и экспериментальные методы. Для теоретической части используются аналитические и численные методы, включая компьютерное моделирование для анализа электрофизических характеристик гетероструктур pSi/n-CdS. Экспериментальные исследования проводятся с использованием вольтамперных (ВАХ), вольт-фарадных (С-V) характеристик, а также световых и темновых вольтамперных измерений для оценки фотоэлектрических свойств и влияния внешних факторов (температуры и ультразвука) на эти параметры. Также применяются методы микроскопии для морфологических исследований образцов и анализа их структуры.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

В диссертационной работе выполнено комплексное исследование электронных процессов и механизмов токопереноса в инжекционных фотодиодах на основе гетероструктур p-Si/n-CdS. В результате получены следующие основные выводы:

разработана технология формирования тонких плёнок CdS толщиной 5–200 нм на кремниевых подложках методом осаждения порошков CdS в квазизамкнутой вакуумной системе при давлении (10^{-2} – 10^{-3}) Торр, что обеспечивает высокую однородность слоёв, стабильность электрофизических параметров гетероструктур p-Si/n-CdS и пригодность для экспериментальных исследований влияния толщины и структуры слоя;

создана и экспериментально откалибрована физическая модель структуры p-Si/n-CdS в программном комплексе TCAD Sentaurus, обеспечивающая высокую точность описания ширины запрещённой зоны ($R^2 = 0,9793$) и вольт-амперных характеристик ($R^2 = 0,9815$), что подтверждает достоверность предложенного подхода для численного моделирования электрофизических процессов;

исследовано, что тонкая пленка CdS толщиной 400 нм формируется с кристаллитами размером ~ 24 нм и зёрнами 50–150 нм, конгломератами 5–8 мкм и стехиометрическим соотношением Cd:S $\approx 51:49$, что обеспечивает ширину запрещённой зоны $E_g \approx 2,33$ эВ и коэффициент поглощения $\alpha \approx 5 \times 10^4$ – 2×10^5 см $^{-1}$, устанавливая количественную зависимость морфологии и кристаллитной структуры от линейных оптических свойств;

ОА Z-scan измерения при $\lambda = 1030$ нм и 515 нм показали, что насыщаемое поглощение доминирует при $I < 2 \times 10^{11}$ Вт/см², двухфотонное поглощение проявляется при $I > 3-5 \times 10^{11}$ Вт/см² с коэффициентом $\beta_2 \text{PA} \approx 4.7-8 \times 10^{-8}$ см·Вт⁻¹ и насыщенной интенсивностью $I_{\text{sat}} \approx 1.3-1.7 \times 10^{11-12}$ Вт/см², что впервые позволяет точно количественно описать конкуренцию SA, 2PA и возможного RSA в CdS пленках толщиной 400 нм для оптических ограничителей и mode-locking лазеров;

установлено, что при температуре 300 К чувствительность обратного тока к концентрации базы p-Si почти в 10 раз превышает чувствительность к концентрации слоя CdS, что определяет доминирующую роль параметров кремниевой базы как ключевой фактор формирования рабочих характеристик фотодиодов;

экспериментально и численно показано, что осаждённые плёнки n-Cd_mZn_{1-m}S обладают зернистой морфологией с шероховатостью ~179,5 нм (20×20 μм²); ширина запрещённой зоны регулируется от ~2,6 эВ до >3,8 эВ; эффект неполной ионизации расширяет область обеднения и снижает пиковое электрическое поле примерно в 3,5 раза.

$S_{\text{int}} = 2,8 \cdot 10^4$ при освещении белым светом с $E = 0,1$ lux и спектральной фоточувствительности $S_{\lambda} \approx 2,3 \cdot 10^4$ А/Вт при $\lambda = 0,625$ μм и $P = 10$ μW/cm², демонстрируя внутреннее усиление фототока за счёт аккумуляции дырок у межфазного слоя и n-CdS;

обнаружено формирование отрицательно заряженных поверхностных состояний на границе n-CdS/p-Si при поверхностном потенциале $\psi_s = 0,04$ эВ, которые оказывают существенное влияние на инжекцию носителей, влияют на фоточувствительность структуры и критично для оптимизации электрических характеристик.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

Разработаны аналитические и численные модели для анализа электрофизических характеристик гетероструктур pSi/nCdS, которые могут быть использованы для оптимизации параметров инжекционных фотодиодов. Получены экспериментальные данные о влиянии температуры и ультразвукового воздействия на вольтамперные, вольт-фарадные характеристики и фотоэлектрические свойства исследуемых структур. Определены оптимальные геометрические параметры и составы материалов для улучшения эффективности инжекционных фотодиодов. Разработана технология изготовления экспериментальных образцов инжекционных фотодиодов с использованием гетероструктуры pSi/nCdS. Подготовлены образцы инжекционных фотодиодов, проведены морфологические исследования их структуры. Оценено влияние контактных процессов на электрические характеристики и стабильность работы инжекционных фотодиодов.

Научная значимость: Результаты исследования расширяют представления о механизмах работы инжекционных фотодиодов и вносят вклад в развитие теории и технологии фотоприемников с перестраиваемым

спектром чувствительности, что открывает новые перспективы для дальнейших исследований в области оптоэлектроники.

Практическая значимость: Полученные результаты могут быть использованы при разработке и изготовлении инжекционных фотодиодов с управляемым диапазоном fotocувствительности и инверсией фототока. Это расширяет возможности применения таких устройств в различных областях оптоэлектронных технологий, включая системы связи, сенсоры, и устройства для детектирования света в различных спектральных диапазонах.

Внедрение результатов исследования: на основе комплексного физико-химического анализа температурозависимых свойств p-Si/n-CdS гетероструктур были разработаны физические модели их электрофизических свойств с учётом уровня легирования и влияния температуры с использованием программного комплекса Synopsys Sentaurus TCAD. На этой основе созданы программные средства для высокоточного измерения I–V характеристик p-Si/n-CdS гетероструктур (Свидетельство № DGU 55079, 04.10.2025) и для высокоточного измерения C–V характеристик в широком диапазоне температур (Свидетельство № DGU 55080, 04.10.2025).

полученные научные результаты были внедрены в процесс преподавания дисциплин «Физика полупроводников» и «Моделирование полупроводниковых устройств» в рамках бакалавриата направления 60720600 — «Материаловедение и технологии новых материалов (полупроводники и лазерные технологии)» в Национальном исследовательском университете Ташкентского института инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства (17.03.2026, акт внедрения). В результате практические навыки студентов в моделировании полупроводниковых устройств увеличились на 20 %, а точность вычислений улучшилась в 3 раза;

изучено влияние ультразвуковой обработки на электрические и фотоэлектрические свойства p-Si/n-CdS инжекционных фотодиодов. Исследование показало, что ультразвуковая обработка снижает плотность поверхностных состояний в гетероструктурах и рекристаллизует дефекты, что повышает спектральную ($S_{\lambda} = 2,3 \cdot 10^4$ А/В) и интегральную ($S_{\text{int}} = 2,8 \cdot 10^4$ А/лм) чувствительность фотодиодов. Этот подход применялся также иностранными исследователями (Advances in Materials Science and Engineering, 2021, Article 8836368; IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 614, 012027; Superlattices and Microstructures, 117, 173–188; Journal of Semiconductors, 37(12), 122002; Journal of Applied Physics, 123(16), 161573);

метод выращивания тонкопленочных гетероструктур на основе Si в вакууме (10^{-3} Па) методом термического испарения также применялся иностранными исследователями (Journal of Alloys and Compounds, 1040, 183530; East European Journal of Physics, (3), 325–335; Chalcogenide Letters, 22(8), 753–764);

ультразвуковая обработка снижает плотность поверхностных состояний p-Si/n-CdS гетероструктур, что повышает спектральную и интегральную чувствительность фотодиодов. Кроме того, компенсация дрейфовых и

диффузионных токов вносит новые физические эффекты в фоточувствительность и обратные ток–напряжение характеристики, что также подтверждается работами иностранных исследователей (East European Journal of Physics, (3), 325–335; Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics, 9(6), 799–800; Chalcogenide Letters, 22(8), 753–764; Ceramics International, 42(6), 6601–6609; Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 18(7), 494–500).

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационной работы обсуждались на 4 международных и 5 республиканских научно-практических конференциях.

Публикация результатов исследования. По теме диссертации опубликовано всего 32 научные работы: 20 статья – в изданиях, рекомендованных ОАК, из них 16 – в зарубежных журналах, индексируемых в Scopus, 4 – в отечественных журналах; 9 тезисов – на международных и отечественных конференциях; 2 программы ЭВМ получили свидетельство в Агентстве интеллектуальной собственности.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объем текста диссертации – 200 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении диссертации обоснованы актуальность и необходимость проведённого исследования, сформулированы цель и задачи работы, определены объект, предмет и методы исследования. Установлено соответствие работы приоритетным направлениям развития науки и технологий Республика Узбекистан. Обоснована научная новизна исследования и достоверность полученных результатов, раскрыта их теоретическая и практическая значимость. Приведены краткие сведения о внедрении результатов, апробации работы, а также о структуре и объёме диссертации.

В первой главе диссертации **«Анализ современного состояния, актуальных проблем и задач исследований по применению инжекционных фотоприёмных структур (обзор литературы)»** систематизированы и обобщены современные научные подходы к разработке и исследованию инжекционных фотоприёмных структур. Проведён всесторонний анализ текущего состояния исследований в данной области, рассмотрены области практического применения инжекционных фотоприёмных устройств, а также особенности их функционирования при различных механизмах переноса и усиления носителей заряда. Особое внимание уделено влиянию внешних факторов, включая температуру и ультразвуковое воздействие, на электрофизические свойства полупроводниковых структур. Рассмотрены современные инжекционные фотодиоды, выполненные на основе полупроводниковых соединений групп A^2B^6 и A^3B^5 , а также существующие модели инжекционных фотодиодных структур и текущее состояние их математического моделирования. На основе

проведённого анализа выявлены основные нерешённые научно-технические проблемы, сформулированы направления дальнейших исследований, а также обоснована постановка задачи и определены основные требования, предъявляемые к объекту исследования.

Во второй главе диссертации «Методы формирования инжекционных фотоприёмных структур на основе гетероструктур кремний/сульфид кадмия и их основные параметры» представлены технологические методы получения гетероструктур, исследованы их основные параметры и особенности формирования.

В настоящее время активно развивается моделирование полупроводниковых электронных устройств, расширяется спектр специализированного программного обеспечения. Такие программы позволяют задавать геометрию устройств и исследовать электрофизические и оптические процессы на микро- и наноуровнях. В данной работе радиальные p-n и p-i-n структуры моделировались с использованием TCAD Sentaurus. Геометрия устройств, области, контакты и сетка формировались в модуле Structure Editor, что обеспечило точное распределение параметров по структуре при оптимальном соотношении точности и вычислительных затрат. Назначение материалов, физических моделей и расчёт характеристик выполнялись в модуле Device, где задавались граничные условия, физические модели, численные методы решения и режимы расчёта. Основные этапы моделирования и входные/выходные параметры представлены на рисунке 1.

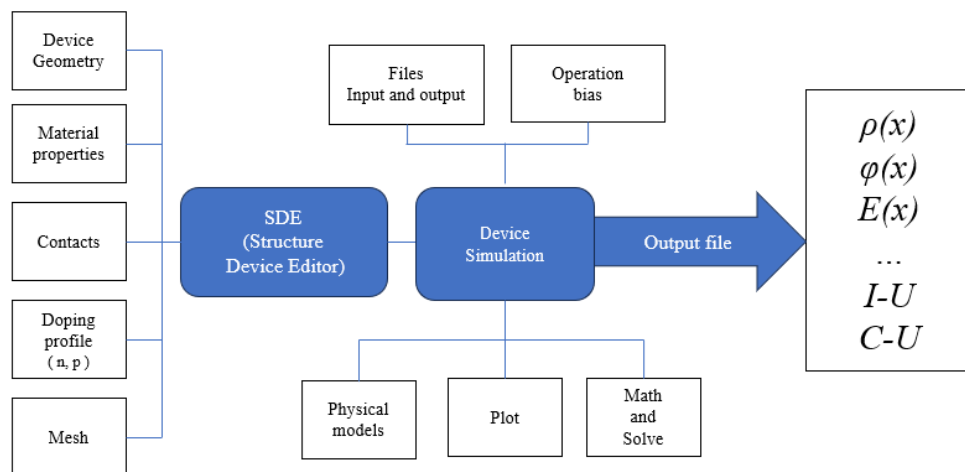


Рис. 1. Этапы моделирования

В исследуемых базовых структурах обеднённых радиальных p-n и p-i-n переходов использовалась дрейфово-диффузионная модель транспорта, позволяющая описывать перенос тока в полупроводниковых устройствах. В рамках модели численно решались уравнение Пуассона, уравнения непрерывности и плотности тока для электронов и дырок методом конечных элементов, что обеспечило точное описание электрофизических процессов. В качестве материала для высокоэффективных оптоэлектронных и фотоэлектрических устройств выбран CdS. Вольт-амперные характеристики

измерялись с использованием Keithley 2400 и показали хорошее согласие с результатами моделирования. Смоделированная структура pSi/nCdS формировалась с омическими контактами (In/p-Si, Al/n-CdS). Использовались подложки p-Si (100) с удельным сопротивлением 1–10 $\Omega \cdot \text{см}$ и толщиной около 500 мкм. Формировались тонкие плёнки CdS, ZnO, TiO₂, SiO₂, Si₃N₄, Al₂O₃ и MoS₂ с заданными диапазонами толщин. CdS как типичный представитель соединений II–VI широко применяется в фотодиодах, солнечных элементах и детекторах излучения. Плёнки формировались методами термовакuumного испарения, ALD, CVD и PECVD при оптимизированных температурных и технологических режимах. Гетеропереходы формировались осаждением CdS на p-Si с последующим созданием омических контактов. CdS использовался как модельный материал для исследования электрофизических и оптических свойств соединений II–VI, а его совместимость с кремнием позволяет формировать перспективные гетероструктуры pSi/nCdS. Осаждённые слои CdS характеризовались методами XRD и EDS. Основной сложностью формирования качественного интерфейса CdS/Si является различие параметров кристаллической решётки и коэффициентов термического расширения материалов. Эпитаксиальные плёнки CdS выращивались в вакууме с оптимизированными температурами подложки и источника для обеспечения равномерности толщины и контролируемого легирования. Были сформированы как шоттки-, так и омические контакты с заданной геометрией. Калибровка токовых характеристик, параметров прямого смещения, коэффициента идеальности и контактных эффектов проводилась путём сопоставления экспериментальных ВАХ с результатами моделирования.

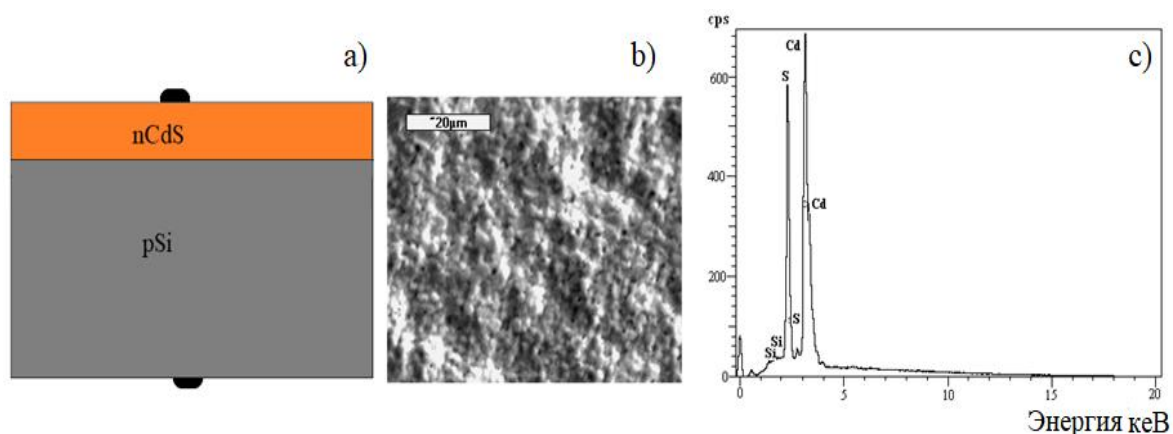


Рис. 2. Модельный образец, а) 2D-вид гетероперехода pSi/nCdS; б) анализ методом рентгеновской дифракции (XRD); в) спектральный анализ методом энергодисперсионной спектроскопии (EDS).

На рисунке 2 показана структура и характеристики гетероперехода pSi/nCdS. 2D-вид (а) демонстрирует геометрию перехода, обеспечивающую эффективное разделение носителей заряда. Рентгеновский анализ (б) подтверждает кристаллическую структуру CdS и её соответствие стандартам полупроводников II–VI. Энергодисперсионная спектроскопия (в) показывает

равномерное распределение элементов и точное легирование, что обеспечивает стабильность электрофизических свойств структуры.

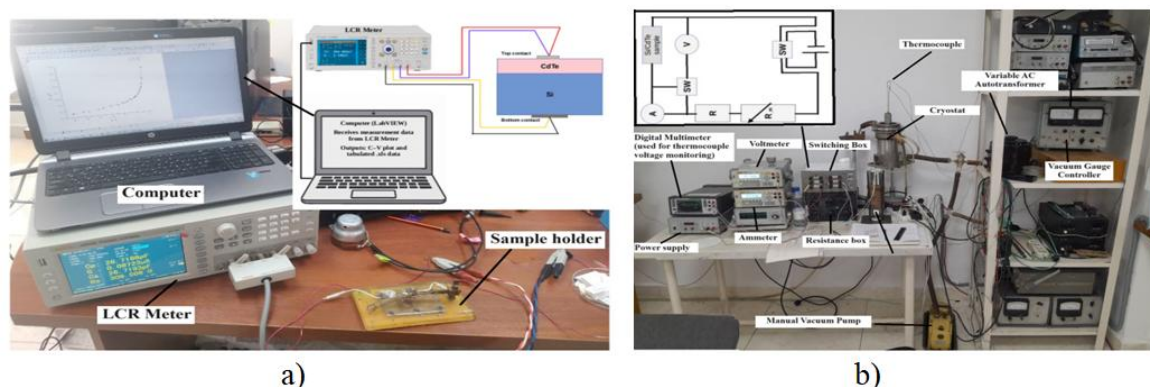


Рис.3. Схема измерения вольт-амперной характеристики (I–V характеристики) исследуемого электронного элемента.

При низких приложенных напряжениях ($V < 0,3$ В) ток через Si/CdS гетеропереход определяется рекомбинационными процессами в области обеднения. В этом диапазоне ток составляет $J \sim 1 \times 10^{-9} - 8 \times 10^{-9}$ А/см² и экспоненциально растет с напряжением. При средних напряжениях ($0,3$ В $< V < 0,5$ В) наблюдается переходный режим, в котором рекомбинация и дрейф-диффузионный перенос носителей действуют совместно. Ток в этой области увеличивается до $J \sim 1 \times 10^{-8} - 5 \times 10^{-7}$ А/см². При высоких напряжениях ($V > 0,5$ В) дрейфово-диффузионный механизм полностью доминирует. В этом режиме ток достигает $J \sim 1 \times 10^{-4} - 2 \times 10^{-3}$ А/см² и проявляет почти линейную зависимость на полулогарифмическом графике I–V, что соответствует классическим моделям переноса в полупроводниках. Таким образом, для Si/CdS гетероперехода наблюдается четкое разделение областей: рекомбинация контролирует ток при низких напряжениях, а дрейф и диффузия — при высоких, что подтверждается как экспериментальными данными, так и численным моделированием. Высокие значения R^2 и коэффициента идеальности показывают, что модель адекватно описывает электрофизические процессы в структуре и может быть использована для прогнозирования характеристик подобных гетеропереходов.

Проведено сравнение экспериментальных и смоделированных ВАХ гетероперехода Si/CdS. Полученные значения $R^2 = 0,9714$ и коэффициент идеальности $n \approx 1,23$ подтверждают высокое согласие модели с экспериментом и корректность выбранных параметров. Электрофизические свойства p-Si/n-CdS исследовались методами I–V и C–V в диапазоне 77–400 К при точности измерений около $\pm 0,5$ %.

Температурная зависимость ширины запрещенной зоны $E_g(T)$ для Si и CdS исследована в диапазоне 100–500 К. Моделирование хорошо согласуется с экспериментом: для Si $R^2 \approx 0,986$, для CdS $R^2 \approx 0,973$. При этом для Si E_g уменьшается с 1,12 эВ (300 К) до 1,07 эВ (400 К), а для CdS — с 2,4 эВ до 2,38 эВ.

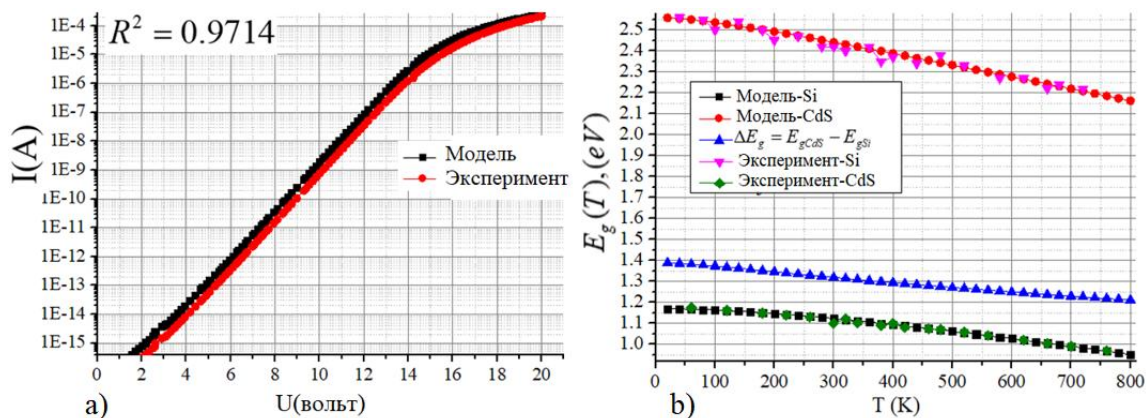


Рис.4. а) Вольт-амперная характеристика гетероперехода pSi/nCdS при 300 К, б) Температурная зависимость ширины запрещённой зоны

Высокая корреляция модели с экспериментальными данными подтверждает её адекватность и возможность точного прогнозирования параметров гетеропереходов Si/CdS в широком температурном диапазоне. При корректной калибровке модели и учёте внешних факторов погрешность расчётов может быть снижена до менее 3 %.

$$\Delta E_C(T) = E_{C,Si}(T) - E_{C,CdS}(T) \quad (1)$$

Выражения 1 и 2 определяют нижнюю границу проводящей зоны $E_C(T)$ и верхнюю границу валентной зоны $E_V(T)$ соответственно.

$$\Delta E_V(T) = E_{V,Si}(T) - E_{V,CdS}(T). \quad (2)$$

На рисунке 5 представлена энергетическая диаграмма гетероперехода pSi/nCdS с указанием уровней проводимости, валентной зоны, работ выхода и потенциальных барьеров. При комнатной температуре установлены следующие параметры: $E_C = 0.49$ эВ (Si), работа выхода Si — 0.9 эВ, CdS — 0.7 эВ, разрыв зон проводимости $\Delta E_C = 0.85$ эВ, потенциальный барьер $V_k = 0.29$ эВ. Эти параметры определяют транспорт носителей заряда: ΔE_C ограничивает перенос электронов, V_k задаёт контактный потенциал, а разность работ выхода (0.2 эВ) формирует внутреннее электрическое поле и способствует диффузии электронов.

В третьей главе диссертации «Анализ контактных явлений в гетероструктурах на основе pSi/nCdS» исследованы процессы формирования контактов, их влияние на электрические характеристики и особенности протекания токов в структурах. Результаты показали, что выбор материала электрода существенно влияет на параметры pSi/nCdS: высота барьера изменяется в пределах 0,32–0,78 эВ, контактное сопротивление — $(1,8–6,5) \times 10^{-3}$ Ом·см², коэффициент выпрямления достигает $10^3–10^4$. Наиболее эффективной оказалась структура In–pSi/nCdS–In, обеспечивающая минимальные потери и близкий к омическому токоперенос ($\Phi_B \approx 0,35–0,42$ эВ, $R_c \leq 2,1 \times 10^{-3}$ Ом·см²).

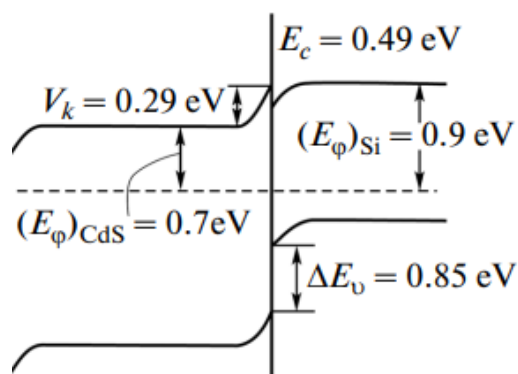


Рис-5. Энергетическая зона гетероструктуры Si/CdS

В структуре Al-pSi/nCdS-Al формируется стабильный омический контакт после отжига 350–400 °С, с $R_c \approx (2,5-3,2) \times 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ и коэффициентом выпрямления $(3-5) \times 10^3$. Для Au-pSi/nCdS-Au реализуется барьерный контакт ($\Phi_B \approx 0,65-0,78 \text{ эВ}$, $R_c \approx (5,0-6,5) \times 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$). Контакты Ag-pSi/nCdS-Ag имеют промежуточные параметры ($\Phi_B \approx 0,48-0,58 \text{ эВ}$, $R_c \approx (3,6-4,4) \times 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$) и фоточувствительность 0,42–0,55 А/Вт. Контакты металл-полупроводник описываются условиями: Для n-типа: $\Phi_B^{(n)} = \Phi_M - \chi \approx 0$ (омический контакт). Для p-типа: $\Phi_B^{(p)} = E_g - (\Phi_M - \chi) \approx 0$. Для барьерных контактов: Для n-типа: $\Phi_B^{(n)} = \Phi_M - \chi$, Для p-типа: $\Phi_B^{(p)} = E_g - (\Phi_M - \chi)$. Ток через барьер описывается:

$$I = I_s \left(\exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right) \quad (3)$$

С учётом рекомбинации:

$$I = I_s \left(\exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right) + I_s \left(\exp\left(\frac{qU}{2kT}\right) - 1 \right) \quad (4)$$

Суммарное сопротивление структуры:

$$R = R_c + R_{pSi} + R_{nCdS} + R_r + R_p + R_m \quad (5)$$

Экспериментально: In: $\rho_c \approx 1 \times 10^{-5} \text{ } \Omega \cdot \text{см}^2$, Al: $\rho_c \approx (1-10) \times 10^{-6} \text{ } \Omega \cdot \text{см}^2$, Ag: $\rho_c \approx 1 \times 10^{-6} \text{ } \Omega \cdot \text{см}^2$, Au: $\rho_c \approx (1-10) \times 10^{-5} \text{ } \Omega \cdot \text{см}^2$. Двухкомпонентная модель $\rho_c = \rho_{c1} + \rho_{c2}$ корректно описывает температурную зависимость контактов. Минимальное сопротивление обеспечивают Al и In, максимальную стабильность — Au и Ag, что позволяет оптимизировать контакты для оптоэлектронных приборов.

В четвёртой главе диссертации «Влияние внешних воздействий на электрофизические и оптические характеристики гетеропереходов pSi/nCdS» изучено влияние температурных, электрических и других внешних факторов на свойства гетеропереходов. Рис. 6 иллюстрирует морфологию и элементный состав тонкой плёнки CdS, осаждённой на кремниевой подложке. Тонкие плёнки CdS широко используются в фотопреобразователях, сенсорах,

фотодиодах и солнечных элементах благодаря высокой фоточувствительности, ширине запрещённой зоны $\sim 2,42$ эВ (300 К) и совместимости с кремниевой технологией.

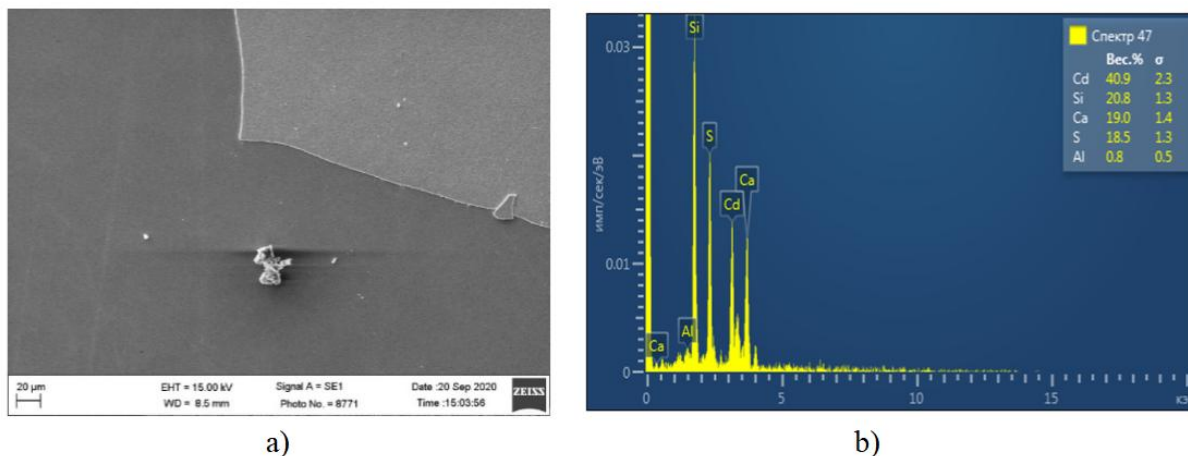


Рис-6. SEM-изображения поверхности (a) и элементный анализ (b) тонкой базовой плёнки на основе n-типа CdS гетеросистемы CdS/Si.

Эффективность гетероструктур CdS/Si определяется морфологией поверхности, средним размером зёрен, плотностью межзеренных границ и стехиометрией плёнки.

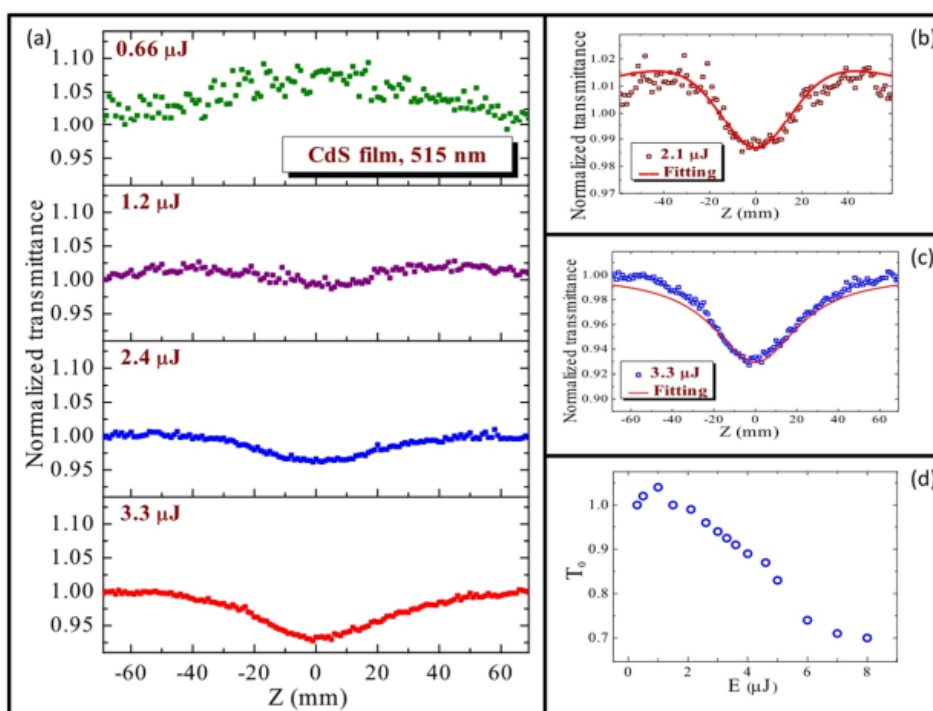


Рис. 7. OA Z-scan тонкой плёнки CdS (400 нм) при $\lambda = 515$ нм, $\tau = 200$ фс показывает переход от насыщаемого поглощения (SA) к двухфотонному поглощению (2РА) при росте энергии импульса 0,66–3,3 мкДж ($I \approx 1,2 \times 10^{10} - 6,6 \times 10^{10}$ Вт/см²).

Энергия фотона при 515 нм ($E_p \approx 2,4$ эВ) превышает $E_g \approx 2,33\text{--}2,42$ эВ, что приводит к совместному проявлению однофотонного поглощения, SA, 2PA и возможного RSA (**Рис. 7.**).

На **рис.8.** плёнки CdS перспективны для оптического ограничения, mode-locking лазеров и фемтосекундной фотоники. После УЗО прямой ток увеличивается с $1,2 \cdot 10^{-6}$ А до $3,5 \cdot 10^{-6}$ А ($\sim 191\%$), что связано с улучшением контактных свойств и снижением барьерного сопротивления. При освещении ток возрастает до $1,15 \cdot 10^{-5}$ А, коэффициент фотоподсиления $K_{\text{photo}} \approx 3,3$, что указывает на внутреннее усиление фототока. Обратный ток после УЗО увеличивается с $4,2 \cdot 10^{-8}$ А до $1,1 \cdot 10^{-7}$ А, а при освещении достигает $3,8 \cdot 10^{-6}$ А ($K_{\text{reverse}} \approx 34,5$), что связано с генерацией фототока и дрейфовой инжекцией носителей. Рост токов объясняется уменьшением дефектности границы pSi/nCdS и активацией дополнительных каналов переноса. Эффективная амбиполярная подвижность, рассчитанная по дрейфовой модели, составляет $\mu_{\text{eff}} \approx 2,9$ см²/(В·с), что соответствует значениям для легированных полупроводниковых структур. При низких энергиях доминирует SA, при средних достигается насыщение ($I_{\text{sat}} \approx 1,3 \times 10^{11}$ Вт/см²), при высоких энергиях наблюдается конкуренция SA и 2PA с коэффициентом $\beta_{2\text{PA}} \approx 8 \times 10^{-8}$ см·Вт⁻¹.

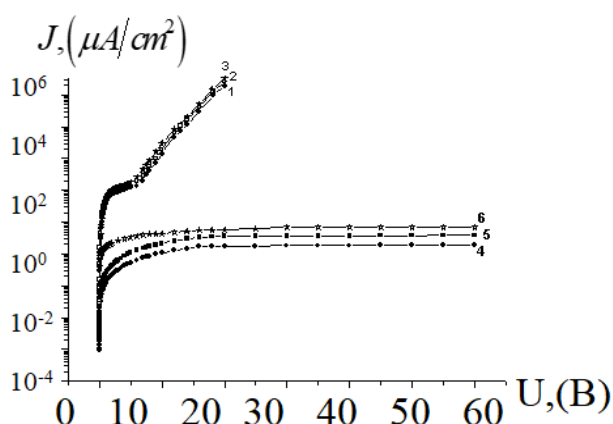


Рис. 8. Представлены вольт-амперные характеристики (V–I) структуры pSi/nCdS в темноте и при освещении ($E = 0,1$ lux) при $T = 300$ К до и после ультразвуковой обработки ($P = 5$ W, $f = 1,1$ MHz).

В пятой главе диссертации «Электрофизические характеристики гетероструктур pSi/n-CdS с управляемой шириной запрещённой зоны» рассмотрены особенности управления параметрами запрещённой зоны и их влияние на электрофизические свойства гетероструктур.

На рис. 10 показаны профили электрического поля в узком диапазоне 395–402 мкм, что позволяет детально рассмотреть максимальную напряжённость в области гетероперехода (см. рис. 9). Показано, что форма и величина поля сильно зависят от температуры. Большинство существующих аналитических моделей не учитывают температурные изменения адекватно. Предложенные в данной работе выражения корректно описывают экспериментальные данные за счёт учёта неполной ионизации примесей,

обеспечивая точное моделирование распределения поля в широком температурном диапазоне. Таким образом, учёт температурно-зависимой ионизации примесей критичен для прогнозирования электростатических процессов и рабочих характеристик гетероструктур при различных режимах эксплуатации.

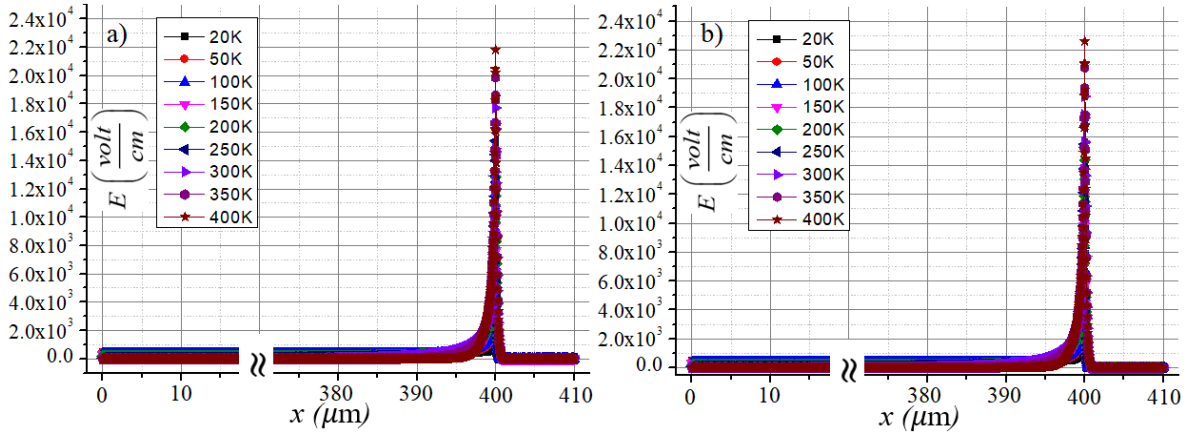


Рис. 9. Распределение электрического поля в гетеропереходе: (а) с учётом неполной ионизации примесей; (б) без учёта неполной ионизации.

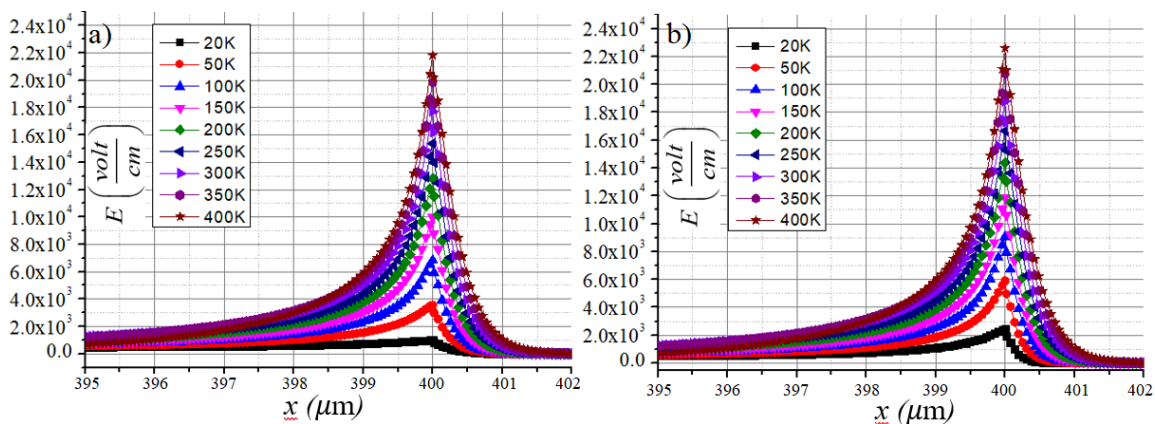


Рис. 10. Распределение электрического поля в гетеропереходе: (а) с учётом неполной ионизации примесей; (б) без учёта неполной ионизации.

Анализ ширины обеднённого слоя и ёмкости p-Si/n-CdS (Рис. 11а–11.б) исследовано влияние концентрации легирования p-Si ($N_A = 10^{15}–10^{18} \text{ м}^{-3}$) и температуры (100–400 К) на ширину обеднённого слоя $W(T, N_A)$ и ёмкость $C(T, N_A)$ гетероперехода p-Si/n-CdS.

Ширина обеднённого слоя W : $N_A \approx 10^{15} \text{ м}^{-3} \rightarrow W \approx 2,5–3,0 \text{ мкм}$ (слабое поле, низкая плотность носителей), $N_A = 10^{16}–10^{17} \text{ м}^{-3} \rightarrow W \approx 0,5–1,0 \text{ мкм}$ (усиление поля за счёт роста объёмной плотности заряда), $N_A \approx 10^{18} \text{ м}^{-3} \rightarrow W \approx 0,05–0,1 \text{ мкм}$ (очень интенсивное локальное поле), Температурное влияние: снижение W на 5–10 % при $T = 100 \rightarrow 400 \text{ К}$, сильнее при низком легировании. Физический механизм: рост $n_i(T)$ и снижение встроенного потенциала $V_{bi}(T) \rightarrow$ уменьшение $W(T)$. Ёмкость C : Низкое легирование ($N_A \approx 10^{15} \text{ м}^{-3}$) $\rightarrow C =$

0,5→0,57 pF (+14 %). Среднее легирование ($N_A = 10^{16} - 10^{17} \text{ м}^{-3}$) → $C = 5 \rightarrow 22 \text{ pF}$ (+10–14 %), высокое легирование ($N_A \approx 10^{18} \text{ м}^{-3}$) → $C = 50 \rightarrow 57 \text{ pF}$ (+14 %).

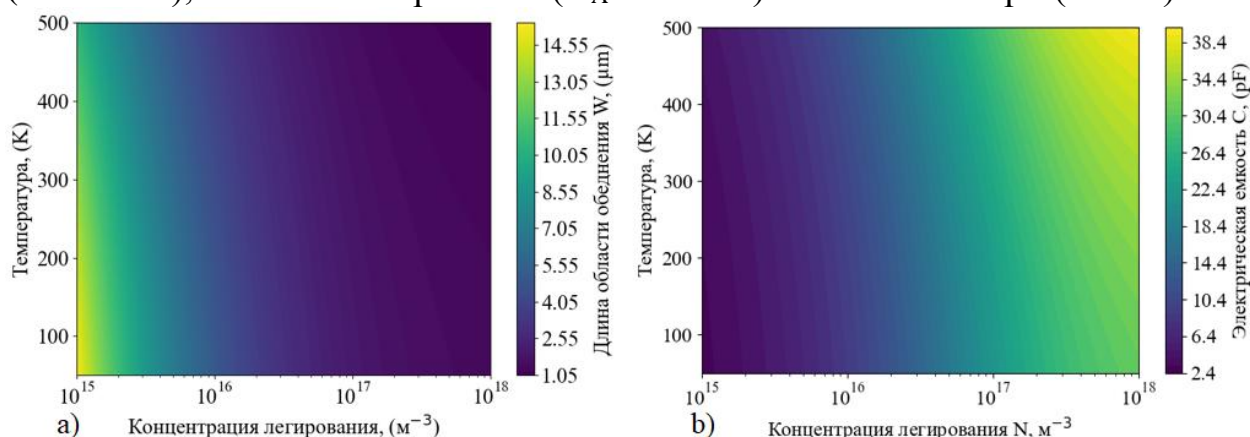


Рис. 11. а) Температурная и концентрационная зависимость ширины обеднённого слоя W , б) Температурная и концентрационная зависимость емкости гетероструктуры C .

Температурная чувствительность обусловлена обратной зависимостью $C \propto 1/W$ и изменением $V_{bi}(T)$. Контроль N_A позволяет целенаправленно управлять W и C для оптимизации: фотодиодов и сенсоров (широкий $W \rightarrow$ высокий сбор носителей); солнечных элементов (баланс W и поля \rightarrow повышение КПД); быстродействующих и СВЧ-диодов (тонкий $W \rightarrow$ низкая ёмкость, высокая скорость); устройств с высокой температурной стабильностью (изменение $C \leq 15\%$). Установлено: увеличение N_A с 10^{15} до 10^{18} м^{-3} уменьшает W более чем в 30 раз и увеличивает C более чем на два порядка, формируя надёжную основу для проектирования высокоэффективных гетероструктур p-Si/n-CdS.

На Рис. 12 показаны зависимости W и C гетероперехода p-Si/n-CdS от

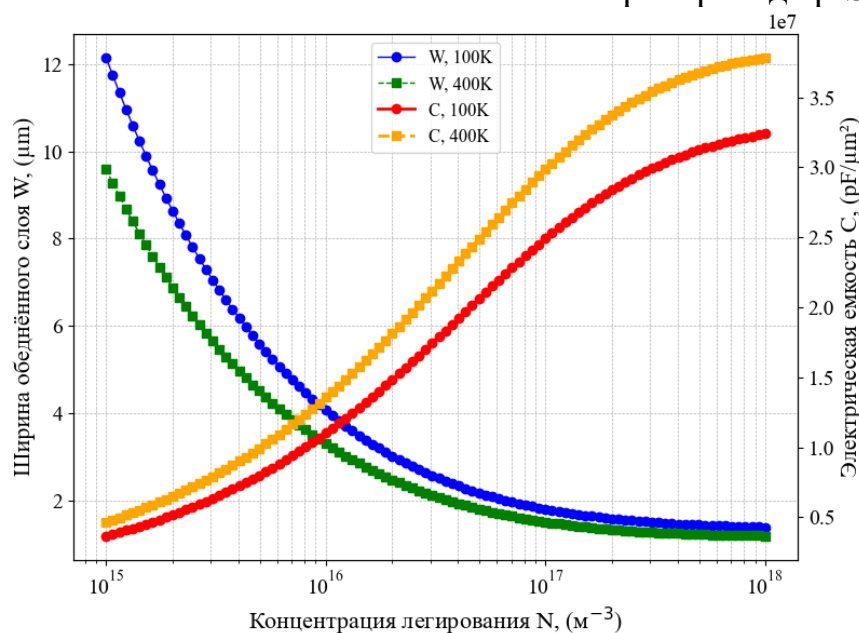


Рис. 12. Зависимость ширины обеднённого слоя W и ёмкости C p-Si/n-CdS от концентрации легирования и температуры

температурное влияние максимальное. При высоком легировании ($N_A \sim 10^{17}$ – 10^{18} м^{-3}) разница снижается до 0,05–0,08 $\mu\text{м}$, поскольку легированные носители преобладают над термически генерированными, и влияние температуры на встроенное напряжение $V_{bi}(T)$ и W ослабевает. Ёмкость C обратно пропорциональна W ($C \sim \epsilon/W$). При росте N_A W уменьшается, поэтому C увеличивается. Разница $C_{400\text{К}} - C_{100\text{К}}$ растёт с увеличением легирования и достигает 1,5–2 $\text{pF}/\mu\text{м}^2$ при $N_A \sim 10^{18} \text{ м}^{-3}$.

При малой ширине W даже небольшое уменьшение W при повышении температуры приводит к значительному росту C . Таким образом, при низком легировании температурное влияние сильнее на W , а при высоком — на C . Управление W и C позволяет целенаправленно оптимизировать гетероструктуры для фотодиодов, солнечных элементов, высокочастотных и сенсорных устройств. Температурный рост $n_i(T)$ и снижение $V_{bi}(T)$ вызывают сокращение W на 5–10 % и увеличение C на 10–15 %, что критично для эффективного, быстродействующего и температурно стабильного функционирования приборов. Эти результаты формируют фундаментальную основу для проектирования высокоэффективных гетероструктур p-Si/n-CdS в современных оптоэлектронных и микроэлектронных технологиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе выполнено комплексное исследование электронных процессов и механизмов токопереноса в инжекционных фотодиодах на основе гетероструктур p-Si/n-CdS . В результате получены следующие основные выводы:

разработана технология формирования тонких плёнок CdS толщиной 5–200 нм на кремниевых подложках методом осаждения порошков CdS в квазизамкнутой вакуумной системе при давлении (10^{-2} – 10^{-3}) Торр, что обеспечивает высокую однородность слоёв, стабильность электрофизических параметров гетероструктур p-Si/n-CdS и пригодность для экспериментальных исследований влияния толщины и структуры слоя;

создана и экспериментально откалибрована физическая модель структуры p-Si/n-CdS в программном комплексе TCAD Sentaurus, обеспечивающая высокую точность описания ширины запрещённой зоны ($R^2 = 0,9793$) и вольт-амперных характеристик ($R^2 = 0,9815$), что подтверждает достоверность предложенного подхода для численного моделирования электрофизических процессов;

исследовано, что тонкая пленка CdS толщиной 400 нм формируется с кристаллитами размером ~ 24 нм и зёрнами 50–150 нм, конгломератами 5–8 мкм и стехиометрическим соотношением $\text{Cd:S} \approx 51:49$, что обеспечивает ширину запрещённой зоны $E_g \approx 2,33$ эВ и коэффициент поглощения $\alpha \approx 5 \times 10^4$ – $2 \times 10^5 \text{ см}^{-1}$, устанавливая количественную зависимость морфологии и кристаллитной структуры от линейных оптических свойств;

ОА Z-scan измерения при $\lambda = 1030$ нм и 515 нм показали, что насыщаемое поглощение доминирует при $I < 2 \times 10^{11} \text{ Вт/см}^2$, двухфотонное поглощение

проявляется при $I > 3-5 \times 10^{11}$ Вт/см² с коэффициентом $\beta_{2PA} \approx 4.7-8 \times 10^{-8}$ см·Вт⁻¹ и насыщенной интенсивностью $I_{sat} \approx 1.3-1.7 \times 10^{11-12}$ Вт/см², что впервые позволяет точно количественно описать конкуренцию SA, 2PA и возможного RSA в CdS пленках толщиной 400 нм для оптических ограничителей и mode-locking лазеров;

получены аналитические выражения для распределений электрического поля и электростатического потенциала в гетероструктуре p-Si/n-CdS, которые корректно описывают поведение структуры в диапазоне температур 100–400 К, учитывают влияние неполной ионизации примесей и позволяют прогнозировать распределение заряда и локальные поля;

установлено, что при температуре 300 К чувствительность обратного тока к концентрации базы p-Si почти в 10 раз превышает чувствительность к концентрации слоя CdS, что определяет доминирующую роль параметров кремниевой базы как ключевой фактор формирования рабочих характеристик фотодиодов;

экспериментально и численно показано, что осаждённые плёнки n-Cd_mZn_{1-m}S обладают зернистой морфологией с шероховатостью ~179,5 нм (20×20 μм²); ширина запрещённой зоны регулируется от ~2,6 эВ до >3,8 эВ; эффект неполной ионизации расширяет область обеднения и снижает пиковое электрическое поле примерно в 3,5 раза.

обнаружено формирование отрицательно заряженных поверхностных состояний на границе n-CdS/p-Si при поверхностном потенциале $\psi_s = 0,04$ эВ, которые оказывают существенное влияние на инжекцию носителей, влияют на фоточувствительность структуры и критично для оптимизации электрических характеристик;

показано, что увеличение прямого смещения приводит к росту инжекции электронов из p-Si, увеличивается фототок и расширяется спектральная чувствительность фотодиодов в коротковолновую область спектра, что подчёркивает значимость контроля напряжения в работе фотоприёмников.

создан уникальный инжекционный фотоприёмник на основе слоистой композиции p-Si/n-CdS с развитой аккумуляцией носителей заряда, обеспечивающий рекордные значения интегральной фоточувствительности.

$S_{int} = 2,8 \cdot 10^4$ при освещении белым светом с $E = 0,1$ lux и спектральной фоточувствительности $S_\lambda \approx 2,3 \cdot 10^4$ А/Вт при $\lambda = 0,625$ μм и $P = 10$ μВт/см², демонстрируя внутреннее усиление фототока за счёт аккумуляции дырок у межфазного слоя и n-CdS;

определены оптимальные технологические режимы формирования сильно легированного слоя n-CdS и омических контактов: вакуумное напыление индия на подложки, нагретые до 300 К, с последующей термообработкой при 473 К в течение 30 секунд обеспечивает стабильные и воспроизводимые параметры инжекционных фотодиодов и пригодно для серийного изготовления экспериментальных образцов.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSC.03/06.11.2025.K/FM.10.09 ON AWARD
OF SCIENTIFIC DEGREES AT THE INSTITUTE OF FUNDAMENTAL
AND APPLIED RESEARCH NRU "TIAME"**

INSTITUTE OF FUNDAMENTAL AND APPLIED RESEARCH

SAPAEV IBROKHIM BAYRAMDURDIYEVICH

**COMPREHENSIVE PHYSICO-CHEMICAL ANALYSIS OF THE
TEMPERATURE-DEPENDENT PROPERTIES OF THE pSi/n-CdS
GETEROJUNCTION**

02.00.04– Physical Chemistry

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

Tashkent – 2026

The dissertation on the topic “Doctor of Science in Physics and Mathematics (DSc)” has been registered with the Higher Attestation Commission under the Ministry of Higher Education, Science, and Innovations under the number B2026.1.DSc/FM 315.

The dissertation was carried out at the Fundamental and Applied Research Institute under the National Research University “TIAME.”

The dissertation abstract is published in three languages (Uzbek, Russian, English) on the Scientific Council website (www.ifar.uz) and on the “Ziyonet” educational-information portal (www.ziyonet.uz).

Scientific supervisors: **Razzokov Jamoliddin Inotullayevich**
Doctor of chemical sciences

Official opponents: **Ulugbek Alisherovich Shaislamov**
Doctor of physical and mathematical sciences

Bahrom Toshmirza oqli Abdulazizov
Doctor of physical and mathematical sciences

Izzatillo Nuritdinov
Doctor of physical and mathematical sciences

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

The defense of the dissertation will be held on «__» _____ 2026 at _____ in the meeting of the Scientific Council DSc.03/06.11.2025.K/FM.10.09 of the Fundamental and Applied Research Institute under the National Research University “TIAME”. **Address:** 100000, Tashkent, Mirzo Ulugbek district, 39 Qori Niyoziy Street. Tel.: (+99871) 237-09-61; Fax: (+99871) 237-09-62; e-mail: info@ifar.uz

The dissertation is available for consultation at the Information and Resource Center of the Fundamental and Applied Research Institute (registered under No. _____).

The dissertation abstract was distributed on “___” _____ 2026

(Registry record No. ___ dated “___” _____ 2026).

O.N. Ruzimurodov
Deputy Chairman of the Scientific
Council for Awarding Academic
Degrees, Doctor of Chemical Sciences,
Professor

E.Kh. Karimbaev
Scientific Secretary of the Scientific
Council for Awarding Academic
Degrees, Doctor of Physical and
Mathematical Sciences, Senior
Researcher

U.B.Khalilov
Deputy Chairman of the Scientific
Seminar under the Scientific Council for
Awarding Academic Degrees, Doctor of
Physical and Mathematical Sciences,
Senior Researcher

INTRODUCTION(Doctoral Dissertation Abstract)

Relevance and Appropriateness of the Dissertation Topic: In the modern world, significant attention is focused on the development of new types of optoelectronic devices and the improvement of injection photodiodes (IPDs), which are currently considered key components of optical communication systems, sensing technologies, medical diagnostics, and solar energy applications. According to analytical reviews by international research centers, the global photodiode market exceeded USD 8.7 billion in 2024 and is projected to grow to over USD 14 billion by 2026, with an average annual growth rate of approximately 8.5%, demonstrating the increasing technological and economic importance of these devices. Given the growing requirements for speed, photosensitivity, and thermal stability of photodetectors, the creation of new high-performance IPDs operating over a broad spectral range (0.4–1.1 μm) and temperature range (–60 to +150 $^{\circ}\text{C}$) remains a critical scientific and technical challenge.

Recent studies have emphasized the influence of the base region parameters of IPDs on their electrical and photoelectric characteristics. Experimental results show that varying the base width within 0.2–5 μm and the dopant concentration from 10^{15} to 10^{18} cm^{-3} can increase the photosensitivity by 30–60% and reduce dark current by 3–5 times. However, current fabrication processes do not provide sufficient control over these parameters, limiting the quantum efficiency of photodiodes under real operating conditions to 70–75%, while theoretical values can exceed 90%. Therefore, in-depth study of physical processes in IPDs, optimization of base region parameters, development of improved fabrication techniques, and comprehensive analysis of spectral characteristics of CdS/Si heterostructure-based photodiodes remain of high scientific and practical significance.

In Uzbekistan, significant achievements have been made in fundamental and applied research on semiconductor devices, including high-efficiency photo- and light-emitting diodes. Optimization of heterostructure photodiodes has improved their efficiency in the 0.4–1.1 μm range, while radiation and ultrasonic treatments reduced leakage currents by 3–5 times and increased photosensitivity by 30–60%. According to the Strategy of Actions for the further development of Uzbekistan, special attention is given to the implementation of scientific achievements and innovations in practical applications, making the study of electronic processes in semiconductor heterostructures particularly relevant.

Compliance with Priority Areas for the Development of Science and Technology in the Republic of Uzbekistan: The dissertation aligns with the priority areas of scientific and technological development in Uzbekistan, as specified in III: “Energy, energy saving, transport, machinery and instrument engineering, as well as the development of modern electronics, microelectronics, photonics, and electronic instrumentation.”

Degree of Problem Study: International research over the last decades has focused on improving the efficiency of photovoltaic devices and photodetectors through nanostructured CdS/Si systems. Nanostructures, including nanowires (NWs) and nanorods (NRs), increase light absorption and charge carrier generation

by reducing light reflection by 20–40% compared to planar layers. Numerical modeling of CdS/p-Si/p⁺-Si and ZnO/CdS/p-Si/p⁺-Si heterostructures showed that optimal thickness and composition of CdS and ZnO layers increase conversion efficiency. Experimental studies of dopant-free p-Si/CdS/ITO solar cells demonstrated efficiency improvements with proper thermal annealing and deposition techniques, confirming the critical importance of layer morphology and processing on device performance. Despite extensive studies, injection photodiodes based on CdS/Si remain insufficiently explored, particularly regarding thin-film CdS deposition technologies, crystallographic orientation, and interface quality control, which are essential for internal gain and spectral control.

Relation to Scientific Plans of the Research Institution: The dissertation research was carried out in accordance with the scientific research plans of the “Resource-Saving Technologies” and “Fundamental Physics and Physical Chemistry” laboratories of the Institute of Fundamental and Applied Research under the Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers National Research University.

Research Objective: The main objective of the dissertation is the systematic and comprehensive study of electronic processes and physicochemical properties in injection photodetectors based on p-Si/n-CdS heterostructures, including the effects of geometric parameters, the thickness and concentration of the CdS thin layer, various temperature regimes, and ultrasonic treatment on current transport mechanisms.

Research Object: The research objects are p-Si/n-CdS heterostructures used in injection photodiodes and their electrophysical characteristics, including charge transport, contact processes, and the influence of temperature and ultrasonic exposure.

Research Subject: The subject of the study includes the mechanisms of current transport in p-Si/n-CdS heterostructures and the influence of external factors (temperature, ultrasound, structural geometry) on their photoelectric characteristics and spectral sensitivity, including injection recombination processes and contact resistance formation.

Research Methods: Methods include theoretical modeling and experimental approaches: Analytical and numerical modeling, including TCAD Sentaurus simulations of p-Si/n-CdS structures; Electrical measurements (I-V and C-V characteristics) under dark and illuminated conditions; Morphological analysis using SEM and XRD; Optical measurements including Z-scan for nonlinear absorption properties.

Scientific Novelty Key scientific contributions include:

development of CdS thin-film deposition technology (5–200 nm) on Si substrates, ensuring high uniformity and stable electrophysical properties;

creation of a calibrated physical model of p-Si/n-CdS in TCAD Sentaurus with high accuracy ($R^2 = 0.9793$ – 0.9815);

characterization of CdS thin films (400 nm) with controlled crystallite size, morphology, bandgap (≈ 2.33 eV), and absorption coefficient;

quantitative analysis of nonlinear optical properties (SA, 2PA, RSA) for optical limiters and mode-locked lasers;

analytical expressions for electric field and potential distributions, accounting for incomplete dopant ionization;

demonstration of dominant role of p-Si base parameters in determining photodiode characteristics;

optimization of n-Cd_mZn_{1-m}S films and Ohmic contacts for high-performance IPDs;

creation of an injection photodetector with record integral photosensitivity and spectral response stability ($S_{\text{int}} = 2.8 \times 10^4$ under 0.1 lux, $S_{\lambda} \approx 2.3 \times 10^4$ A/W at $\lambda = 0.625 \mu\text{m}$, $P = 10 \mu\text{W}/\text{cm}^2$).

Implementation of Research Results: Based on a comprehensive physicochemical analysis of the temperature-dependent properties of p-Si/n-CdS heterostructures, physical models of their electrophysical characteristics were developed, taking into account the doping level and temperature effects using the Synopsys Sentaurus TCAD software suite. On this basis, software tools were created for high-precision measurement of I–V characteristics of p-Si/n-CdS heterostructures (Certificate No. DGU 55079, 04.10.2025) and for high-precision measurement of C–V characteristics over a wide temperature range (Certificate No. DGU 55080, 04.10.2025);

the scientific results obtained were implemented in teaching the courses “Semiconductor Physics” and “Modeling of Semiconductor Devices” within the Bachelor’s program 60720600 — “Materials Science and New Materials Technology (Semiconductors and Laser Technology)” at the National Research University of the Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers (17.03.2026, implementation report). As a result, students’ practical skills in modeling semiconductor devices increased by 20 %, and computational accuracy improved threefold;

the effect of ultrasonic treatment on the electrical and photoelectric properties of p-Si/n-CdS injection photodiodes was studied. The study showed that ultrasonic treatment reduces the density of surface states in the heterostructures and anneals defects, thereby increasing the spectral ($S_{\lambda} = 2.3 \cdot 10^4$ A/W) and integrated ($S_{\text{int}} = 2.8 \cdot 10^4$ A/lm) sensitivity of the photodiodes. This approach has also been applied by foreign researchers (Advances in Materials Science and Engineering, 2021, Article 8836368; IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 614, 012027; Superlattices and Microstructures, 117, 173–188; Journal of Semiconductors, 37(12), 122002; Journal of Applied Physics, 123(16), 161573);

the method of growing thin-film heterostructures on Si substrates under vacuum (10^{-3} Pa) by thermal evaporation has also been used by foreign researchers (Journal of Alloys and Compounds, 1040, 183530; East European Journal of Physics, (3), 325–335; Chalcogenide Letters, 22(8), 753–764);

ultrasonic treatment reduces the surface state density of p-Si/n-CdS heterostructures, increasing the spectral and integrated sensitivity of the photodiodes. Moreover, the compensation of drift and diffusion currents introduces

new physical effects into the photosensitivity and reverse current–voltage characteristics, which is also supported by foreign studies (East European Journal of Physics, (3), 325–335; Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics, 9(6), 799–800; Chalcogenide Letters, 22(8), 753–764; Ceramics International, 42(6), 6601–6609; Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 18(7), 494–500).

Approbation of Research Results: The main results were presented and discussed at 4 international and 5 national scientific-practical conferences.

Publication of Research Results: A total of 32 scientific works were published on the dissertation topic: 20 articles in journals recommended by the Higher Attestation Commission of Uzbekistan (16 in international journals indexed by Scopus, 4 in national journals); 2 software certificate from the Intellectual Property Agency for programs designed for computer use.

Volume and Structure of the Dissertation:

The dissertation includes an introduction, five chapters, a conclusion, a list of references, and appendices. The total volume of the dissertation is 200 pages.

E'LON QILINGAN ISHLAR RO'YXATI
SPISOK OPUBLIKOVANNYKH RABOT
LIST OF PUBLISHED WORKS

I-bo'lim (Част I; Part I)

1.Sapayev I.B., Abdullayev J.Sh., Abdullayev J.Sh., Razzokov J.I., Jurayev D.A. Composition-Driven Band Engineering and Temperature Effects in pSi/nCd_mZn_{1-m}S Geterojunctions. J. Electron. Mater. (2026). 55(10), 11607–11617. (Scopus: Q2)

2.Sapayev I.B., Abdullayev J.Sh., Abdullayev J.Sh., Razzokov J.I., Jurayev D.A. Fabrication and Properties of nSi–pCdTe Geterojunctions. Inorganic Materials (2020). 56(1), 7–9. (Springer, IF: 0.77)

3.Sapayev I.B., B. Sapayev, Sh. Mirsagatov, M.B. Sapayev, Modeling of optoelectronic properties in pSi/n-Cd_mZn_{1-m}S geterojunctions: Effects of composition and temperature. Journal of Electronic Materials (2025). 54(10), 11607–11617. (Scopus: Q2)

4.Sapayev I.B., Исследование электрических и фотоэлектрических свойств In-Cd_{Sx}Te_{1-x}-Si-In структуры. Физическая инженерия поверхности (2013). 11(2), 223–227

5.Sapayev I.B. Giyasova F.A., Bakhronov K.N., Yuldoshev M.A., Ikramov R.G., Giyasov F.A., Bekchanova M.R., Qaxharov M.M., Abdullayev H.O. Study of the Influence of Temperature on the Transitions of the CdS/Si/CdTe Geterosystem. East European Journal of Physics (4), 461–468

6.Sapayev I.B., Электрофизические свойства инжекционного фотоприемника на основе сульфид кадмиевые p+CdS–nCdS–nSi структуры. Журн. Перспективы науки и Образования (Россия, Воронеж) (2013), №2, 125–134

7.Sapayev I.B. Влияние ультразвукового облучения на свойства инжекционного фотоприемника на основе pSi–nCdS–n+CdS структуры и на плотности поверхностных состояний pSi–nCdS–гетероперехода. Журнал ФИП (2014), №2, 197–201

8. Sapayev I.B., Sh.A. Mirsagatov., Электрофизические и фотоэлектрические свойства инжекционного фотодиода на основе pSi–nCdS–M(In) структуры и влияние на них ультразвукового облучения. JNO (2014), vol.9, 1–10. (IF: 0.69)

9.Sapayev I.B., Abdullayev J.Sh., Qalandarova D.A., Ibragimova M.Sh., Razzokov J.I. Experimental and Simulation-Based Investigation of p-Si/n-CdS Geterojunctions: From Cryogenic Freeze-Out to Room Temperature Operation. J. Electron. Mater. (2026), 55, 2229–2239

10.Sapayev I.B., Abdullayev J.Sh., Qalandarova D.A., Ibragimova M.Sh., Razzokov J.I. Bandgap-Engineered pSi/n-Cd_xSi_{1-x} Geterojunctions: Effect of Composition on Optoelectronic Behavior. East European Journal of Physics (2025), (4), 442–448

11. Sapayev I.B., Sh.A. Mirsagatov, B. Sapaev, R. Kabulov. Механизм усиления фототока в инжекционных фотодиодах на основе фоточувствительной поликристаллической пленки CdS. Журнал ФИП (2015), №2, 128–135

12. Sapayev I.B., Sh.A. Mirsagatov, J.T. Nazarov. Ультразвуковой отжиг поверхностных состояний в гетеропереходе инжекционного pSi–nCdS–n+CdS фотодиода. Неорганические Материалы (2015), №1, 1–4. (Springer, IF: 0.602)

13. Sapayev I.B., Sh.A. Mirsagatov. Механизм переноса тока в инжекционном фотоприемнике на основе M(In)-nCdS-pSi-M(In) структуры. ФТТ (2015), 57(4), 646–660. (Springer, IF: 0.72)

14. Sapayev I.B., B. Sapaev, D.B. Babajanov. Current-voltage characteristic of the injection photodetector based on M(In)-nCdS-pSi-M(In) structure пленок CdTe и Si. Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics (2019), 22(2), 188–192

15. R.A. Ganeev, Y.A. Buriyev, V.V. Kim, B.K. Eshchanov, B.R. Sobirov, M.K. Kodirov, I.B. Sapaev, S. Sadullaev. Nonlinear optical absorption in CdS thin films at 1030 nm and 515 nm. Opt Quant Electron (2026), 58, 71

16. Sapayev I.B., Sh.A. Mirsagatov, B. Sapayev. Получение и исследование n/CdS–p/CdTe–n/Si структуры. Гелиотехника (2011), №4, 74–78

17. Sapayev I.B., Sh.A. Mirsagatov, B. Sapayev. Особенности электрических и фотоэлектрических свойств. ДАН РУз (2013), №2, 27–29

18. Sapayev I.B. Технология получения инжекционного фотодиода на основе n+CdS–nCdS–nSi и n+CdS–nCdS–pSi структуры. ДАН (2016), №3, 28–30

19. Sapayev I.B. Фотовольтаический при квадратичным профиле ширине запрещенной зоны. ДАН (2016), №3, 31–34

20. Sapayev I.B., B. Sapayev, N.O. Sapayeva, M.P. Serimbetva. О Возможности создания полупроводниковых датчиков влажности на основе твердых растворов кремний-германий. ДАН (2016), №6, 14–16

21. Sapayev I.B., B. Sapayev, O.A. Kilichov, A. Kutlimratov, Sh.A. Mirsagatov.

Исследование технологии выращивания и фотоэлектрических свойств пленок CdTe и Si. Проблемы энерго- и ресурсосбережения (Ташкент, 2011), 155–159

(2-часть)

22. Sapayev I.B., B. Sapayev, J. Sh. Abdullayev, M. Sh. Ibragimova, N. Esanmurodova. pSi/n-CdS asosidagi getero‘tishli strukturalarning C–V xarakteristikasini keng temperaturalar diapazonida yuqori aniqlikda o‘lchash uchun dasturiy ta’minot. Tashkent № DGU 55080, 04.10.2025 y.

23. Sapayev I.B., B. Sapayev, J. Sh. Abdullayev, M. Sh. Ibragimova, N. Esanmurodova. pSi/n-CdS asosidagi getero‘tishli strukturalarning I–V xarakteristikasini yuqori aniqlikda o‘lchash uchun dasturiy ta’minot. Tashkent № DGU 55079, 04.10.2025 y.

24.Sarayev I.B., V. Sarayev, M. Nurmatova. Выращивание и исследование слоев CdS на кремниевых подложках. Фергана, 2010, 28-29 май, стр. 279-281

25.Sarayev I.B., V. Sarayev, Sh.A. Mirsagatov. Фотоприемники с управляемым спектром fotocувствительности на основе кремния. Фотоэлектрические и теплофизические основы преобразования солнечной энергии. Фергана, 2011, стр. 144

26.Sarayev I.B., V. Sarayev, Sh.A. Mirsagatov. Технологические условия выращивания слоев сульфида цинка на кремниевых подложках. Тезисы докладов 3-й международной научной конференции, посвященной 70-летию академика НАН КР Аманбека Жайнаковича Жайнокова, Бишкек, 2011, 19-25 август, стр. 37

27.Sarayev I.B., V. Sarayev, Sh.A. Mirsagatov. Усиление фототока n/Si-p/CdS-структуры при малом уровне освещенности. Международная конференция “Актуальные проблемы физической электроники”, Ташкент, 2012, 28 ноябрь, стр. 158

28.Sarayev I.B., V. Sarayev, Sh.A. Mirsagatov. Рост и исследование CdS слоев на кремниевых подложках. Материалы 51-й Международной научной студенческой конференции, Новосибирск, 2013, 12-18 апрель, стр. 67

29.Sarayev I.B., V. Sarayev, Sh.A. Mirsagatov. Влияние ультразвукового воздействия на электрофизические характеристики pSi-nCdS-n+CdS структуры. Труды международной конференции, посвященной 70-летию Физико-Технического Института НПО “Физика-Солнце”, 2013, 14-15 ноябрь, стр. 238-239

30.Sarayev I.B., Sh.A. Mirsagatov. Электронные процессы в инжекционных фотоприемниках на основе pSi-nCdS-M(In) структуры. Сборник трудов III международной научной конференции “Современные проблемы физики конденсированного состояния, нанотехнологий и наноматериалов”, Алмата, 2014, 15-16 май, стр. 59-60

31.Sarayev I.B., V. Sarayev, M.B. Saraeva, K.A. Qoraboev. Технология получения гетероструктур между кремнием и теллуридом кадмием. Седьмая Международная конференция по Физической Электронике IPES-7, 18-19 мая, 2018, Ташкент, Узбекистан, стр. 91

32.Sarayev I.B., V. Sarayev. Температурная зависимость инжекционных фотоприемников на основе pSi-nCdS-n+CdS структуры. Материалы IV международной конференции по оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро- и наноструктурах, 25-26 мая, 2018, Фергана, Узбекистан, стр. 286-287.

Avtoreferat “Fan va innovatsiyalar” xalqaro ilmiy jurnali (International scientific journal “Science and Innovation”) tahririyatida tahrirdan o‘tkazilib, o‘zbek, va rus tillaridagi matnlari o‘zaro muvofiqlashtirildi (31.03.2026 yil).



Bosishga ruxsat etildi: 02.04.2026-yil.
Bichimi 60x84^{1/16}, “Times New Roman”
garniturada raqamli bosma usulida bosildi.
Shartli bosma tabog‘i 3.5. Adadi: 100. Buyurtma: № 33.
Tel (99) 817 44 54.
Guvohnoma reyestr № 219951
“PUBLISHING HIGH FUTURE” OK nashriyotida bosildi.
Toshkent sh., Uchtepa tumani, Ali qushchi ko‘chasi, 2A-uy.