

**NAMANGAN MUHANDISLIK-TEXNOLOGIYA INSTITUTI
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

FARG‘ONA DAVLAT UNIVERSITETI

ERGASHEV RAVSHANBEK NAZIROVICH

**CHUQUR ARALASHMA SATHLI pCdTe-nCdS VA pCdTe-nCdSe
GETEROTIZIMLI QUYOSH ELEMENTLARINING OPTIK,
ELEKTROFIZIK VA FOTOELEKTRIK XUSUSIYATLARINI TADQIQ
QILISH**

01.04.10–Yarim o‘tkazgichlar fizikasi

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

Namangan-2025

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

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

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

Ergashev Ravshanbek Nazirovich

Chuqur aralashma sathli pCdTe-nCdS va pCdTe-nCdSe geterotizimli
quyosh elementlarining optik, elektrofizik va fotoelektrik xususiyatlarini
tadqiq qilish 3

Эргашев Равшанбек Назирович

Исследование оптических, электрофизических и фотоэлектрических
свойств солнечных элементов на основе гетероструктуры p-CdTe-
nCdS и pCdTe-nCdSe с глубокими примесными уровнями..... 27

Ergashev Ravshanbek Nazirovich

Study of the optical, electrophysical and photoelectric properties of solar
cells based on pCdTe-nCdS and pCdTe-nCdSe heterostructures with deep
impurity levels..... 53

E'lon qilingan ishlar ro'yxati

Список опубликованных работ
List of published works..... 57

**NAMANGAN MUHANDISLIK-TEXNOLOGIYA INSTITUTI
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

FARG‘ONA DAVLAT UNIVERSITETI

ERGASHEV RAVSHANBEK NAZIROVICH

**CHUQUR ARALASHMA SATHLI pCdTe-nCdS VA pCdTe-nCdSe
GETEROTIZIMLI QUYOSH ELEMENTLARINING OPTIK,
ELEKTROFIZIK VA FOTOELEKTRIK XUSUSIYATLARINI TADQIQ
QILISH**

01.04.10–Yarim o‘tkazgichlar fizikasi

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

Namangan-2025

Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalari vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2023.1.PhD/T3487 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya Farg'ona davlat universitetida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) ilmiy kengash veb-sahifasiga (www.nammti.uz) va Ziyonet Axborot-ta'lim portalida (www.ziyonet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar:

Otajonov Salim Madrahimovich
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Rasmiy oponentlar:

Ikramov Rustam G'ulomjonovich
fizika-matematika fanlari doktori, professor,

Karimov Ibroximjon Nabievich
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Yetakchi tashkilot:

Qoraqalpoq davlat universiteti

Dissertatsiya himoyasi Namangan muhandislik-texnologiya instituti huzuridagi ilmiy darajalar beruvchi PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 raqamli ilmiy kengashning 2025 yil "03" may soat 10⁰⁰ da majlisida bo'lib o'tadi. (Manzil: 160115, Namangan shahri, Kosonsoy ko'chasi, 7-uy. Tel./faks: (99869) 225-10-07; (99869) 225-76-75, e-mail: niei_info@edu.uz, Namangan muhandislik-texnologiya instituti 3-bino, 2-qavat, ilmiy kengash xonasi).

Dissertatsiya bilan Namangan muhandislik-texnologiya institutiining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin. (378 raqam bilan ro'yxatga olingan.) Manzil: 160115, Namangan shahri, Kosonsoy ko'chasi, 7-uy. Tel: (99869) 225-10-07.

Dissertatsiya avtoreferati 2025 yil " 18 " 04 da tarqatildi.
(2025 yil " 18 " 04 da № 23 raqamli reestr bayonnomasi.)



U.I. Erkaboyev
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash
raisi, f.-m.f.d., professor

A.A. Abdugarimov
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash
ilmiy kotibi, PhD, dotsent

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

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Butun dunyoda qayta tiklanadigan energiya manbalariga qiziqishni jadal rivojlantirishning global amaliyoti tabiatda keng tarqalgan va yuqori samaradorlikka ega bo'lgan arzon yarimo'tkazgich materiallarga ehtiyoj ortib bormoqda. Shu sababli, zamonaviy yarimo'tkazgichli materialshunoslikda A^2B^6 birikmalari asosida arzon va samarali quyosh batareyalarini ishlab chiqarish uchun mos keladigan noyob xususiyatlarga ega yangi yarim o'tkazgich birikmalarini yaratish bo'yicha tadqiqotlarga katta e'tibor berib kelinmoqda. Shu nuqtai nazardan, tadqiqotning ushbu yo'nalishidagi istiqbolli birikmalar CdTe, CdS, CdSe kombinatsiyasiga asoslangan yupqa qatlamlar asosida fotoo'zgartirgichlarni yaratishga alohida e'tibor qaratilgan.

Jahonda, muqobil energiya manbalari va mikroelektronika sohasida yarimo'tkazgichli materiallardan foydalanish va ularning samaradorligini oshirish, hususan chuqur aralashma sathli pCdTe-nCdS va nCdTe-pCdSe asosidagi geterostrukturani olishning optimal texnologiyasini topish, kumush va mis bilan legirlangan pCdTe-nCdS va nCdTe-pCdSe geterostrukturali quyosh elementlarining elektrofizik xususiyatlarini tadqiq qilish bo'yicha ilmiy ishlar ustuvor hisoblanmoqda. Shu bilan birga, pCdTe-nCdS va nCdTe-pCdSe geterostrukturali quyosh elementlarining optik va fotoelektrik xususiyatlarini Ag va Cu legirlash yo'li bilan o'rganish va ushbu elementlar asosida yangi turdagi optik datchiklar va fotoelektrik modullarni ishlab chiqish dolzarb vazifalardan hisoblanmoqda.

Respublikamizda, CdTe birikmali yarimo'tkazgich fotoelementlarni yaratish va ularning sifatini sezilarli yaxshilash, samaradorligini oshirish bo'yicha tadqiqotlar o'tkazish va ularni amalda qo'llash bo'yicha keng ko'lamli chora-tadbirlar amalga oshirilmoqda. 2022-2026 yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasida, jumladan «Iqtisodiyotni elektr energiyasi bilan uzluksiz ta'minlash hamda “Yashil iqtisodiyot” texnologiyalarini barcha sohalarga faol joriy etish, iqtisodiyotning energiya samaradorligini 20 foizga oshirish»¹ bo'yicha vazifalar belgilangan. Ushbu vazifalarni amalga oshirishda, xususan, kadmiy telluridda legirlangan aralashmalar bilan chuqur markazlarning hosil bo'lish xususiyatlarini o'rganish va ularning tok va signal quvvatini oshirish va quyosh energiyasini yig'ish samaradorligini oshirishda chuqur markazlarning shakllanishiga turli texnologik omillarning ta'sirini o'rganish muhim ahamiyatga ega. Ushbu sohada mikroelektronikani rivojlantirish uchun yangi turdagi yuqori sezgir, barqaror va issiqlikka chidamli yarim o'tkazgich materiallarni yaratish katta ilmiy ahamiyatga ega.

Mazkur dissertatsiya O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2020-yil 29-oktabrdagi “Ilm-fanni 2030-yilgacha rivojlantirish konsepsiyasini tasdiqlash to'g'risida”gi² PF-6097-son Farmoniga, O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2021-yil 2-martdagi “Elektrotexnika sanoatini yanada rivojlantirish va mahalliy

¹ O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022 yil 28 yanvardagi PF-60-son “2022-2026 yillarga mo'ljallangan Yngi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to'g'risida”gi Farmoni

² O'zbekiston Respublikasi Prezidentinin g 2020-yil 29-oktabrdagi “Ilm-fanni 2030-yilgacha rivojlantirish konsepsiyasini tasdiqlash to'g'risida”gi² PF-6097-son Farmoni

mahsulotlarning raqobatbardoshligini oshirishga doir qo‘shimcha chora-tadbirlar to‘g‘risida”gi PQ-№5011-son qaroriga va O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi “2022-2026-yillarda yangi O‘zbekistonni rivojlantirish strategiyasi to‘g‘risida”gi PF-60-son Farmoniga asoslanib, boshqa me‘yoriy hujjatlarda belgilangan vazifalarni ma’lum darajada bajarishga xizmat qiladi.

Tadqiqotning respublika fan va texnikani rivojlantirishning ustuvor yo‘nalishlariga mosligi. Ushbu tadqiqot ishi respublika fan va texnikasini rivojlantirishning ustuvor yo‘nalishlari bo‘yicha F2 “Fizika, astronomiya, energetika va mashinasozlik” va ATD-3 “Energiya, energiya resurslarini tejash, transport, mashinasozlik va asbobsozlik, zamonaviy elektronika”, mikroelektronika, fotonika va elektron asboblardir”.

Muammoning o‘rganilganlik darajasi. Chuqur aralashma sathli pCdTe-nCdS va pCdTe-nCdSe geterotizimli quyosh elementlarining optik, elektrofizik va fotoelektrik xususiyatlari bo‘yicha tadqiqot ishlari yetakchi mamlakatlarning ilmiy markazlari, institutlari va universitetlarida olib boriladi: A.F. Ioffe nomidagi Fizika va texnologiya instituti (Sankt-Peterburg, Rossiya); Fotonika va nanotexnologiyalar instituti, Kaunas politexnika instituti (Litva), Yarim o‘tkazgichlar fizikasi instituti (Kiyev, Ukraina), Elektronika va amaliy fizika instituti (Fizika instituti, Geythersburg (AQSh); FGUP “AES Istok” (O‘zbekiston), Mikrotuzilma instituti Fizika RAN (Rossiya), Kristal o‘shish mexanizmlarini o‘rganish markazi va boshqalar. Litva Fanlar akademiyasi akademigi Y.Y.Vaytkus boshchiligida fotoionizatsiya va issiqlik emissiyasi sharoitida ketma-ket ishlaydigan chuqur (chuqur va sirt) tuzoqlarning spektrlarini qayd etish orqali kadmiy tellurid (CdTe) geterostrukturalarining yupqa plyonkalarini kompleks fotoelektrik tavsiflash uchun kontaktsiz tayyorlash va o‘lchash usullarini birlashtirish jarayonlari o‘rganildi. Daniel Josell AQSh va boshqalar differensial shishasiz CdSe/CdTe geterostrukturalariga aniqlik kiritdilar. Kristal o‘shish mexanizmlarini o‘rganish markazi (Fransiya), Gruziya texnologiya instituti va Amerika fizika instituti (AQSh) strukturani takomillashtirish bo‘yicha doimiy izlanishlar olib bormoqda. A.Razzokiy va boshqalar (Iroq) CdCl₂ ning issiqlik bilan ishlov berishning termal bug‘lanish natijasida hosil bo‘lgan CdTe/CdS fotovoltaiik birlashmasining xususiyatlariga ta’sirini o‘rgandilar. Djilina universiteti (Slovakiya) olimlari termal bug‘lanish natijasida olingan polikristalli CdTe geterostrukturasi asosida quyosh batareyalarini yaratdilar. Abbas Shoh boshchiligidagi pokistonlik olimlar kadmiy tellurid asosidagi maydon polikristalli quyosh elementlarini va italiyalik olimlar Alessio Bosio, Alessandro Romeo, shuningdek, nemis fotoelektr texnigi Diter Bonn kadmiy tellurid asosidagi polikristalli tuzilmalarda fotovoltaiik effektlarni o‘rganishdi.

Akademik R.A. Mo‘minov rahbarligida fizika-texnik instituti laboratoriyasida ko‘p yillar davomida birinchi marta yarimo‘tkazgich birikmalarining turli komponentlari asosida fotodatchiklar va foto qabul qilgichlar yaratildi. Keyingi yillarda professor Sh.A. Mirsagatov va hozirda professor T.M. Razikov turli sohalarda, asosan, A²B⁶ birikmalari bo‘yicha keng ko‘lamli ilmiy ishlarni amalga oshirdi va ular asosidagi fotoelektrik qurilmalar hali ham doimiy izlanishlar ostida, keng ko‘lamli amaliy qiziqish uyg‘otmoqda. YDY (yarimo‘tkazgich-dielektrik-yarimo‘tkazgich) va

geterostrukturalarning elektrfizik va optik xususiyatlarini, shuningdek, yaxshilangan ekspluatatsion parametrlari bilan ularning chidamliligini, xizmat muddatini uzaytirishni ta'minlash usullarini o'rganish ilmiy va amaliy ahamiyatga ega. Kadmiy tellurid material yorug'likka sezgir fotodetektorlar va fotoqabulqilgich tuzilmalarini ishlab chiqarishda, shuningdek, geterostrukturali quyosh elementlarini yaratishda keng qo'llaniladi. Biroq uzoq texnologik jarayonlar tufayli va ularning barqaror elektrfizik parametrlarini aniqlashda muammolar mavjudligi tufayli kadmiy telluridning polikristalli yupqa qatlamlariga asoslangan geterostrukturaga ega bo'lgan fotosezgir tuzilmalarni, chuqur aralashmala sathi ishtirokida quyosh batareyalarini ishlab chiqarish imkoniyatlari to'liq o'rganilmagan. Yuqoridagilardan kelib chiqib, dissertatsiy mavzusini dolzarb ekanligini ko'rish mumkin.

Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan oliy ta'lim yoki ilmiy-tadqiqot muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog'liqligi. Dissertatsiya tadqiqoti Farg'ona davlat universiteti va Janubiy Federal universiteti, Rostov-Don, Rossiya ilmiy tadqiqot loyihalari doirasida amalga oshirilgan.

Tadqiqotning maqsadi pCdTe-nCdS va nCdTe-pCdSe geterostrukturalari asosidagi quyosh batareyalarini yaratishda elektrfizik, optik va fotoelektrik xususiyatlarini o'rganib, ularning tok va signal quvvatini oshirishdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

chuqur aralashma sathli pCdTe-nCdS va nCdTe-pCdSe asosidagi geterostrukturani olishning optimal texnologiyasini topish;

kumush va mis bilan legirlangan pCdTe-nCdS va nCdTe-pCdSe geterostrukturali quyosh elementlarining elektrfizik xususiyatlarini tadqiq qilish;

pCdTe-nCdS va nCdTe-pCdSe geterostrukturali quyosh elementlarining optik va fotoelektrik xususiyatlarini Ag va Cu legirantlari bilan o'rganish;

kadmiy telluridda legirlangan aralashmalar bilan chuqur markazlarning hosil bo'lish xususiyatlarini o'rganish va ularning tok va signal quvvatini oshirish;

quyosh energiyasini yig'ish samaradorligini oshirishda chuqur markazlarning shakllanishiga turli texnologik omillarning ta'sirini o'rganish;

arduino platformasi yordamida havo ifloslanishini avtomatik aniqlash uchun pCdTe-nCdS va nCdTe-pCdSe geterostrukturasi asosida optik datchiklar va fotoelektrik modulni ishlab chiqish.

Tadqiqotning ob'ekti sifatida CdTe, CdS, CdSe maxsus sof yarimo'tkazgich materiallari, shuningdek, birinchi guruh elementlari - kumush va mis olingan.

Tadqiqot predmeti CdTe, CdS, CdSe birikmalaridan birinchi guruh Ag va Cu elementlarning aralashmalari bilan geterostrukturani yaratish jarayonlari.

Tadqiqot usullari. Qo'yilgan vazifalarni hal qilish uchun VUP-4 vakuum qurilmasi, doimiy fotoo'tkazuvchanlik usullari, Lukovski usullari va rentgen nurlari difraksion tahlillari qo'llanildi.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

ilk bor, chuqur aralashma sathga ega pCdTe-nCdS va pCdTe-nCdSe asosidagi geterostrukturali quyosh elementlarini o'stirish yuqori temperaturali vakuumda bug'latish yo'li bilan optimal texnologiyasi topilgan;

pCdTe-nCdS strukturasi uchun foton energiyasining keskin o'sa boshlaganligi aniqlangan va $h\nu \leq 2,3 \text{ eV}$ sohasida foton energiyasining keskin o'sa boshlaganligi aniqlangan va pCdTe-nCdSe strukturasi uchun foton energiyasining fotosezgirlik qiymati $\sim 100 \text{ mK}/\text{mWt}$ darajada ekanligi ko'rsatilgan.

harorat oshishi bilan geterostrukturaning maksimal fotosezgirlik kadmiy telluridning ta'qiqlangan zona kengligi o'zgarishiga bog'liq holda yorug'likning uzun to'liqlar sohasiga siljiganligi aniqlangan.

ilk bor, Ag va Cu ning yuqori haroratli diffuzion kiritilishi natijasida CdTe ning aralashmali fotoo'tkazuvchanlik mavjudligi aniqlangan, bu esa yorug'lik to'liq uzunligining 0,4-3,0 eV oralig'ida fotosezgirlikni 2-3 marta oshishiga olib kelgan;

keng bo'shliqli optik oyna sirt rekombinatsiyasi tezligini sezilarli darajada pasaytirish orqali plyonka geterostrukturasi yig'ish koeffitsiyentini oshishiga olib kelganligi eksperimental ravishda ko'rsatilgan;

ilk bor, haroratning oshishi bilan spektrning qisqa va uzun to'liq sohasida geterostrukturaning fotosezgirlik kuchayib borishi, faollashuv energiyasi $E_c - 1,15 \text{ eV}$ teng bo'lgan chuqur aralashmalar sathining mavjudligi bilan ko'rsatilgan;

havo ifloslanishini aniqlash uchun pCdTe-nCdS va nCdTe-pCdSe geterostrukturalariga asoslangan yorug'likning keng diapozonida (0,4-3,0 eV) ishlaydigan optik datchiklar hamda fotoelektrik modul ishlab chiqilgan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

pCdTe-nCdS va pCdTe-nCdSe geterostrukturasi birinchi guruh aralashmalari Ag va Cu elementlari bilan legirlanganda yig'ish samaradorligi ortib fotosezgirlikni 2-3 baravar oshiradi va issiqlikka chidamli, qisqa va uzun to'liq spektrlarida fotosezgirlik yuqori darajada stabil holatda bo'lgan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi doimiy fotoo'tkazuvchanlik usullari, Lukovskiy usuli, eksperimental ma'lumotlarni statik qayta ishlash va olingan natijalarning takrorlanishi bilan asoslanadi va tasdiqlanadi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati chuqur aralashma sathiga ega geterostrukturali quyosh elementi o'zgartirgichlarining yaxshilangan fotoo'tkazuvchanligini ishlab chiqish va bu geterostrukturalarda fotosezgirlik spektrlarini tahlil qilishdan iborat.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati chuqur aralashma sathiga ega bo'lgan pCdTe-nCdS va pCdTe-nCdSe geterostrukturalarini qo'llagan holda yutulish spektrining uzun to'liqli mintaqalarining keng diapazonlarida samarali quyosh o'zgartirgichlarini ishlab chiqish va ular asosida temperaturaga chidamli, barqaror yarimo'tkazgichli qurilmalarda qo'llashdan iborat.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Olingan ilmiy natijalar asosida pCdTe-nCdS va pCdTe-nCdSe plyonka geterostrukturalarining elektrofizik, optik, fotoelektrik xossalari va tok o'tish mexanizmlari bo'yicha:

quyosh energiyasi uchun o'zgartirgich sifatida pCdTe-nCdS va pCdTe-nCdSe asosida quyosh batareyalarini ishlab chiqarishning optimal texnologiyasi OT-F2-71 "Juda yuqori chastotali elektromagnit maydonda deformatsiyalangan p-n o'tish joyining volt-amper xususiyatlariga yorug'lik ta'sirini o'rganish" mavzusida 2017-2020 yillarda Namangan muhandislik-qurilish instituti "Fizika" kafedrasida

(Namangan muhandislik-qurilish institutining 26 iyun 2024-yildagi 06/15-son ma'lumotnomasi) davlat ilmiy-texnik dasturlari doirasida amalga oshirilgan. Ilmiy natijalardan foydalanish legirlangan kadmiy tellurid namunalarning elektrofizik parametrlarini barqarorlashtirishga olib keldi va ularning analoglari ko'rsatkichlariga mos keladigan quyosh batareyalarini ishlab chiqarishga imkon berdi; Ag va Cu ning kadmiy telluriga termal legirlash yo'li bilan kiritilishi pCdTe-nCdS va pCdTe-nCdSe geterostrukturalarining chuqur aralashmali fotoo'tkazuvchanligiga olib keladi, bu fotosezgirlikni 2-3 marta oshirgan va uning parametrlarini barqarorlashtirgan;

CdTe plyonkalaridagi to'siqlar yuzasida birinchi guruh elementlarning chuqur aralashma markazlarining mavjudligi chuqur markazlarda joylashgan maydon 0,4-3,0 eV oralig'ida ajralib chiqadigan asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilari kontsentratsiyasining keskin oshishiga olib keladi va bu natijalar "FOTON" aksiyadorlik jamiyati va "O'zeltexsanoat" aksiyadorlik jamiyatida (O'zeltexsanoat AJ ning 2024 yil 27 iyundagi №123-sonli ma'lumotnomasi) quyosh energiyasining yarimo'tkazgichli fotoo'zgartirgichlarni ishlab chiqarishda qo'llanildi. Olingan natijalardan foydalanish quyosh energiyasi va boshqa elektron qurilmalarning fotoo'zgartirgichlarni ishlab chiqarish va ularning elektrofizik va optik parametrlarini yaxshilash imkonini bergan.

Tadqiqot natijalarini aprobatsiyasi. Mazkur tadqiqot natijalari 12 ta, jumladan 8 ta xalqaro va 4 ta respublika ilmiy-amaliy anjumanlarida muhokamadan o'tkazilgan.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi. Dissertatsiya mavzusi bo'yicha jami 25 ta ilmiy ish, jumladan O'zbekiston respublikasi Oliy attestatsiya kommissiyasining doktorlik dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan xorijiy va respublika ilmiy nashrlarida 13 ta ilmiy maqola hamda tadqiqot mavzusi bo'yicha 2 ta EHM uchun dasturiy guvohnomalar olingan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya tarkibi kirish, to'rtta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati va ilovalardan iborat. Dissertatsiyaning hajmi 118 betni tashkil etgan.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Dissertatsiyaning **kirish** qismida mavzusining dolzarbligi va talabgorligini asoslab beradi, tadqiqotning respublika fan va texnikasini rivojlantirishning ustuvor yo'nalishlariga muvofiqligini ko'rsatadi, muammoni bilish darajasi, maqsad va vazifalari, tadqiqotning tematik rejalari bilan muvofiqligini ochib beradi. Tadqiqot ob'ekti, predmeti va usuli tavsiflanadi. Shuningdek, tadqiqotning ilmiy yangiligi va amaliy natijalari bayon etilgan, tadqiqot natijalarini amaliyotga tatbiq etish, ishning tasdiqlanishi, chop etilgan ishlar, dissertatsiya hajmi va tuzilishi haqida ma'lumotlar berilgan.

Dissertatsiyaning "**CdTe/CdS va CdTe/CdSe geteroo'tishlarning xossalari bo'yicha asosiy ma'lumotlar**" nomli birinchi bobi turli yarimo'tkazgichlar va kadmiy telluriddan tayyorlangan bir o'tishli va getero'tishli quyosh elementlarining (QE) boshqa keng zonali materiallar bilan birlashtirilgan ma'lum turlariga oid adabiyotlar tahliliga bag'ishlangan. Ushbu turdagi fotoo'zgartirgichlar sifatida CdTe/CdS va CdTe/CdSe ning harorat, strukturaviy-optik xususiyatlari, elektrofizik, fotoelektrik

xususiyatlarining ta'siri ko'rib chiqiladi. Adabiy ma'lumotlar tahlili asosida dissertatsiya ishining maqsad va vazifalari belgilab olingan.

Dissertatsiyaning **“Chuqur aralashma sathiga ega pCdTe - nCdS va pCdTe - nCdSe asosidagi geterostrukturalarni ishlab chiqarish texnologiyasi va metodikasi”** nomli ikkinchi bobi issiq iqlim sharoitida chuqur aralashmalar sathiga ega pCdTe - nCdS va pCdTe - nCdSe asosidagi geterostrukturalarni ishlab chiqishning ilmiy va texnologik jihatlariga va ikkita metod chuqur sath energiya pozitsiyalarini aniqlash, zavodda ishlab chiqarilgan yuqori toza yarimo'tkazgichlar va Ag va Cu qotishma materiallaridan foydalangan holda ishlab chiqarish texnologiyalariga bag'ishlangan.

Foto-EYKning vaqt xarakteristikalari namuna qisqa impulslari bilan neodim shisha lazerining ($h\nu=1.17\text{eV}$) yoki uning ikkinchi garmoniksi ($h\nu=2.34\text{eV}$) bilan qo'zg'atilganda o'lchandi. Namuna qarshilik R_y bilan yuklangan va signal S8-13 ostseligraf bilan o'lchangan, lazer pulsining davomiyligi taxminan 50 ns edi. Foto-EYK signali yarim kvadrat shakliga ega bo'lib - qo'zg'alish pulsi ta'sirida kuchayishi va sekin pasayishi mumkin. Fotoo'tkazuvchanlik rejimida signal qo'zg'alish pulsining shakliga mos keldi, shuning uchun fotojavob vaqtini o'lchash uchun 17 ps puls davomiyligi bilan rejim sinhronlangan neodimiy YAG lazeri ishlatilgan. Bunday holda, parazit sig'img'lar va o'lchash yo'lining mos kelmasligi muhim rol o'ynadi. S7-19 ostselograf yordamida fotoo'tkazuvchanlikning egrilik chiziqlari ostselyatsiya tebranishlari bilan bir vaqtda kuzatildi. Ikkinchisini o'rtacha hisoblab, fotoo'tkazuvchanlikning xarakterli pasayish vaqti aniqlandi

Fotoo'tkazuvchanlik (FO') va qisqa tutashuv oqimi (I_{K3})ning spektral bog'liqliklarini o'lchash doimiy fotoo'tkazuvchanlik usullari yordamida amalga oshirildi. Kriostatga joylashtirilgan namuna IKS-14 monoxromatori orqali yuqori temperaturali manba (global) bilan yoritilgan. Tarqalgan yorug'likning ta'sirini kamaytirish uchun (IQ mintaqasida o'lchashda) kremniy va germaniy filtrlari ishlatilgan. Signal ED-05M elektrometri bilan qayd etilgan. Namunani qisqartiruvchi yuk qarshiligiga ulanganda, qisqa tutashuv oqimi o'lchandi va elektr kuchlanish manbai zanjirga olib ulanganda, foto o'tkazuvchanlik va foto-EYKga qarab umumiy signal o'lchandi. Manba qarama-qarshi kuchlanishlarda yoqilganda o'lchovlarni amalga oshirib, signallardagi farq foto-EMFga proporsional ekanligini va yig'indisi foto o'tkazuvchanlikka mutanosib ekanligini aniqlangan.

Uchinchi bob, **“Chuqur aralashma sathiga ega pCdTe - nCdS va pCdTe - nCdSe ga asoslangan geteroo'tishlarning fotoelektrik xususiyatlariga tashqi omillarning ta'siri”** nomli bo'lib chuqur aralashma markazlarini o'z ichiga olgan fotoo'tkazuvchanlik spektrlarini tahlil qilishni soddalashtirish uchun zarur bo'lgan CdTe plyonkalarining yutilish chetida tashqi omillarning ta'siri shuningdek, CdTe qatlamlarining fotoelektrik xossalari tizimlashtirilib, pCdTe – nCdS va pCdTe – nCdSe ga asoslangan geterostrukturalarning fotoelektrik xossalariga harorat, chuqur darajalar va bosimning samarali ta'siriga bag'ishlangan. Quyosh radiatsiyasini o'zgartirish uchun ushbu qatlamlarning ba'zi fenomenologik modellari ham ko'rib chiqiladi.

Geterostruktura uchun biz legirolovchi aralashmalar sifatida birinchi guruh Ag va Cu elementlarini tanladik. Ushbu materiallarning aralashmalar sifatida tanlanishi, Ag

va Cu ning CdTe da legirantining optimal harorati nisbatan past bo'lishi va taglik harorati $80 \div 300$ °C oralig'ida joylashganligi bilan bog'liq, bunda faqat eng yuqori fotosezgir va stabil xususiyatlarga ega CdTe plyonkasini olish mumkin. Shuningdek, ular CdTe ta'qiqlangan zonasida chuqur darajalarni hosil qiladi, bu esa zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasini oshiradi va fotoEYK hosil bo'lishida ishtirok etadi.

1-jadvalda $60 \frac{mVt}{sm^2}$ quyosh nurlanish quvvatida plyonka strukturalarining eksperimental parametrlari va foydali ish koeffitsiyenti FIK (η) qiymatlari ko'rsatilgan. Bunday holda, FIK quyidagi formuladan foydalanib hisoblanadi:

$$\eta = \frac{J_n V_n}{S p}, \quad (1)$$

bu erda $J_n V_n$ – mos ravishda, yuklama qarshiligining optimal qiymatida tok va kuchlanish;

S – strukturalarning umumiy maydoni;

p – yorug'lik oqimining quvvati.

1-jadvaldan ko'rinib turibdiki, p CdTe – n CdS va p CdTe – n CdSe tuzilmalarining to'ldirish koeffitsiyenti (Q) qiymati mos ravishda 0,45 va 0,34 ni tashkil qiladi. Juda past to'ldirish koeffitsiyenti ketma-ket qarshiliklarning katta qiymatiga bog'liq. $60 \frac{mVt}{sm^2}$ quyosh nurlanish quvvatida p CdTe – n CdS va p CdTe – n CdSe strukturalari uchun η qiymati mos ravishda $5 \div 6\%$ va $3 \div 4\%$ ni tashkil qiladi.

In $I_{kz} = f(V_{xx})$ turli haroratlarda o'zgaruvchan yorug'lik rejimiga bog'liqligini o'rganish shuni ko'rsatdiki, p CdTe – n CdS strukturalarining voltamper xarakteristikalarining to'g'ridan-to'g'ri tarmog'i $I = I_0 \left(\frac{qV}{AkT-1} \right)$ qonuniga bo'ysunadi, bunda $A = 1,5 \div 1,7$ va $I_0 = 10^{-9} \frac{A}{sm^2}$.

p CdTe – n CdSe tuzilmalari uchun $\ln I_{kz} = f(V_{xx})$ bog'liqligi o'zgaruvchan sharoitda ikkita eksponensial bo'lim bilan tavsiflanadi:

$$I = I_{01} \exp \left(\frac{qV}{A_1 kT} \right) + I_{02} \exp \left(\frac{qV}{A_2 kT} \right) \quad (2)$$

Bu yerda $A_1 \approx 2, I_{01} \approx 10^{-4} \frac{A}{sm^2}, A_2 \approx 15, I_{02} \approx 10^{-6} \frac{A}{sm^2}$.

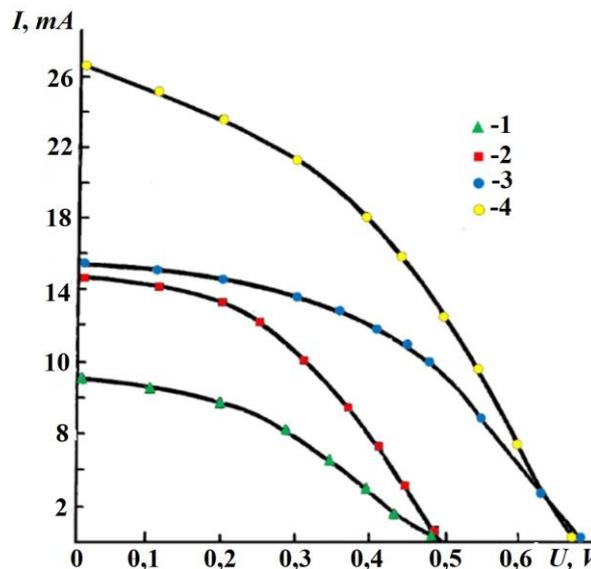
1-jadval

Strukturalarning ekspluatatsion parametrlari	p CdTe – n CdS	p CdTe – n CdSe
$I_0, \frac{A}{sm^2}$	10^{-9}	10^{-8}
A	$1,7 \div 2$	$1,5 \div 1,7$
$I_{kz}, \frac{mA}{sm^2}$	$13 \div 15$	$6 \div 7$
V_{xx}, mV	$600 \div 700$	$350 \div 400$
θ	$0,4 \div 0,45$	$0,35 \div 0,4$
$\eta, \%$	$5 \div 6$	$3 \div 4$

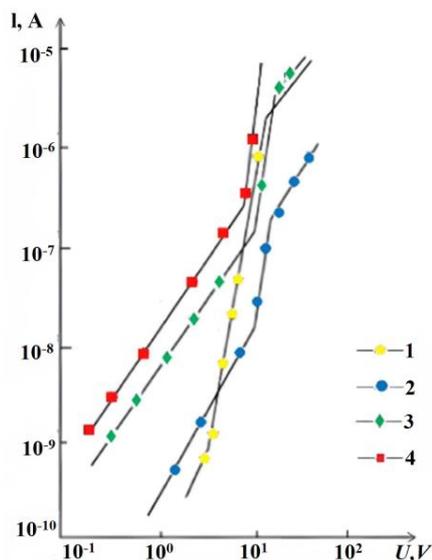
Olib borilgan eksponensial ko'paytirgich baholashining taxminlari shuni ko'rsatadiki, p CdTe - n CdSe strukturasi past yorug'lik darajasida tok hajmiy zaryad qatlamidagi rekombinatsiya bilan cheklangan. p CdTe - n CdS va p CdTe - n CdSe strukturalarida yuqori yorug'lik darajasida esa asosiy bo'lmagan muvozanatsiz tashuvchilari diffuziya tok oqimga hissa qo'shishni boshlaydi.

Shuni ta'kidlash kerakki, termotsikllash p CdTe - n CdS strukturasi o'tish tabiatini yaxshilaydi va shu bilan volt-amper xarakteristikasini yaxshilaydi. Bu p Cu_{2-x}S - n CdS va p Cu_{2-x}Te - n CdTe tizimlariga asoslangan plyonka elementlariga nisbatan p CdTe - n CdS strukturasi eng muhim afzalliklaridan biridir.

1-rasmda ko'rinib turibdiki, harorat ortishi bilan kvadratli tuzoq bo'lagining uzoqligi kengayadi va tok ortishi bilan bo'lak keskin qisqaradi. Bundan tashqari, kvadratik bo'lakdagi yuqori haroratlarda oqimning qiymati



1-rasm. p CdTe - n CdS (3, 4) va p CdTe - n CdSe (1, 2) W - cho'g'lanma chiroq (1, 3) va atmosferadan tashqari quyosh manbai 55 va 139 $\frac{mWt}{sm^2}$ (2, 4) quvvat bilan yoritilganda plyonka strukturasi yuklama volt-amper xarakteristikasi.



2-rasm. Turli haroratlarda p CdTe - n CdS heterostrukturaning volt-amper xarakteristikalarining teskari tarmoqlari, K: 1-302, 2-338, 3-358, 4-376

xona haroratidagi qiymatidan kamroq, ya'ni doimiy kuchlanishda tok harorat ortishi bilan kamayadi³.

p CdTe - n CdSe heterostrukturasining volt-amper xarakteristikasining teskari tarmoqlari (2-rasm) kenglik zaryadlar bilan chegaralangan toklarga xos bo'lgan uchta qismga ega. Birinchi qism kvadratik tuzoqlar, ikkinchi qism - otokning keskin o'sishi qismi, tuzoqlarni to'liq to'ldirish

uchun zarur bo'lgan kuchlanishdan boshlanadi, so'ngra kvadratik qismni kuzatib boradi.

Volt-amper xarakteristikasining bunday harakati kenglik zaryadlar bilan cheklangan toklar rejimini aniq ko'rsatadi.

CdTe - CdS strukturali quyosh elementi sezgirligining spektral hududi 0,4 va 0,90 mkm to'liq uzunliklari bilan chegaralanadi va 0,58...0,81 mkm oralig'ida sezuvchanlik egri

³ Rentgen strukturaviy va foto-optik tadqiqotlar Janubiy Federal universiteti, Rostov-na-Donu, Rossiyada olib borildi

chizig‘i tekis shaklga ega (3-rasm). Sezuvchanlik mintaqasining qisqa to‘lqinli va uzun to‘lqinli chegaralarining spektral pozitsiyalari kenglik – ta‘qiqlangan zonalarining qiymatlari bilan belgilanadi, mos ravishda, CdTe va CdS zaryad tashuvchini yig‘ish affektivligiga ta‘sir qiladigan aralash kuchlanishiga bog‘liq emas. Bu elementlarning yana bir xususiyati shundaki, tashuvchilarning ajralishi CdS va CdTe orasidagi chegarada emas, balki CdTe qatlamining chuqurligida, uning yuzasidan bir necha mikrometr masofada sodir bo‘ladi, bunda p-CdTe dagi erkin kadmiy atomining tarqalishi natijasida yuzaga keladigan qatlam hosil bo‘lishi bilan bog‘liq.

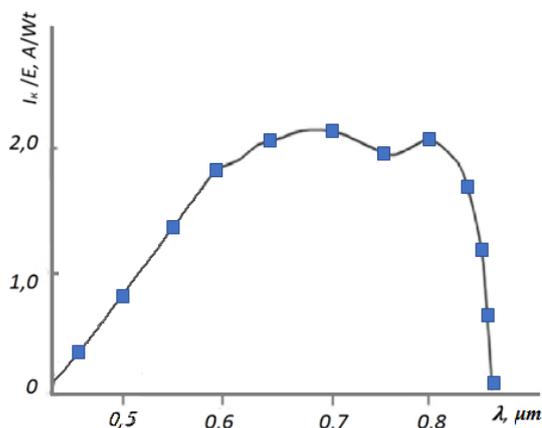
CdTe plyonkasiga Ag va Cu legirantini kiritishda CdTe - CdSe tuzilishiga asoslangan quyosh batareyasining spektral sezgirlik diapazoni 0,40...0,80 mkm oralig‘ida joylashgan (3-rasm). Bu shuni ko‘rsatadiki, Ag va Cu ning CdTe da $E_c = 1,15$ eV ga teng bo‘lgan chuqur faollashuv energiya darajalarini hosil qiladi. Ular foto - EYKni shakllantirishda ishtirok etadilar. Biroq, spektrning qisqa to‘lqinli qismida zaryad tashuvchini yig‘ish koeffitsiyenti uzun to‘lqinli qismga qaraganda kamroq, bu CdSe tashuvchilarning kichik diffuziya uzunligini ko‘rsatadi.

Shunday qilib, olingan eksperimental natijalarga asoslanib, p CdTe – n CdS va CdTe – n CdSe asosida yaratilgan geterostrukturalar sirt rekombinatsiyasining fotosensitivlikka ta‘sirini sezilarli darajada kamaytiradi va fotosensitivlikning spektral taqsimoti 0,4 mkm dan 0,9 mkm gacha kengayadi, deb xulosa qilish mumkin. Ag va Cu legirantlarini kiritishda foto-EYKda ishtirok etadigan CdTe ta‘qiqlangan zonasida chuqur sathlar hosil bo‘ladi, fotosezuvchanlik esa infraqizil nuriga yaqin hududga yo‘naladi.

Yarim logarifmik mashtab bo‘yicha turli haroratlarda p CdTe - n CdS geteroo‘tishning volt-amper xarakteristikalari to‘g‘ridan-to‘g‘ri tarmoqlari 9-rasmda keltirilgan. Olingan volt-amper xarakteristikalarini p-n geteroo‘tishning modellaridan biri asosida tushuntirib bo‘lmaydi. Buning sababi shundaki, CdS olinganda, donalarning sirt qatlamidagi oraliq qatlamlar bo‘ylab erkin kadmiy Cd atomining diffuziyasi sodir bo‘ladi. Shunday qilib, CdTe donalarida kichik p-n gomoo‘tishlar paydo bo‘ladi va struktura ketma-ket bog‘langan izotiplaridan iborat n CdTe – n CdS geteroo‘tishlar va p CdTe – n CdTe gomoo‘tishlarni tashkil qiladi. CdTe ning n-qatlamining hosil bo‘lishida CdS dan diffundlangan indiyning rolini inkor etib bo‘lmaydi, chunki CdS indiy bilan legirlangan.

$V > 0,6V$ kuchlanishda ikkinchi qism boshlanadi, bu erda β ortib borayotgan qiymatni oladi. Shuni ta‘kidlash kerakki, qo‘sh logarifmik koordinatada joriy kuchlanish xarakteristikasining ikkinchi bo‘limi to‘g‘ri chiziq beradi va $I \sim V^n$ bog‘liqligi bilan yaqinlashadi, bu erda $n \approx \frac{3}{2}$.

p CdTe - n CdS geteroo‘tishning volt-amper xarakteristikasining teskari tarmog‘i ikki qismidan iborat (4-rasm). $0 < V < 0,2V$ kuchlanish oralig‘ida xona haroratidagi



3-rasm. p CdTe – n CdSe strukturasi fotosezgirlikni spektral taqsimoti

boshlang'ich qismi diod koeffitsiyenti $\beta \approx 2$ bo'lgan eksponensial qonuniyarga ega. $V > 0,2V$ kuchlanishda tokning kuchlanishga bog'liqligi darajaviy xarakterga ega bo'lib: $I \sim V^n$, bu yerda $n \approx 0,5$. Haroratning oshishi bilan dastlabki eksponensial qismi kengayadi va $378^\circ K$ da $0,5 V$ kuchlanishga etadi. Teskari kuchlanishlarda diffuziya-drift muvozanatining buzilishi p-n o'tish joyining fazoviy zaryad mintaqasining (003) kengayishiga va uning elektronlar va teshiklar bilan bog'lanishiga olib keladi. Bunday holda, 003 da teshiklarning paydo bo'lishi rekombinatsiyadan ustun turadi. Tuzilish mintaqasida hosil bo'lishidan kelib chiqadigan oqim zichligi formulasi quyidagicha ifodalanadi:

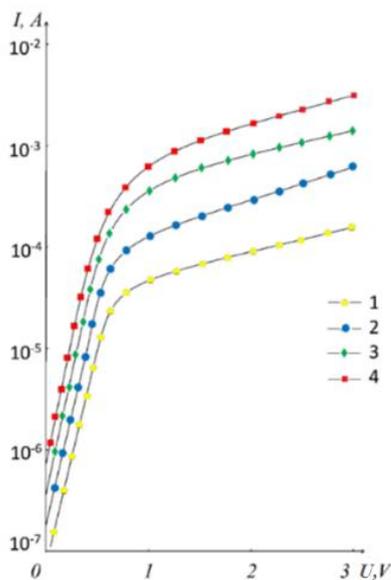
$$I = \frac{qn_i d}{r_p}, \quad (3)$$

bu erda d - birlashtirilgan qatlamning kengligi.

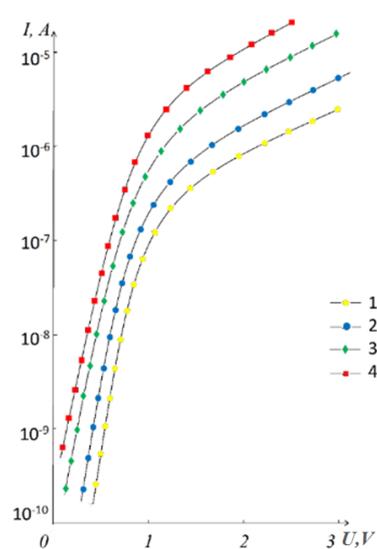
Formuladan (3) ko'rinib turibdiki, ma'lum bir haroratda generatsiya toki birlashtirilgan qatlamning kengligi bilan proporsionaldir, bu esa o'z navbatida qo'llaniladigan teskari kuchlanishga bog'liq. Shunday qilib, VAXning teskari tarmog'i mos ravishda qismi subchiziqli bog'liqlik bilan quyidagicha tavsiflanadi

$$I = \frac{qn_i}{\tau_p} \sqrt{\frac{2\varepsilon_n V}{q N_a}}. \quad (4)$$

$302, 338, 358$ va $376^\circ C$ temperaturalardagi p CdTe – n CdSe geteroo'tishlar VAXning to'g'ridan-to'g'ri tarmoqlari 5-rasmda keltirilgan. Ushbu strukturalarda to'g'ridan-to'g'ri tokning kuchlanishga bog'liqligi ham (4) formula bilan aniqlangan eksponensial xususiyatga ega. Biroq, diod koeffitsiyenti β haroratga bog'liq, ya'ni harorat ortishi bilan u ham ortadi.



4-rasm. Turli haroratlarda p CdTe - n CdS heteroo'tish VAXning to'g'ridan-to'g'ri tarmoqlari, K: 1-302, 2-338, 3-358, 4-376



5-rasm. Turli haroratlarda p CdTe - n CdSe heteroo'tish VAXning to'g'ridan-to'g'ri tarmoqlari, K: 1-298, 2-325, 3-355, 4-376

Birinchi kvadratik kesmadan boshlab yopishish faktori θ aniqlandi (θ - erkin zaryadning tuzoqqa tushgan zaryadga nisbati)

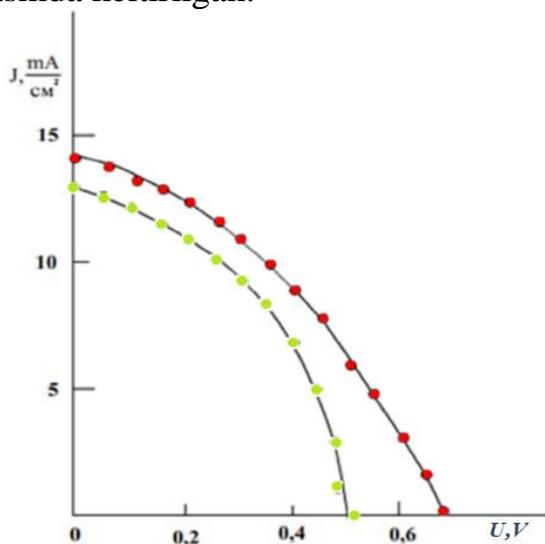
$$V_{pzl} = \frac{eN_t d^2}{2\varepsilon}, \quad (5)$$

Yuqoridagi formula yordamida amalga oshirilgan taxmin $\theta \approx 10^{-9}$ qiymatini beradi. Yopishqoqlik faktorining bunday past qiymati CdSe qatlamida va chegarada tuzoqlarning yuqori konsentratsiyasi mavjudligini ko'rsatadi.

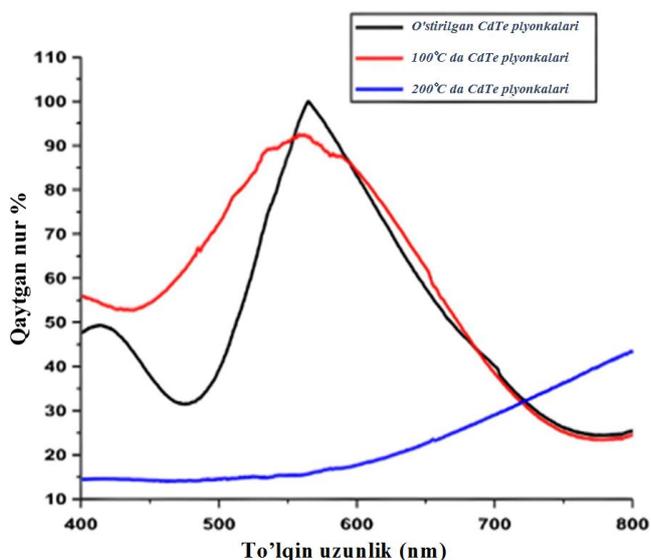
V_{pzi} yo'nalishi bo'yicha hisoblangan N_t tuzoqlarining konsentratsiyasi $N_t \approx 3,4 \cdot 10^{16} \text{sm}^{-3}$ ga teng bo'lib chiqdi. θ va N_t ni bilib, biz E_t tuzoqlarining chuqurligini hisoblab chiqdik, bu $\approx 0,5 \text{ eV}$ ga teng bo'lib chiqdi (6-rasm).

Qalinligi 1 mkm bo'lgan CdTe plyonkalari olindi, turli haroratlarda tavlanaadi. CdTe plyonkalarining fotometrik o'lchovlari (o'tkazuvchanlik, aks ettiruvchanlik va yutuvchanlik) quyosh elementlari uchun quyosh spektrining ko'rinadigan hududidagi materialni tavsiflash uchun amalga oshirildi. Shuningdek, tavlangan CdTe plyonkalarining kukunli rentgen nurlari diffraksiyasi (KRND) o'rganildi va KRND (PXR) tahlili asosida ba'zi strukturaviy parametrlar hisoblab chiqildi. Bu optoelektronik qurilmalar uchun mos keladigan sifatli plyonka o'stirish sharoitlarini optimallashtirish maqsadida qilingan.

CdTe plyonkalarining foizli aks ettirish xususiyatlari to'lqin uzunligiga qarab 7-rasmda keltirilgan.



6-rasm. $60 \frac{mWt}{sm^2}$ quyosh nurlanish quvvatida p CdTe – n CdS (1) va p CdTe – n CdSe (2) geteroo'tish asosida plyonkali quyosh elementlarining yuklama VAXi



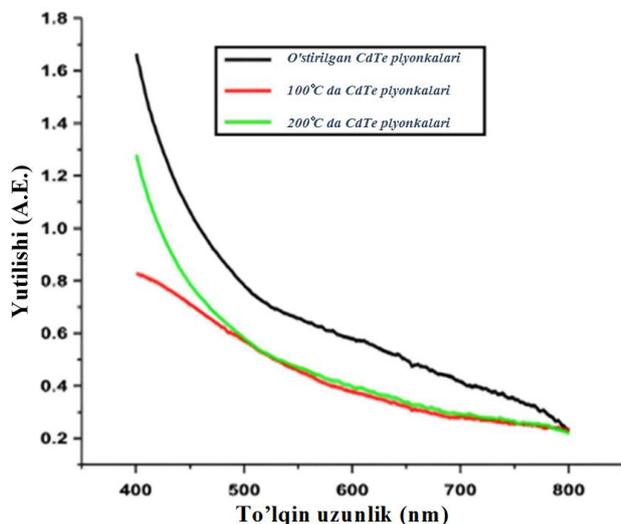
7-rasm. Turli haroratlarda tavlangan 1 mkm qalinlikdagi CdTe plyonkalarining aks ettiruvchanlik qobiliyati

CdTe plyonkalarini aks ettiruvchanlik koeffitsiyenti to'lqin uzunligiga qarab davriy ravishda o'zgarib turishi aniqlandi. Bir nechta aks ettiruvchanlik interferensiyasi oqibatida egiriklik aks ettiruvchanlikda ko'plab tebranishlar sodir bo'ladi. To'lqin uzunligi ortishi bilan bu plyonkalarining tebranish davri o'zgaradi. Shunday qilib, CdTe plyonkalarining aks ettiruvchanlik xususiyatlari elektromagnit spektrlarning to'lqin uzunligiga kuchli bog'liqdir. CdTe plyonkasi uchun 566 nm da 99% ni aks ettiruvchanlikning eng yuqori cho'qqi foizi kuzatildi. 92% maksimal aks ettiruvchanlik cho'qqisi 562 nm to'lqin uzunligida 100°C tavlangan plyonka uchun, 200°C da 800 nm to'lqin uzunligida tavlangan CdTe plyonkasi uchun 43% maksimal

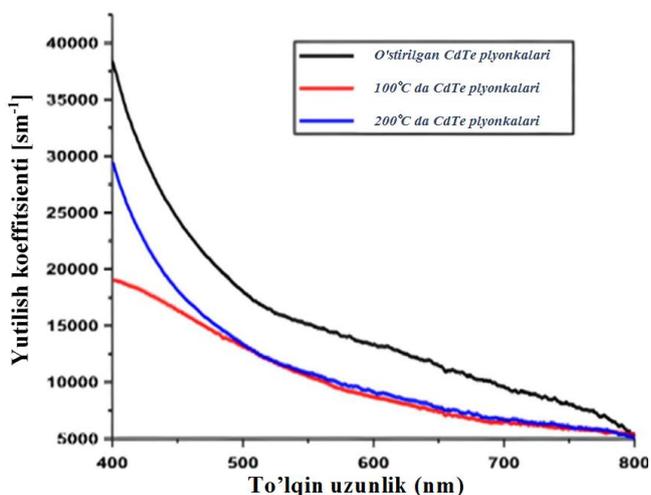
aks ettiruvchanlik cho‘qqisi kuzatildi. Aks ettiruvchanlik spektrlari aniq cho‘qqilar va chuqurliklar bilan interferentsiyali holatini ko‘rsatadi.

Turli haroratlarda tavlangan CdTe plyonkalarining yutilish xususiyatlari to‘lqin uzunligi funksiyasi sifatida 8-rasmda ko‘rsatilgan.

Yutish spektrlaridan, to‘lqin uzunligi ortishi bilan yutilishning kamayishi va 100°C va 200°C da tavlangan o‘sib chiqqan plyonkalar uchun mos ravishda 1,6, 1,2 va 0,8 Wt/m⁻¹ dan ortiq bo‘lishi kuzatildi. Ko‘rinadigan hududda yangi o‘stirilgan plyonka uchun u yuqoriroq ekanligi aniqlandi, bu uning tartibli tuzilishi, shuningdek, erkin zaryad tashuvchilarni yutilishi bilan bog‘liq bo‘lishi mumkin va CdTe plyonkasining yarim o‘tkazuvchanlik tabiatini ko‘rsatadi.



8-rasm. Qalinligi 1 mkm bo‘lgan, har xil haroratda tavlangan CdTe plyonkalarining yutilish spektrlari



9-rasm. Qalinligi 1 mkm, har xil haroratda tavlangan CdTe plyonkalarining yutilish koeffitsiyenti

9-rasmdan ko‘rinib turibdiki, yutilish koeffitsiyenti to‘lqin uzunligi qisqaroq mintaqada yuqori qiymatlarga ega va quyosh spektrining ko‘rinadigan hududida to‘lqin uzunligi ortishi bilan kamayadi. Shuningdek, qiymat tavlaniş haroratining oshishi bilan kamayadi. $3,9 \times 10^4$, $2,9 \times 10^4$ va $1,9 \times 10^4$ yutilish koeffitsiyentlari o‘sib chiqqan, 100°C va 200°C tavlangan CdTe plyonkalarini uchun 400 nm da kuzatilgan. Yutilish koeffitsiyentining bunday qiymatlari ($>10^4 \text{ sm}^{-1}$) ruxsat etilgan to‘g‘ridan-to‘g‘ri o‘tishning yuqori ehtimolini anglatadi.

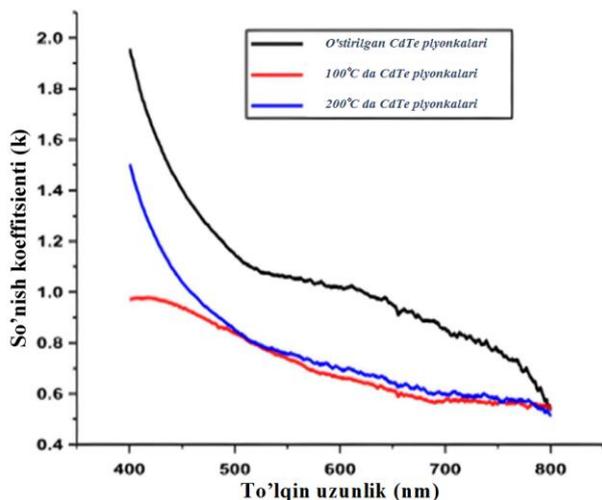
To‘lqin uzunligiga qarab turli haroratlarda tavlangan CdTe plyonkalarining so‘nish koeffitsiyentining o‘zgarishi 10-rasmda ko‘rsatilgan.

So‘nish koeffitsiyenti (k) foton energiyasining oshishi bilan ortadi va tavlaniş haroratining oshishi bilan kamayadi. Yangi o‘stirilgan CdTe uchun so‘nish koeffitsiyenti yuqori ekanligi aniqlandi, bu o‘tkazilgan plyonkada zichlik effektining ustunligi bilan izohlanishi mumkin. Olingan so‘nish koeffitsiyentlari 100°C va 200°C da tavlangan CdTe plyonkalarini uchun 1,92, 1,5 va 0,98 ni tashkil etdi.

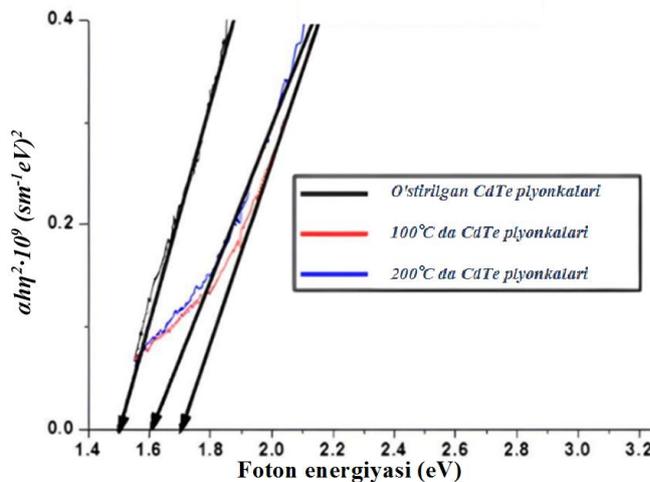
Turli haroratlarda tavlangan CdTe plyonkalarining ta‘qiqqlangan zona kengligi 11-rasmda ko‘rsatilgan.

Optik ta‘qiqqlangan zona energiyalari nol yutilish koeffitsiyentlari ($\alpha = 0$) uchun Tauts grafigining to‘g‘ri chizig‘ini ekstrapolyatsiya qilish orqali baholandi. Grafikning

taxminan chiziqli xarakteri pastroq to'liqin uzunliklariga nisbatan va yuqori to'liqin uzunliklariga nisbatan eksponensial xarakterga ega, bu to'g'ridan-to'g'ri optik o'tish mavjudligini ko'rsatadi. Grafikning eksponensial harakati materialning lokal aralashmalari bilan izohlanishi mumkin. Optik ta'qiqlangan zona kengligi energiyasi tavlanih haroratining oshishi bilan ortadi. 100°C va 200°C da tavlangan CdTe plyonkalari uchun 1,5 eV, 1,6 eV va 1,7 eV optik ta'qiqlangan zona kengligi energiyasi aniqlandi.

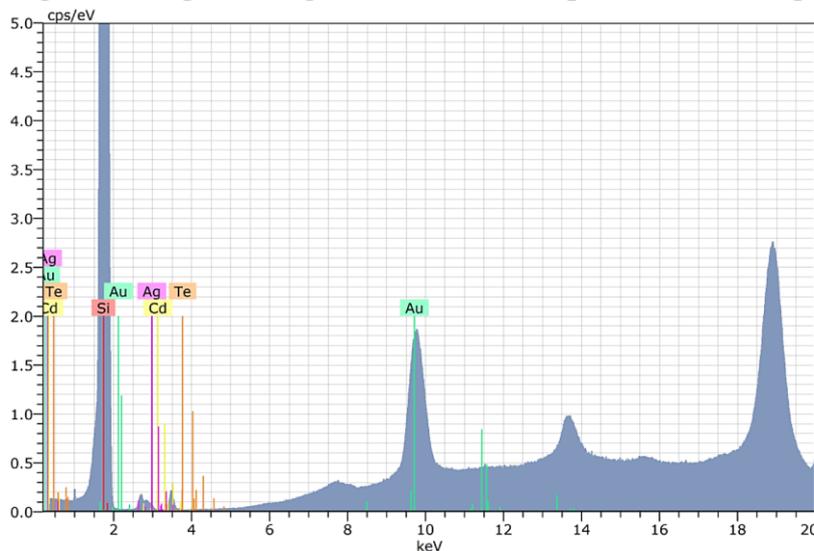


10-rasm. Qalinligi 1 mkm bo'lgan, turli haroratlarda tavlangan CdTe plyonkalarining so'nish koeffitsiyentining o'zgarishi



11-rasm. Turli haroratlarda tavlangan 1 mkm qalinlikdagi CdTe plyonkalarining ta'qiqlangan zona kengligi

12-rasmda 200°C da tavlangan pCdTe-nCdS va pCdTe-nCdSe geterostrukturasi-ning shifrlangan rentgen-fluorestsent spektri ko'rsatilgan.



12-rasm. pCdTe-nCdS va pCdTe-nCdSe geterostrukturasi-ning shifrlangan rentgen-fluorestsent spektri

Rentgen-fluorestsent tahlili (RFT) yordamida geterostrukturani-ning elementar tarkibini, ya'ni elementar tahlilini olish uchun o'rganildi. Undan foydalanib,

berilliydan (Be) uranga (U) qadar turli elementlar topildi. CdTe plyonkalarida Te, Si, Au, Ag, Cd kabi elementlar borligi aniqlandi.

13-rasmda (a va b) CdTe granulari va 1 mkm qalinlikdagi CdTe plyonkalarining turli tavlaniş haroratidagi skaynerlovchi elektron mikroskopda ustki morfologiya tasvirlari ko'rsatilgan.

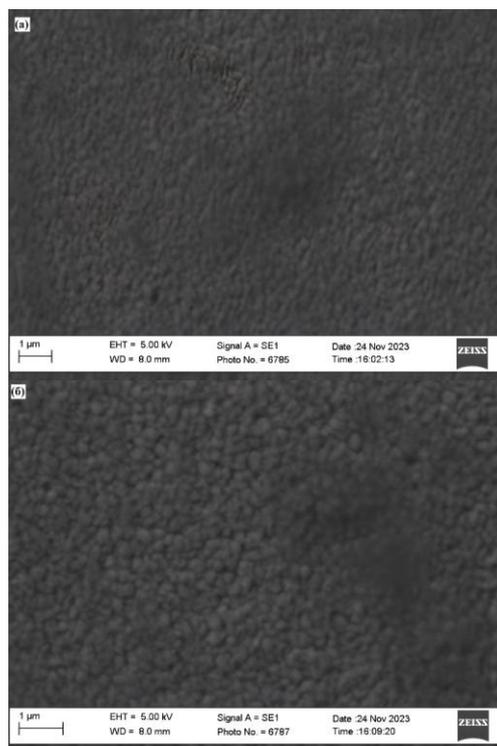
Skanerli elektron mikroskop tahlili 13-rasmda (a va b) hona harorati va 200°C da CdTe granulari, o'stirilgan va tavlangan plyonkalar uchun ko'rsatilgan. Plyonkalarining yuzasi toza, bir xil va teshiksiz ko'rinadi. Ushbu natijalar o'tkazish paytida aralashmalarning kiritilishi bilan yuqori vakuumda termal bug'lanish orqali olingan plyonkalarining sifatini tasdiqladi. Tovlash harorati plyonkalarining don o'lchamlariga (13-rasm a va b), shuningdek plyonkalarining ta'qiqlangan zona kengligiga (11-rasm q.) ta'sir qiladi.

Olingan natijalar 1 mkm qalinlikdagi CdTe plyonkasini yutuvchi qatlami sifatida foydalanib CdS/CdTe yupqa plyonkali quyosh elementlarini ishlab chiqish imkoniyatini ko'rsatdi.

To'rtinchi bob **"Chuqur aralashma sathli pCdTe - nCdS va pCdTe - nCdSe geterostrukturaning optik va elektrofizik xususiyatlari va ularning amaliy qo'llanilishi"** bo'lib chuqur aralashma sathli p-CdTe-nCdS va pCdTe-CdSe geterostrukturalarining elektrofizik va sirt faollik xususiyatlari shuningdek, ular asosida fotoelementlarning xususiyatlarini yaxshilash, qalinligi va haroratning fotoelektrik xususiyatlarga ta'siri natijalariga bag'ishlangan.

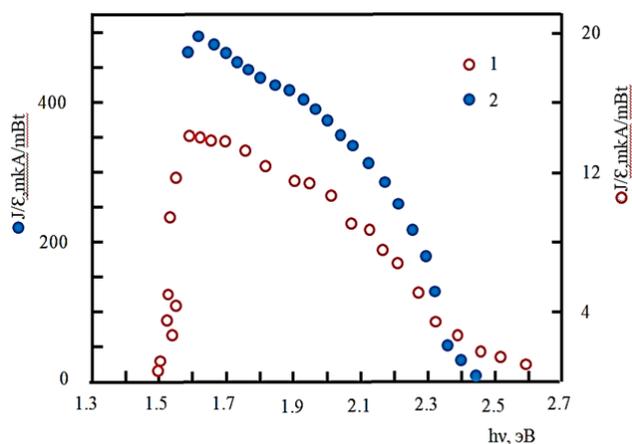
Fotosezgirlikning spektral bog'liqligi va yig'ish koeffitsiyenti $E_{g_2} \geq hv \geq E_{g_1}$ foton energiya mintaqasida o'rganildi, bu erda E_{g_1} va E_{g_2} mos ravishda tor va keng zonali yarimo'tkazgichning ta'qiqlangan zonolari. 14 va 15-rasmlardan ko'rinib turibdiki, strukturalarning fotosezgirliги keng oraliqli yarimo'tkazgichning ($hv < E_{g_2}$) ichki yutilish zonasi orqasida paydo bo'ladi va maksimal darajaga etadi bunda, $hv = 1,5 eV$ ($pCdTe - nCdS$) va $hv = 1,45 eV$ ($pCdTe - nCdSe$).

Shuni ta'kidlash kerakki, pCdTe-nCdS strukturasiining fotosezgirligining qisqa to'liqinli qirrası foton energiyasi $hv \leq 2,3eV$ ($E_{gCdS} = 2,4 eV$) da keskin o'sa boshlaydi va pCdTenCdSe tuzilishi uchun foton energiyasida ($E_{gCdSe} = 1,74 eV$) fotosezgirlik $\sim 100 mkA/mBt$ ni tashkil qiladi. Keng zonali optik oynaning rolini aniqlash uchun quyidagi tajriba o'tkazildi. Strukturaning fotosezgirligining spektral taqsimotini o'lchagandan so'ng, kadmiy telluridning n-tipini chiqarish uchun keng zonali CdS

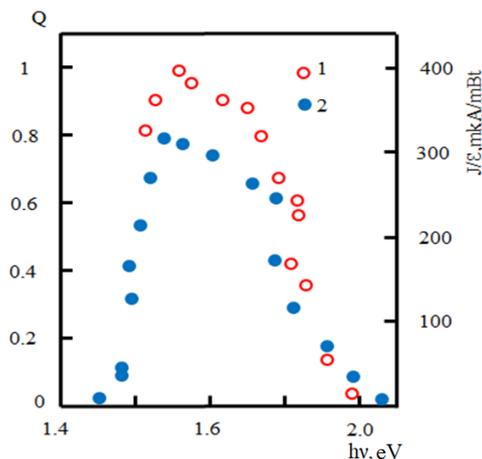


13-rasm. Turli haroratlarda pCdTe-nCdS va pCdTe-nCdSe geterostrukturasiining sirt morfologiyasi (a, b $\times 20000$): a) – 100°C , b) – 200°C

qatlami HCl ichiga kiritiladi. Keyinchalik yupqa indiy kontaktlari n-CdTe yuzasiga yuritiladi.



14-rasm. pSdTe-nCdS (2) va pCdTe-nCdSe (1) plyonkali geterostrukturasiining fotosezgirlikning spektral bog'liqligi



15-rasm. pCdTe-nCdSe plyonkali geterostrukturasiining fotosezgirlik (1) va yig'ish koeffitsiyentining spektral bog'liqligi (2)

Shundan so'ng o'tkazilgan o'lchovlar shuni ko'rsatadiki, pCdTe-nCdTe o'tishning sezgirlik keng zonali optik oynaga qaraganda ancha past (14-rasm, 1-egri chiziqqa qarang). Biroq, unda fotosensitivlikning qisqa to'liqlik qismi foton energiyasi $h\nu \approx 2,6 \text{ eV}$ gacha uzayadi. Ushbu eksperimental natijalar shuni ko'rsatadiki, keng zonali optik oyna sirt rekombinatsiyasi tezligini sezilarli darajada kamaytiradi.

Strukturani yig'ish koeffitsiyenti quyidagi ifoda yordamida hisoblanadi:

$$Q = \frac{j_{kz}}{qN(1-\eta)(1-e^{-\alpha d})\beta}, \quad (6)$$

j_{kz} - qisqa tutashuv tokining zichligi, q - elektron zaryad, N - maydon birligiga tushadigan kvantlar soni, η - strukturalar yuzasidan aks ettirish koeffitsiyenti, α - tor zonali materialning yutilish koeffitsiyenti, β - ichki fotoeffektning kvant chiqishi.

Fotoo'zgartirgich yuzasidan aks ettirish koeffitsiyenti IKS-14 spektrometri yordamida 0,45+0,75 mkm to'liqlik uzunligi mintaqasida, $\lambda \approx 0,75 \text{ mkm}$ mintaqada esa ED 0,5-M monoxromatori yordamida aks ettirish koeffitsiyenti o'lchandi.

pCdTe - nCdS va pCdTe - nCdSe strukturalarida, yuqori keng optik oynaga ega p-n o'tish modeli amalga oshirilganda, Q bog'liqligi odatda S-O sharti ostida bir hil o'tishlar uchun ishlatiladigan tenglamalar bilan yaxshi tavsiflanadi (bu erda S - sirt rekombinatsiy tezligi).

Shuning uchun, o'rganilayotgan tuzilmalarda yupqa nCdTe (d-O) qatlami mavjud bo'lganda, qurilmaning umumiy fototoki I_f ikki fototokning yig'indisi sifatida ifodalanadigan tenglamadan foydalanish maqsadga muvofiqdir: I_{f1} - birlashgan nCdTe qatlamida tashuvchilarning paydo bo'lishi natijasidagi fototok; I_{f2} - bazada hosil bo'lgan tashuvchilarning kamayish qatlamining chetiga tarqalishi bilan bog'liq fototok:

$$I_f = I_{f1} + I_{f2} = qN \exp(-\alpha_2 d) \left[1 - \frac{\exp(-\alpha_1 W)}{\exp(\alpha_2 L_n)} \right], \quad (7)$$

bu yerda W - birlashgan zaryad qalinligi,
 d - keng zonali qatlam qalinligi

L_n - pCdTe da elektron diffuziya uzunligi

Kadmiy sulfid va tellurid ($W=5 \cdot 10^{-5}$ sm, $d=5$ mkm qiymatida), kadmiy selenid va telluridning ($W=6 \cdot 10^{-5}$ sm, $d=5$ mkm qiymatida) ichki yutilish zonalari orasidagi (7) tenglama bo'yicha hisoblangan yig'ish koeffitsiyenti birlikka teng qiymatga ega (16-rasm, 5-egri chiziqqa qarang).

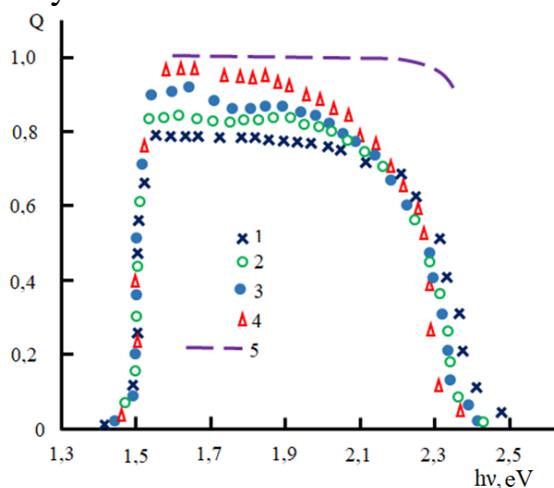
16-rasmda (1 va 4 egri chiziqlar) pCdTe-nCdS va pCdTe-nCdSe strukturalari uchun $Q(\lambda)$ ning eksperimental bog'liqliklari ko'rsatilgan, shundan kelib chiqadiki, ikkala strukturada Q bog'liqligi p-n o'tishlari bo'lgan bir jinsli fotoelementlarga xos keskin maksimalga ega emas

16-rasmdan (1 va 4-egri chiziqdan) ko'rinib turibdiki, pCdTe-nCdS va pCdTe-nCdSe fotokonvertorlari uchun $E_{g2} \geq h\nu \geq E_{g1}$ foton energiya hududida Q qiymati mos ravishda $0,8+0,9$ va $0,75+0,85$ ga teng. Keng bo'shliqli qatlamning qalinligi oshishi bilan Q qiymati ortadi. Biroq, qisqa to'lqinli mintaqada uning qiymati biroz kamayadi.

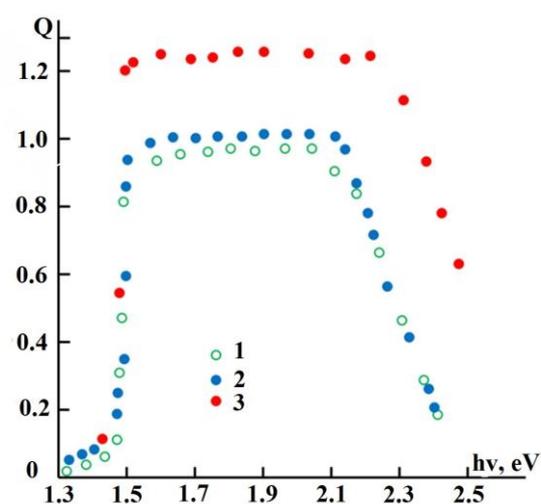
Spektrning qisqa to'lqinli mintaqasidagi Q_{xis} va Q_{taj} o'rtasidagi farq hodisa fotonlarining bir qismi keng bo'shliqli yarimo'tkazgichda yutilishi bilan izohlanadi. Shuning uchun Q ning eksperimental qiymati d - O, S - O shartida hisoblanganidan kichikdir.

Yetarlicha uzun to'lqin uzunliklarida o'rganilayotgan strukturalarda yorug'likning yutilishi kadmiy telluridning p-hududida sodir bo'ladi. Q bog'liqligining (6) uzun to'lqinli qirrasiga ($\lambda \approx 0,81$) ifodasiga ko'ra, ozchilik tashuvchilarning diffuziya uzunligi (L_n) $3 \cdot 10^{-3}$ sm ga teng ekanligi aniqlanadi.

Fotodiod rejimida ikkala tuzilma uchun Q qiymati qo'llaniladigan kuchlanish ortishi bilan ortadi va $V=0,4$ V da $E_{g2} > h\nu \geq E_{g1}$ (17-rasm rSdTe-nCdS uchun) foton energiya hududida birlikdan kattaroq qiymatga etadi. Demak, polikristalli kadmiy tellurida ideal bo'lmagan p-n birikmasi hosil bo'ladi deb taxmin qilish kerak. Ma'lumki, ideal bo'lmagan p-n o'tish joyida asosiy bo'lmagan tashuvchilarning oqimi kuchayadi.



16-rasm. CdSe qatlamining turli qalinligida p CdTe-n CdSe plyonka geterostrukturasi- ning yig'ish koeffitsiyentining spektral bog'liqligi: 1-1; 2-2; 3-3; 4-5 mkm. 5-hisobiy



17-rasm. Turli kuchlanishlarda fotodiod rejimida pCdT-nCdS plyonka geterostrukturasi- ning yig'ish koeffitsiyentining spektral bog'liqligi: 1-0; 2-0,4; 3-0,8 V

Faraz qilaylik, elektronlar to'plami bazaning diffuziya hududida yorug'lik orqali hosil bo'ladi. Elektronlarning xajmiy zaryadini qoplash uchun teshiklar nafaqat orqa kontaktdan, balki p-n o'tish joyining shunt zonalaridan ham paydo bo'ladi. Shunday qilib, ideal bo'lmagan p-n-o'tishida teskari tokga yorug'lik qo'shilishi idealdan kattaroqdir. Shu qatorda yig'ish koeffitsiyenti birdan oshishi mumkin.

Tayyorlangan geterostrukturalarning stabilligini aniqlash uchun haroratning spektral xarakteristikaga ta'siri tadqiq qilindi. Haroratning oshishi bilan geterostrukturalarning maksimal fotosezuvchanligi yorug'likning uzoqroq to'lqin uzunliklariga siljishi aniqlandi. Spekrning qisqa to'lqinli mintaqasida harorat bilan fotosezuvchanligining o'zgarishi ahamiyatsiz topildi.

Maksimal fotosezuvchanligining harorat bilan o'zgarishini kadmiy telluridning ta'qiqlangan zona kengligini o'zgarishi bilan izohlash mumkin.

Spekrning uzun to'lqinli mintaqasida fotosezuvchanligining keskin pasayishi mavjudligi kadmiy tellurid diapazonining harorat koeffitsiyentini ($dE_{g1}/\alpha T$) aniqlash imkonini beradi. Spekrning uzun to'lqinli mintaqasida fotosezuvchanligining pasayishi haroratning siljishidan aniqlangan $dE_{g1}/\alpha T$, qiymati $\alpha - 4 \cdot 10^{-4}$ eV/grad ni tashkil qiladi, bu boshqa usullar bilan aniqlangan ma'lumotlarga qoniqarli mos keladi. Spekrning uzun to'lqinli mintaqasida haroratning pasayishi bilan fotosezuvchanligining pasayishi va haroratning pasayishi bilan kam energiyaga ega fotonlarning kadmiy telluridga chuqurroq kirib borishi bilan bog'liq. Bu elektron teshik juftlarini hosil qilish va ajralish chegaralari o'rtasida qisman nomuvofiqlikka olib keladi.

Haroratning oshishi bilan p-n o'tish joyi yaqinida yutilgan fotonlar soni ortadi va yutilish chuqurligi ($K = \frac{1}{\alpha}$) ozchilik tashuvchilarning diffuziya uzunligi bilan taqqoslanadigan bo'ladi, natijada elektron-teshik juftlarining to'liq ajralishi sodir bo'ladi, bu esa spekrning uzun to'lqinli qismida fotosezuvchanligining oshishiga olib keladi. Uzun to'lqinli nurlanish uchun fotosezuvchanligining haroratga keskin bog'liqligi kuzatiladi. Turli to'lqin uzunliklarida fotosezuvchanligining haroratga bog'liqligidagi bu farq, shuningdek, yorug'likni yutish chuqurligi va kadmiy telluridagi ozchilik tashuvchilarning diffuziya uzunligining o'zgarishi bilan izohlanadi.

pCdTe - nCdS va pCdTe - nCdSe plyonka strukturalarni spektral xususiyatlarining xarakterli jihati spekrning qisqa to'lqinli mintaqasida fotosezuvchanlikning yuqori stabilligidir.

Shunday qilib, hosil bo'lgan plyonkali geterostruktura 0,4-2,5 eV fotosezgirlik diapazoniga ega va pCdTe - nCdS va pCdTe - nCdSe plyonkali heterostrukturasining spektral xususiyatlarining xarakterli jihati spekrning qisqa to'lqinli mintaqasida fotosezgirlikning yuqori stabilligi hisoblanadi.

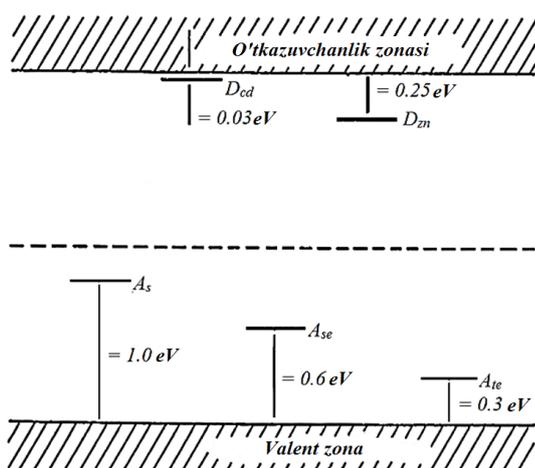
Keng zonali optik oyna sirt rekombinatsiya tezligini sezilarli darajada kamaytirishi va plyonka geterostrukturasining yig'ish koeffitsiyentining oshishiga olib kelishi eksperimental ravishda ko'rsatilgan.

Yaratilgan geterostruktura issiqlikka chidamliligi bilan ajralib turadi, haroratning oshishi bilan spekrning uzun to'lqinli mintaqasida CdTe ning chuqur aralashma sathi mavjudligi sababli fotosezuvchanlik kuchayadi.

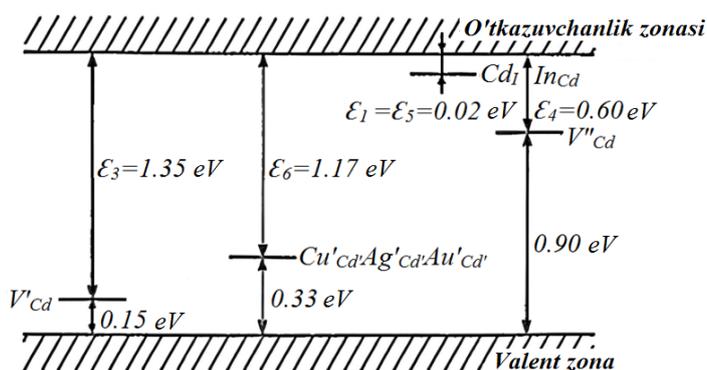
Yarimo'otkazgichning yutilish spektri energiya yo'lagiga teng bo'lgan foton energiyalarida yutilish koeffitsiyentining juda tez o'zgarishi bilan tavsiflanadi. Kristal energiya yo'lagidan yuqori energiyaga ega bo'lgan fotonlarni kuchli yutadi va yutilish koeffitsiyenti 10^5 sm^{-1} dan ortiq; u past energiya fotonlari uchun deyarli shaffofdir; odatda yutilish koeffitsiyenti 5 sm^{-1} dan kam bo'lsa va foton energiyasi ta'qiqlangan zona kengligidan $0,1-0,2\text{eV}$ ga kamroq bo'lsa xona haroratida katta farqlarda tez kamayadi.

Muhim nuqsonlar tarkibiy qismlarning vakansiyalari va oraliqlardir. CdTe va CdSe-da Te yoki Se vakansiyalari va Cd oraliq joylari donor darajasini band bo'shlig'iga kiritadi, Te yoki Se oraliqlari va Cd vakansiyalari esa qabul qiluvchi darajalarni yaratadi. 19-rasmda umuman A^2B^6 birikmalarida bunday nuqsonlarning ionizatsion energiyalari ko'rsatilgan.

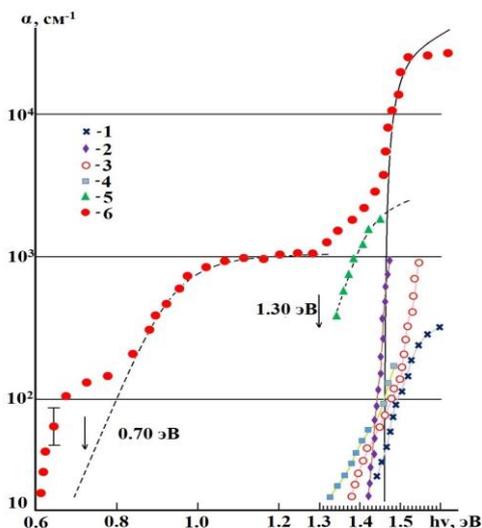
18, 19-rasmlarda CdTe ning energetik zonasi sxemasi ko'rsatilgan.



18-rasm. A^2B^6 birikmalarida xarakterli donor va akseptor energiya darajalarining qisqacha izohi



19-rasm. Xona haroratida turli markazlarning termal ionizatsiyalanish energiyalarini beruvchi CdTe da energiya diapazonlarining elektron sxemasi



20-rasm. Biz va turli kuzatuvchilar tomonidan olingan foton energiyasiga qarab xona haroratida CdTe ning yutilish koeffitsiyenti (YK) : 1- Dohyoung Kvon (2012); 2- Drew E. Swanson (2016); 3- K. Drozdov (2015 yil); 4- Hamid Fardi (2013), 5 va 6- bizning YK natijalarimiz Janubiy Federal Universitetida tajribalar o'tkazdi, Rostov-Don, Rossiya (2023)

Umumiy nuqsonlar va ayniqsa nuqta nuqsonlari A^2B^6 ulanishlarining elektr xususiyatlarini aniqlaydigan juda muhim omildir (2-jadval).

2- jadval

Tarkib	CdTe	CdSe
Effektiv massa elektron m_e^*	0.096 ± 0.005 m	0.13 m
teshik m_h^*	0.35 ± 0.05 m	1 m, 0,45 m
Mobillik elektron	$700 \text{ sm}^2\text{V}^{-1}\text{sek}^{-1}$	$650 \text{ sm}^2\text{V}^{-1}\text{sek}^{-1}$
teshik	$65 \text{ sm}^2\text{V}^{-1} \text{ sek}^{-1}$	$20-50 \text{ sm}^2\text{V}^{-1} \text{ sek}^{-1}$
Ta'qiqlangan zona kengligi 300°K	1.5 eV, 0.824 micron	1.74 eV, 0.71 micron
dEg/dT	$(2,3-5,4) \cdot 10^{-4} \text{ eV}/^\circ\text{K}$	$4,6 \cdot 10^{-4} \text{ eV}/^\circ\text{K}$
Statik dielektrik kiruvchanlik	11	9,33, 10,2
Yuqori chastotali dielektrik kiruvchanlik	7,21	6,05, 5,96
Elektronga yaqinligi	4,28 eV	4,95
Doimiy panjara	6,481 Å	6.077 Å (kub)

Ko'rinib turibdiki, bu plyonkalarining yorug'lik yutilish spektrlari mintaqasida (1,46-1,5) eV nurining yutilishida aniq ifodalangan aralashmali chiziq mavjud bo'lib, u monokristallar uchun ma'lumotlarga deyarli to'g'ri keladi (uzun to'lqinli siljish mavjud va u taxminan 0,02 eV) va o'zining yutilish chizig'iga to'g'ri keladi. Uzun to'lqinli siljish o'zgarishini plyonkadagi ichki mexanik kuchlanish bilan izohlash mumkin $\text{CdTe} \approx 2,7 \cdot 10^8 \text{ eV}$, agar barik koeffitsiyenti uchun ta'qiqlangan zona kenglikni o'lchash foydalansak $\frac{dE}{dP} = 7,9 \cdot 10^{-6} \frac{\text{eV} \cdot \text{sm}^2}{\text{kg}}$ qiymatida bo'ladi. Keyin qizil chegarasi taxminan 1,3 eV bo'lgan yana bir aniq amal mavjud va boshqasi ishonchli tarzda echilishi mumkin emas, bunda yutilish koeffitsiyenti 0,7-1,3 eV mintaqasida taxminan 10^3 dan 10^2 sm^{-1} gacha kamayadi. Bu ikkala chegara ham chuqur markazlar tomonidan yorug'likni yutilishi bilan bog'liq.

Shuni ta'kidlash kerakki, biz o'rgangan geterostrukturalarda, yutilish chetiga yaqin joylashgan aralashmali hududida yutilish juda katta $\approx 10^4 \text{ sm}^{-1}$ ni tashkil qiladi, chunki ichki yutilishda u tashuvchilarning fazoviy bir hil bo'lmagan qo'zg'alishini aniqlaydi.

Yutish spektrlari bo'yicha chuqur aralashma darajalari va faollashuv energiyalari aniqlandi, ular $E_c - 0,70 \text{ eV}$ va $E_c - 1,30 \text{ eV}$ ga teng. Bu chuqur aralashmalar navbati bilan kadmiy, kumush va mis vakansiyalari bilan bog'liq.

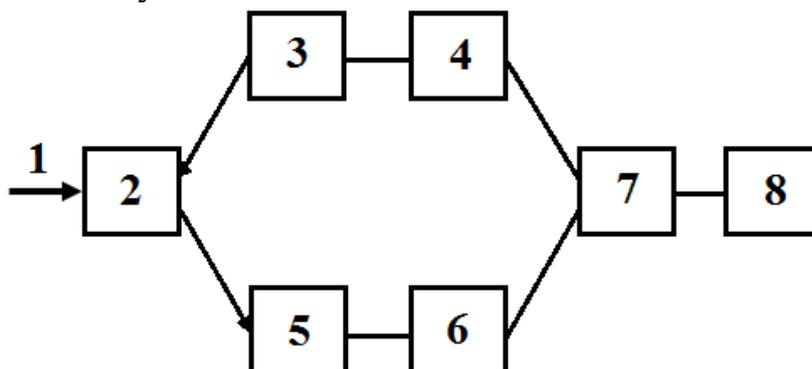
Chuqur aralashma sathli pCdTe–nCdS va pCdTe–nCdSe geterostrukturalari asosida yaratilgan fotoelementlarni amaliy qo'llash masalalari ko'rilgan bo'lib Arduino platformasi asosidagi avtomatik boshqaruv tizimi yordamida havo ifloslanishini aniqlash uchun pCdTe–nCdS va pCdTe–nCdSe asosidagi yangi geterostrukturali fotoqabulqilgichli avtonom optik datchiklar va havo oqimini

tortuvchi vintelyatsiyaga mo'ljallangan datchik uchun fotoelektr modullarga bag'ishlangan.

Ixtironing mohiyati shundan iboratki, havodagi ifloslanishni aniqlash uchun optik datchikda pastki va yuqori yuzalarining markazida aylana teshiklari mavjud. Ifloslangan havo zarralari o'tadigan datchikning ichida infraqizil (IQ) svetadiod mavjud bo'lib, u linzalar orqali nur chiqarganda, ifloslangan havo zarralari yuzasiga tushadi o'tib ketgan nurlar esa, uning qarama-qarshi devorida joylashgan ko'zgu oynada aks etadi. Shunday qilib, IQ svetadiod tomonidan chiqarilgan nurlar maksimal darajada ifloslangan havo zarralariga tegdi so'ng, ifloslangan havo zarralari tomonidan aks ettirilgan nurlar linzali pCdTe - nCdS va pCdTe - nCdSe geterostrukturasi asosidagi fotoqabulqilgichga tushadi.

Havoning ifloslanishini aniqlash uchun p CdTe – n CdS va p CdTe – n CdSe asosidagi yangi geterostrukturali fotoqabulqilgichli datchikni ishlab chiqarish usuli quyidagicha: yarimo'tkazgich datchigining korpusi uchun plastik materialdan va elektromagnit maydonlardan himoya qilish uchun metall qopqoqdan foydalanilgan. Korpus ichida yarimo'tkazgichli elementlar, IQ svetadiodni boshqarish uchun blokli sxema, kuchaytirgich sxemasi va IQ nurlari oqimini aks ettiruvchi ko'gu oynachasi mavjud. Optik datchik katta bo'lmagan o'lchamga ega bo'lib, og'irligi 17 gramm, uning prototiplardan farqi og'irligi, aks ettiruvchi ko'zgu oynacha va yangi geteroo'tishli fotoqabulqilgich kabi yangi qismlardan foydalangan holda o'zgargan va har qanday joylashishi qiyin joylarga ham o'rnatish mumkin.

21-rasmda havo ifloslanishini aniqlash uchun yangi geterostrukturaga ega fotoqabulqilgichli datchikning blok sxemasi ko'rsatilgan, bu datchikning sxemasida qaysi bloklar muhim rol o'ynashini tushunish osonlashadi.



21-rasm. Yangi geterostrukturaga ega fotoqabulqilgichli datchikning blok sxemasi: 1- ifloslangan havo manbai, 2-ish kamerasi, 3-IQ svetadiod, 4- svetadiod kontrolleri, asosidagi 5- pCdTe–nCdS va pCdTe–nCdSe geterostrukturu asosidagi fotoqabulqilgich, 6-operatsion signal kuchaytirgichi, 7-Arduino platformasidagi mikrokontroller, 8-monitor yoki kompyuter

Havoning ifloslanishini aniqlash uchun yangi geterostrukturaga ega fotoqabulqilgichli yarimo'tkazgichli datchik sxemasining ishlash printsipi 22-rasmda ko'rsatilgan.

Ma'lumki, quyosh nurida ko'rinadigan, infraqizil va ultrabinafsha nurlar mavjud. Bizning plynkali geterostrukturalarimizda zaryad tashuvchilar nafaqat o'zining hududidadan, balki spektrning aralashma hududida ham hosil bo'ladi, chunki CdTe plynkalarining ta'qiqlangan zinasida joylashgan chuqur aralashma sathlarga ega.

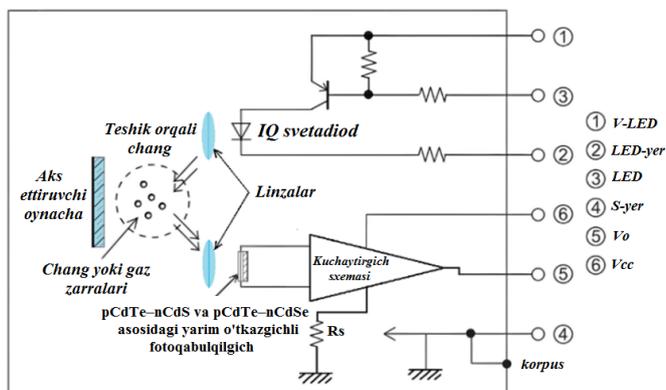
Fotoo'tkazuvchanlik zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasiga va yorug'lik intensivligiga to'g'ridan-to'g'ri proporsional bo'lgani uchun taniqli formulaga muvofiq

$$\sigma = en\mu\beta I \quad (8)$$

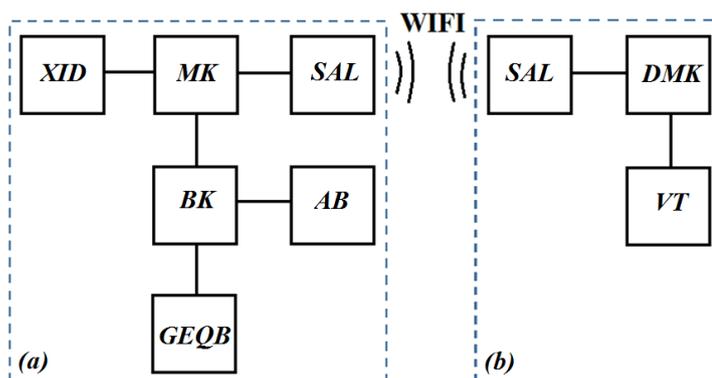
bo'lib bu yerda, e -elektron zaryadi, n -zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi, μ -zaryad tashuvchilar harakatchanligi, β -kvant chiqish, I -yorug'lik intensivligi.

Tok va signal kuchining ortishi zaryad tashuvchilarning nafaqat o'z hududidan, balki kadmiy tellurid geterostrukturani tayyorlash paytida kiritilgan chuqur aralashmalar sathidan aralashmani yutish mintaqasidan ham qo'zg'atilishi tufayli ortadi.

Yangi turdagi havo ifloslanishini aniqlash tizimida geterostruktura modulidan foydalanganda, Arduino uno platformasini ta'minlaydigan batareya kuchlanishini hisobga olish kerak. Arduino uno platformasi tizimning boshqa komponentlarini, masalan, geterostrukturali fotodatchikli sensorlar va simsiz ulanish uchun WIFI bloki bilan ta'minlaydi. Tizim amaliy ko'rinishi uchun Arduino platformasida WIFI orqali avtomatik boshqaruv tizimiga, ya'ni dasturlashtiriladigan mantiqiy kontrollerga (DMK) ulangan geterostrukturali quyosh moduli yordamida havo ifloslanishini aniqlash uchun sensorning blok sxemasi yaratilgan.



22-rasm. Havoning ifloslanishini aniqlash uchun pCdTe-nCdS va pCdTe-nCdSe asosidagi yangi geterostrukturaga ega fotoqabulqilgichli datchikning ish maydoni va elektr sxemasi



23-rasm. WIFI orqali DMK avtomatik boshqaruv tizimiga (b) ulangan geterostrukturali quyosh moduli yordamida Arduino platformasida havo ifloslanishini aniqlovchi datchikning blok sxemasi (a)

23-rasmda umumiy shamollatish tizimini tashkil etuvchi ikkita blok ko'rsatilgan, bu erda (a) blokda chuqur aralashma sathga ega pCdTe - nCdS va pCdTe - nCdSe yangi geterostrukturali fotodetektorli havo ifloslanishi sensori (XID) mavjud (4.5-bobga qarang). Sensor havodagi chang yoki gazning begona zarralarini aniqlagandan so'ng, Atmega mikrokontrolleri (MK) aniqlanadi, u Arduino uno platformasi asosida SAL WIFI simsiz tarmoq bloki orqali boshqa SAL joylashgan blokiga (b) ulangan

qurilmaga uzatadi. sanoat binolarining binolari va ustaxonalari shamollatish tizimining (ShT) dasturlashtiriladigan mantiqiy boshqaruvchisi (DMB).

Blok (a) shuningdek, qayta zaryadlanuvchi batareya (AB), geterostrukturali elementlarga ega quyosh batareyasi (GEQB) pCdTe - nCdS va pCdTe - nCdSe chuqur nopoklik darajasi va quyosh va qayta zaryadlanuvchi batareyalardagi oqimni boshqaradigan batareya boshqaruvchisini o'z ichiga oladi.

XULOSA

1. Birinchi marta p CdTe – n CdS va p CdTe – n CdSe geterostrukturali asosida chuqur aralashma sathiga ega quyosh energiyasi o'zgartirgichini ishlab chiqarish uchun optimal texnologiyalar ishlab chiqildi, bu esa joriy elektromagnit nurlanishda quvvatni 10^{-11} A dan 10^{-7} A gacha oshiradi.

2. pCdTe-nCdS strukturasi fotosezgirlikning qisqa to'liqlik chegarasining foton energiyasi $h\eta \leq 2.3$ eV da keskin o'sa boshlaganligi ko'rsatildi va p CdTe - n CdSe strukturasi uchun allaqachon foton energiyasida fotosezgirlik muhim $\sim 100 \frac{mkA}{mWt}$ qiymatga ega.

3. Birinchi marta CdTe ga aralashmalar qo'shganda, chuqur aralashmalar darajasi mavjudligi sababli fotosezgirlik kuchayadi, ularning faollashuv energiyalari $E_c - 1,15$ eV ga teng bo'lib, shu bilan birga sirt rekombinatsiyasining ta'siri sezilarli darajada kamayadi va fotosezgirlikning spektral taqsimoti 0,4 eV dan 0,9 eV gacha kengayadi.

4. Ag va Cu ning yuqori haroratli legirlash orqali kiritilishi CdTe ning aralashma fotoo'tkazuvchanligiga olib kelishi aniqlandi, bu fotosezgirlik spektrning IQ mintaqasiga yaqinroq qabul qilingan elektromagnit nurlanishdan 0,4-3,0 eV oralig'ida 2-3 baravar ortadi.

5. Yuza qarshiligi 100 Om·sm bo'lgan pCdTe–nCdS va pCdTe–nCdSe asosidagi fotoelektrik modul va yupqa qatlamli avtonom optik datchiklar tizimi ishlab chiqilgan va birinchi marta havodagi ifloslanishni aniqlash uchun Arduino asosida avtomatik boshqaruv tizimi orqali ventilyatsiya va ochiq havo uchastkalarda qo'llanildi.

6. O'nta geterostrukturali quyosh elementlaridan iborat geterostrukturali fotovoltaik modullar va ular asosida tizimlar ishlab chiqilgan bo'lib, ular isitish natijasida yuzaga keladigan kuchlanish tanqisligini qoplash imkonini beradi va tok va signalning quvvati $I \sim 10^{-7}$ A ga oshishini ta'minlaydi, bizga ma'lum optik datchiklar $I \sim 10^{-10}$ A ga ega.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04
ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ НАМАНГАНСКОМ
ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ**

ФЕРГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ЭРГАШЕВ РАВШАНБЕК НАЗИРОВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ, ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ И
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА
ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ p-CdTe-nCdS И pCdTe-nCdSe С
ГЛУБОКИМИ ПРИМЕСНЫМИ УРОВНЯМИ**

01.04.10 – Физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD)

- **ПО ФИЗИКО – МАТЕМАТИЧЕСКИМ НАУКАМ**

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за № В2023.1.PhD/Т3487.

Диссертация выполнена в Ферганском государственном университете.

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

Научный руководитель: Отажонов Салим Мадрахимович
доктор физико – математических наук, профессор

Официальные оппоненты: Икрамов Рустам Гуламжанович
доктор физико – математических наук, профессор

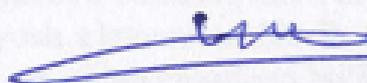
Каримов Иброхимжон Набиевич
доктор физико – математических наук, профессор

Ведущая организация: Каракалпакский государственный университет

Защита диссертации состоится « 03 » 05 2025 года в 10⁰⁰ часов на заседании Научного совета PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 при Наманганском инженерно – технологическом институте по адресу: 160115, г. Наманган, ул. Касансайская 7, Административное здание Наманганского инженерно – технологического института, 3-здания, 2-этаж, малый зал совещаний, Тел./факс: (99869) 225-10-07; (99869) 225-76-75, e-mail: niei_info@edu.uz.

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Наманганского инженерно – технологического института (зарегистрирована за № 378) по адресу: 160115, г. Наманган, ул. Касансайская -7, Тел./факс: (99869) 225-10-07; (99869) 225-76-75.

Автореферат диссертации разослан « 18 » 04 2025 г.
(протокол рассылки № 23 от « 18 » 04 2025 г.)



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

А.А. Абдукаримов
Ученый секретарь Научного
совета по присуждению ученых
степеней, PhD., доцент

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



ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации.

В мировой практике интенсивного развития интереса к возобновляемым источникам энергии по всему миру, возникает растущая потребность в доступных полупроводниковых материалах, которые широко распространены в природе, которые обладают высокой эффективностью. Поэтому в современном полупроводниковом материаловедении соединение A^2B^6 большое внимание уделяется исследованиям для создания новых полупроводниковых соединений с уникальными свойствами, пригодных для изготовления дешёвых и эффективных солнечных элементов. В связи с этим, перспективных направлений в этой области исследований, является создание фотопреобразователей на основе тонких плёнок на базе соединённых CdTe, CdS, CdSe.

В мире приоритетными считаются научные работы по использованию полупроводниковых материалов и повышению их эффективности в области альтернативных источников энергии и микроэлектроники, в частности, поиск оптимальной технологии получения гетероструктур на основе pCdTe-nCdS и nCdTe-pCdSe с глубокими уровнями, а также исследование электрофизических свойств гетероструктур pCdTe-nCdS и nCdTe-pCdSe солнечных элементов, легированных серебром и медью. В то же время изучение оптических и фотоэлектрических свойств гетероструктурных солнечных элементов pCdTe-nCdS и nCdTe-pCdSe путем легирования Ag и Cu и разработка новых типов оптических датчиков и фотоэлектрических модулей на основе этих элементов являются актуальными задачами.

В нашей республике проводятся масштабные мероприятия по созданию фотоэлектрических преобразователей на основе полупроводниковых соединений CdTe, значительному улучшению их качества, повышению эффективности, проведению научных исследований и внедрению их в практику. В Стратегии развития нового Узбекистана на 2022-2026 годы среди прочих обозначены следующие задачи: «Обеспечение экономики бесперебойным электроснабжением и активное внедрение технологий «зеленой экономики» во все отрасли, повышение энергоэффективности экономики на 20 процентов»¹. При реализации этих задач важным является изучение особенностей формирования глубоких центров с легированными соединениями в теллуриде кадмия, а также изучение влияния различных технологических факторов на формирование глубоких центров с целью увеличения их токовой и сигнальной мощности и повышения эффективности сбора солнечной энергии. Создание новых типов высокочувствительных, стабильных и термостойких полупроводниковых материалов имеет большое научное значение для развития микроэлектроники в этой области.

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

Настоящая диссертация основана на Указе Президента Республики Узбекистан № ПФ-6097 от 29 октября 2020 года «Об утверждении Концепции развития науки до 2030 года»², Указ Президента Республики Узбекистан № PQ-№ 5011 от 2 марта 2021 года «О дополнительных мерах по дальнейшему развитию электропромышленности и повышению конкурентоспособности местной продукции», Указ Президента Республики Узбекистан № ПФ-60 от 28 января 2022 года «О стратегии развития нового Узбекистана на 2022-2026 годы» и служит в определенной мере выполнению задач, указанных в других нормативно-правовых документах.

Соответствие исследования приоритетам развития науки и техники республики. Данное исследование проводится в соответствии с приоритетами развития науки и техники республики Ф2 «Физика, астрономия, энергетика и машиностроение» и АТД-3 «Энергетика, энергоресурсосбережение, транспорт, машиностроение и приборостроение, современная электроника», микроэлектроника, фотоника и электронное приборостроение».

Степень изученности проблемы. Исследование оптических, электрофизических и фотоэлектрических свойств солнечных элементов на основе гетероструктуры p-CdTe-nCdS и pCdTe-nCdSe с глубокими примесными уровнями проводятся в научных центрах, институтах и университетах ведущих стран мира таких как: Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе (Санкт-Петербург, Россия); Институт Фотоники и Нанотехнологий, Каунасский политехнический институт (Литва), Институт физики полупроводников (Киев, Украина), Институт электроники и прикладной физики (Гейтерсберг, Институт физики (США) ФГУП «НПП Исток» (Узбекистан), Институт физики микроструктур РАН (Россия), Центр изучения механизмов роста кристаллов и другие. Под руководством Академика АН Литвы Ю.Ю.Вайткусом были исследованы процессы совмещения безконтактных методов подготовки и измерений для комплексной фотоэлектрической характеристики тонких пленок гетероструктур теллурида кадмия (CdTe) путем регистрации спектров глубоких (глубоких и поверхностных) ловушек работающих последовательно в условиях фотоионизации и термоэмиссии. Даниел Жоселл США и др. идентифицировали дифференциальные бесстекольные гетероструктуры CdSe/CdTe. Центр изучения механизмов роста кристаллов (Франция), технологический институт Грузии, Американский институт физики (США) ведут непрерывные исследования по совершенствованию структуры. А.Раззокий и др. (Ирак) изучали влияние термообработки CdCl₂ на свойства фотогальванического гетероперехода CdTe/CdS, образованного термическим испарением. Ученые Жилинским университетом (Словакия) разработали солнечные элементы на основе поликристаллической гетероструктуры CdTe, полученной методом термического испарения. Пакистанские ученые под руководством Аббаса Шаха получены мелкозернистые поликристаллические солнечные элементы на основе

² Указ Президента Республики Узбекистан, от 29.10.2020 г. № УП-6097. «Об утверждении Концепции развития науки до 2030 года».

теллурида кадмия, а также немецкий фотоэлектрический техник Дитер Бонн изучали фотоэлектрические эффекты в поликристаллических структурах на основе теллурида кадмия.

Впервые за много лет в лаборатории физика технического института под руководством академика Р.А.Мунинова были созданы фотодатчики, фотоприемники на основе различных компонентов полупроводниковых соединений. В последующие годы профессор Ш.А.Мирсагатов и ныне профессор Т.М.Разыковым проведены масштабные научные работы, в основном по соединениям A^2B^6 , в самых разных областях, а фотоэлектрические устройства на их основе до сих пор находятся в стадии постоянных исследований, представляющих широкий спектр практического интереса. Изучение электрофизических и оптических свойств ПДП (полупроводник-диэлектрик-полупроводник) и гетероструктур, а также способов обеспечения их долговечности, ресурса с улучшенными эксплуатационными параметрами представляет, как научный, так и практический интерес. Теллурид кадмия широко используется в производстве светочувствительных фотоприемников и фотодетекторных структур, а также при создании гетероструктурных солнечных элементов. Однако потенциал производства фоточувствительных структур солнечные элементы с гетероструктурой на основе поликристаллических тонких слоев теллурида кадмия с участием глубоких примесных уровней, до конца не изучен из-за длительных технологических процессов, и есть проблемы с определением их стабильных электрофизических параметров. На основании выше изложенного можно считать диссертационные работы актуальными.

Связь диссертационной работы с тематическими планами НИР. Диссертационное исследование выполнено в рамках проектов научных исследований Ферганского государственного университета и Южного федерального университета, Ростов на Дону, Россия.

Целью исследования является комплексное изучение электрофизических, оптических и фотоэлектрических свойств солнечных элементов, на основе гетероструктурах $pCdTe-nCdS$ и $nCdTe-pCdSe$ с глубокими примесными уровнями и увеличить их мощность токов и сигналов.

Задачи исследования:

найти оптимальную технологию получения гетероструктуры на основе $pCdTe-nCdS$ и $nCdTe-pCdSe$ с глубокими примесными уровнями;

исследовать электрофизических свойств солнечных элементов гетероструктуры $pCdTe-nCdS$ и $nCdTe-pCdSe$ легированных серебром и медью;

изучить оптических и фотоэлектрических свойств солнечных элементов гетероструктуры $pCdTe-nCdS$ и $nCdTe-pCdSe$ с легирантами Ag и Cu;

исследовать особенности образования глубоких центров в теллурида кадмия легированными примесями и увеличить их мощности токов и сигналов;

изучить влияние различных технологических факторов на образовании глубоких центров при повышении эффективности собирания солнечных энергии;

разработать оптические датчики и фотоэлектрический модуль на основе гетероструктуры pCdTe-nCdS и nCdTe-pCdSe для определения загрязнения в воздухе автоматического управления с применениями платформы Arduino.

Объектом исследования полупроводниковыми материалами из CdTe, CdS, CdSe особый чистый, а также элементами первой группы серебро и медь.

Предметом исследования являются процессы создания гетероструктуры из соединения CdTe, CdS, CdSe с примесями первой группы элементов Ag и Cu.

Методы исследований. Для решения поставленных задач использовались вакуумная установка ВУП-4, методы постоянной фотопроводимости, методы Луковского, рентгеноструктурного анализа.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

впервые найдена оптимальная технология выращивания гетероструктурных солнечных элементов на основе pCdTe-nCdS и pCdTe-nCdSe с глубоким легирующим слоем методом высокотемпературного испарения в вакууме;

установлено, что коротковолновый край fotocувствительности pCdTe-nCdS гетероструктур начинает резко возрастать при энергии фотонов $h\nu \leq 2,3$ эВ, а у структуры pCdTe-nCdSe уже при энергии фотонов fotocувствительность имеет значительную величину ~ 100 мкА/мВт;

установлено, что с ростом температуры максимум fotocувствительности гетероструктуры смещается в длинноволновую область света, что обусловлено изменением ширины запрещенной зоны теллурида кадмия;

впервые выявлено наличие смешанной фотопроводимости CdTe в результате высокотемпературного диффузионного введения Ag и Cu, что привело к 2-3-кратному увеличению fotocувствительности в диапазоне длин волн света 0,4-3,0 эВ.

экспериментально показано, что широкозонное оптическое окно приводит к увеличению коэффициента сбора пленочной гетероструктуры за счет существенного снижения скорости поверхностной рекомбинации;

впервые показано, что с повышением температуры увеличивается fotocувствительности гетероструктуры в коротко и длинноволновой области спектра, из-за наличие глубоких примесных уровней с энергией активации $E_c - 1,15$ эВ;

разработаны оптические датчики и фотоэлектрический модуль для обнаружения загрязнения воздуха на основе гетероструктур pCdTe-nCdS и nCdTe-pCdSe, работающие в широком диапазоне света (0,4–3,0 эВ).

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

Легирование гетероструктуры pCdTe-nCdS и pCdTe-nCdSe примесями первой группы элементами Ag и Cu, увеличивается эффективность собирания fotocувствительности в 2-3 раза и является она термостойкая, имеется высокая стабильность fotocувствительности в коротко и длинноволновой области спектра.

Достоверность результатов исследований обосновывается и подтверждается применением методов постоянной фотопроводимости, метод

Луковского, статической обработкой экспериментальных данных и воспроизводимостью полученных результатов.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов исследования заключается в развитии улучшение фотопроводимости преобразователей солнечных элементов гетероструктуры с глубокими примесными уровнями и анализа спектров фоточувствительности в этих гетероструктурах.

Практическая значимость результатов исследования заключается в применении гетероструктуры $pCdTe-nCdS$ и $pCdTe-nCdSe$ с глубокими примесными уровнями, для разработки эффективных солнечных преобразователей в широких диапазонах длинноволновые области спектра поглощения и могут быть использованы при создании термостойких, стабильных полупроводниковых приборов на их основе.

Внедрение результатов исследования. На основе полученных научных результатов о электрофизических, оптических, фотоэлектрических свойствах и механизмах токопрохождения плёночных гетероструктур $pCdTe-nCdS$ и $pCdTe-nCdSe$ был разработан:

оптимальная технология получения солнечных элементов на основе $pCdTe-nCdS$ и $pCdTe-nCdSe$ в качестве преобразователя для солнечной энергии были использованы в фундаментальном проекте ОТ-Ф2-71 «Исследование влияния света на вольтамперные характеристики деформированного $p-n$ перехода в очень высокочастотном электромагнитном поле», реализованного 2017-2020 годах в рамках государственных научно-технических программ на кафедре физики Наманганского инженерно-строительного института (справка №:06/15 от 26 июня 2024 года Наманганского инженерно-строительного института). Использование научных результатов привело к стабилизации электрофизические параметры легированных образцов теллурида кадмия и позволило изготовить солнечных элементов которых соответствует показателям на уровне их аналогов;

показан, что термодиффузионное введение в теллурида кадмия Ag и Cu приводит к примесной фотопроводимости гетероструктуры $pCdTe-nCdS$ и $pCdTe-nCdSe$ которые увеличивает фоточувствительности 2-3 раза и стабилизации его параметров; наличие глубоких примесных центров первой группы элементов на поверхности барьеров в пленках $CdTe$ приводит резкое увеличение концентрации неосновных носителей заряда, которые находится в глубоких центрах и высвобождается при освоении в пределах 0,4-3,0 эВ и эти результаты использованы при выполнении в производстве полупроводниковых фотопреобразователей солнечной энергии в акционерном обществе «ФОТОН» и акционерной компанией «Узэлтехсаноат» (справка «Узэлтехсаноат» от 27 июня 2024 года №123). Использование полученных результатов позволило изготовить фотопреобразователей солнечной энергии и другие электронные устройств и улучшить их электрофизические и оптические параметры.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 12 конференциях, в

том числе на 8 международных и 4 республиканских научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов исследования. По материалам диссертации опубликовано 25 научных работ, из них 13 статей в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных работ и 2 свидетельства для программ ЭВМ, в материалах.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Объём диссертации составляет 118 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность и востребованность темы диссертации, показывается ее соответствие исследования приоритетам развития науки и техники республики, раскрывается степень изученности проблемы, цель и задачи, связь диссертационной работы с тематическими планами НИР. Описаны объект, предмет и метод исследования. Также описаны научная новизна и практические результаты исследования, представлена информация о внедрении результатов исследования, одобрении работы, опубликованных работах, размере и р диссертации.

Первая глава диссертации **«Основные данные по свойствам гетеропереходов CdTe/CdS и CdTe/CdSe»** посвящена литературному обзору известных типов однопереходных и гетеропереходных солнечных элементов (СЭ) из различных полупроводниковых материалов и теллурида кадмия сочетая с другими широкозонных материалов. Рассмотрено влияние температуры, структурно-оптические свойства, электрофизических, фотоэлектрических свойств CdTe/CdS и CdTe/CdSe в качестве фотопреобразователей данного типа. На основе анализа литературных данных определены цель и задачи диссертационной работы.

Вторая глава **«Технология и методика изготовления гетероструктур на основе pCdTe – nCdS и pCdTe – nCdSe с глубокими примесными уровнями»** посвящена научным и технологическим аспектам разработки гетероструктуры на основе pCdTe – nCdS и pCdTe – nCdSe с глубокими примесными уровнями в условиях жаркого климата и две методики для определения энергетических положений глубоких уровней, технологии получения с применением заводских особо чистых полупроводниковых материалов и легирующих материалов Ag и Cu.

Измерения временных характеристик фотоэлектродных устройств проводились путем возбуждения образцов с использованием коротких лазерных импульсов на основе неодимового стекла ($h\nu = 1.17$ эВ) либо его второй гармоники ($h\nu = 2.34$ эВ). Эталон подвергся нагрузке сопротивления типа R_H , а сигнал регистрировался с помощью осциллографа модели С8-13 (изображение 2.4), продолжительность лазерного импульса составляла примерно 50 наносекунд. Фотоэлектрод детектирует сигналы, имеющие ступенчатый

профиль - увеличение интенсивности в период активации импульса и последующее постепенное снижение. При работе в режиме фотопроводности сигнал копировал форму стимула, вызывающего реакцию, поэтому для определения продолжительности фотоответа применялся неодимовый лазер на основе алюминий-иттриевой граната с согласованными режимами, длительностью импульса 17 пикосекунд. В этом случае значительное влияние оказали паразитные ёмкости и несинхронность измерительной схемы. С помощью прибора С7-19 были зафиксированы графики снижения ФП одновременно с колебаниями канала. Определение характеристического времени уменьшения ФП основано на усреднении последних значений.

Измерения спектральных зависимостей фотопроводимости (ФП) и ($I_{кз}$)-силы короткого замыкания выполнялись с использованием методики постоянной фото-проводимости на приборе. Образец, размещенный внутри криостата, был освещен источником высокой температуры (глобаром) посредством монохроматора ИКС-14. Для снижения воздействия разбросанного света (при проведении замеров в инфракрасной области) применялись кремниевые и германиевые фильтры. Измерение сигнала осуществлялось с помощью электрометра модели ЭД-05М. При подсоединении его к сопротивлению, закрывающему образец, определялся ток короткого замыкания, а при введении в схему источника электрического потенциала измерялся комплексный сигнал, который зависит как от светового сопротивления, так и от фотоэлектродвижущей силы. При выполнении замеров с подключением источника на противоположные потенциалы обнаруживается, что различие между сигналами прямо пропорционально фотоэлектродвижущей силе, тогда как их совокупность соответствует фотопроводимости.

Третья глава **«Влияние внешних факторов на фотоэлектрические свойства гетеропереходов на основе рCdTe – nCdS и рCdTe – nCdSe с глубокими примесными уровнями»** посвящена влиянию внешних факторов на краю поглощения пленок CdTe, что необходимо для упрощения анализа спектров фотопроводимости с участиями глубоких примесных центров, а также систематизирована фотоэлектрические свойства слоев CdTe, а также эффективно влияние температуры, глубокие уровни и давление на фотоэлектрические свойства гетероструктур на основе рCdTe – nCdS и рCdTe – nCdSe. Рассмотрены и некоторые феноменологические модели этих слоев для преобразование солнечных излучение.

Гетеропереходы между р-CdTe и n-CdS, а также р-CdTe и n-CdSe были изготовлены путем нанесения слоев CdS и CdSe толщиной от 1 до 5 микрон на поверхности основных слоев р-CdTe в условиях высокого вакуума (при давлении порядка 10^{-5} мм.рт.ст.). Пленки кадмия-сульфида и кадмия-селенида образовывались при температурах в пределах 250 и 300 градусов Цельсия соответственно. Контакты для токосъемных устройств изготовлены методом напыления индия в условиях вакуума при давлении порядка 10^{-5} мм. рт. ст.

Для гетероструктуры в качестве легирующих примесей, были выбраны нами элементы первой группы Ag и Cu. Выбор этих материалов в качестве

примесей обусловлен тем, что оптимальная температура легирования Ag и Cu в CdTe, сравнительно низкая и лежит в интервале температур подложки 80÷300 °С, при котором лишь можно получить пленки из CdTe наибольшими фоточувствительностью и стабильными характеристиками. А также, они образуют глубокие уровни в запрещенной зоне CdTe, которые увеличивает концентрации носителей заряда, а также участвуют при образовании фото ЭДС.

В таблице 1 приведены значения экспериментальных параметров и коэффициента полезного действия (η) пленочных структур при мощности солнечного излучения $60 \frac{\text{мВт}}{\text{см}^2}$. При этом КПД вычислен по формуле:

$$\eta = \frac{J_n V_n}{Sp}, \quad (1)$$

где $J_n V_n$ – соответственно ток и напряжение при оптимальном значении сопротивления нагрузки;

S – общая площадь структур;

p – мощность светового потока.

Как видно в таблице 1 значение коэффициента заполнения (Q) структура р CdTe – n CdS и р CdTe – n CdSe соответственно равно 0,45 и 0,34. Довольно низкое значение коэффициента заполнения связано с большой величиной последовательного сопротивления. Значение η для структур р CdTe – n CdS и р CdTe – n CdSe при мощности солнечного излучения $60 \frac{\text{мВт}}{\text{см}^2}$ соответственно равно 5÷6 % и 3÷4 %.

Исследование зависимости $\ln I_{кз} = f(V_{xx})$ в режиме меняющейся освещенности при различных температурах показало, что прямая ветвь ВАХ структур р CdTe – n CdS подчиняется закономерности $I = I_0 \left(\frac{qV}{AkT-1} \right)$, где $A=1,5 \div 1,7$ и $I_0 = 10^{-9} \frac{\text{А}}{\text{см}^2}$.

У структур р CdTe – n CdSe зависимость $\ln I_{кз} = f(V_{xx})$ в условиях меняющейся описывается двумя экспоненциальными участками:

$$I = I_{01} \exp\left(\frac{qV}{A_1 kT}\right) + I_{02} \exp\left(\frac{qV}{A_2 kT}\right) \quad (2)$$

где $A_1 \approx 2$, $I_{01} \approx 10^{-4} \frac{\text{А}}{\text{см}^2}$, $A_2 \approx 15$, $I_{02} \approx 10^{-6} \frac{\text{А}}{\text{см}^2}$.

Таблица 1

Эксплуатационные параметры структур	р CdTe – n CdS	р CdTe – n CdSe
$I_0, \text{А/см}^2$	10^{-9}	10^{-8}
A	$1,7 \div 2$	$1,5 \div 1,7$
$I_{кз}, \frac{\text{мА}}{\text{см}^2}$	$13 \div 15$	$6 \div 7$
$V_{xx}, \text{мВ}$	$600 \div 700$	$350 \div 400$
θ	$0,4 \div 0,45$	$0,35 \div 0,4$
$\eta, \%$	$5 \div 6$	$3 \div 4$

Проведенные оценки предэкспоненциального множителя показывают, что в структуре p CdTe – n CdSe при малых уровнях освещенности ток ограничивается рекомбинацией в слое объемного заряда. А при высоких уровнях освещенности в структуре p CdTe – n CdS и p CdTe – n CdSe в ток начинают вносить свой вклад диффузионные токи неосновных неравновесных носителей.

Следует отметить, что термоциклирование улучшает на природу перехода структуры p CdTe – n CdS и тем самым улучшается вольт амперные характеристики. Это является одним из важнейших преимуществ структуры p CdTe – n CdS перед пленочными элементами на основе системы p Cu_{2-x}S – n CdS и p Cu_{2-x}Te – n CdTe.

Как видно на рис. 1, с увеличением температуры, протяжённость ловушечное квадратичного участка расширяется, а участок резкого роста тока укорачивается. Кроме того, значение тока при высоких температурах в квадратичном участке меньше, чем его значение при комнатной температуре, то есть при постоянном напряжении с увеличением температуры ток уменьшается³.

Обратные ветви ВАХ (рис. 2) гетероперехода p CdTe – n CdSe имеют три участка, характерные для токов, ограниченных пространственными зарядами. Первый участок – ловушечные квадратичные, второй участок – участок резкого роста тока, начинается при напряжении, необходимом для полного заполнения ловушек, затем следует квадратичный участок.

Такое поведение ВАХ явно свидетельствует о режиме токов, ограниченных пространственными зарядами.

Спектральная область чувствительности солнечного элемента со структурой CdTe – CdS ограничена значениями длины волны 0,4 и 0,90 мкм,

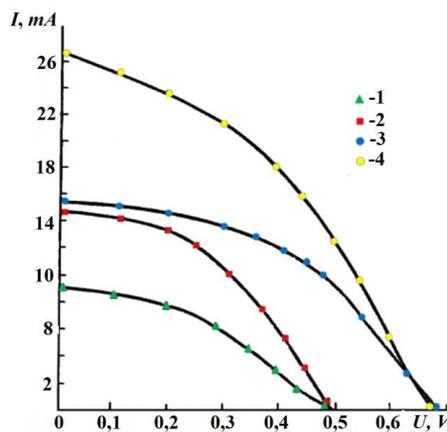


Рис. 1. Нагрузочная ВАХ пленочной структуры p CdTe – n CdS (3,4) и p CdTe – n CdSe (1,2) при освещении W – лампой накаливания (1,3) и источником внеатмосферного солнца (2,4) с мощностью 55 и 139 $\frac{мВт}{см^2}$

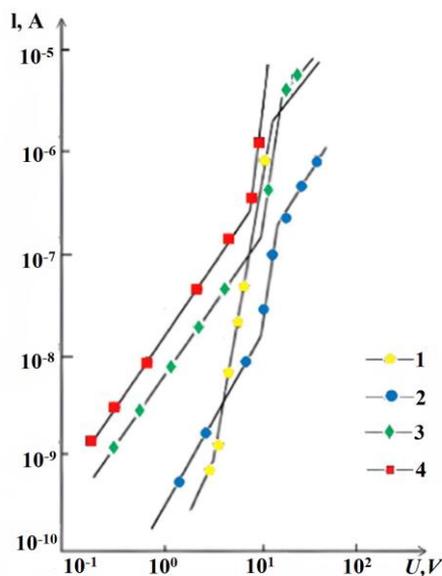


Рис. 2. Обратные ветви ВАХ гетероперехода p CdTe – n CdS при различных температурах, К: 1-302, 2-338, 3-358, 4-376

³ Рентгеноструктурные и фото- и оптические исследование проведено в Южном федеральном университете, Ростов на Дону, Россия

причем в диапазоне 0,58...0,81 мкм кривая чувствительности имеет плоскую форму (рис. 3). Спектральные положения коротковолновой и длинноволновой границ области чувствительности определяется значениями ширины – запрещенных зон, соответственно CdTe и CdS и не зависят от напряжения смещения, которое влияет на эффективность собирания носителей заряда. Еще одна особенность этих элементов состоит в том, что разделение носителей происходит не на границе раздела CdS и CdTe, а в глубине слоя CdTe, на расстоянии от его поверхности, равном нескольким микрометрам, что связано с образованием слоя в результате диффузии свободного атома кадмия в p-CdTe.

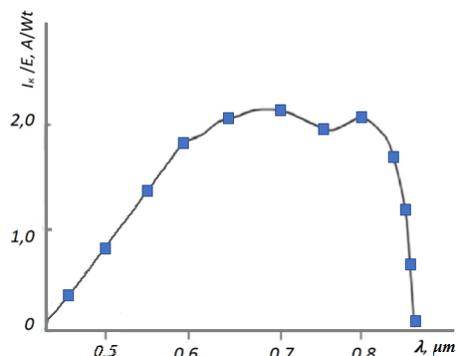


Рис. 3. Спектральное распределение фото-чувствительности структуры p CdTe – n CdSe

При введении легирующего агента Ag и Cu в пленке CdTe спектральная область чувствительности солнечного элемента на основе структуры CdTe – CdSe лежит в диапазоне 0,40...0,80 мкм (рис. 3). Это свидетельствует о том, что Ag и Cu образует в CdTe глубокие уровни энергии активации, которых равны $E_c=1,15$ эВ. Они будут участвовать при образовании фото – ЭДС. Однако коэффициент собирания носителя заряда в коротковолновой части спектра меньше чем в длинноволновой, что свидетельствует о малой диффузионной

длине носителей CdSe.

Таким образом, по полученным экспериментальным результатам можно судить, созданные гетероструктуры на основе p CdTe – n CdS и CdTe – n CdSe существенно снижает влияние поверхностной рекомбинации на фоточувствительности и расширяется спектральное распределение фоточувствительности от 0,4 мкм до 0,9 мкм. При введениях легирующего агента Ag и Cu образует в запрещенной зоне CdTe глубокие уровни, которые участвуют фото ЭДС, при этом фоточувствительность простирается в ближе ИК области.

Прямые ветви ВАХ гетероперехода p CdTe – n CdS при различных температурах в полулогарифмическом масштабе представлена на рис. 9. Полученных ВАХ невозможно объяснить на основе одной из моделей p-n-гетероперехода. Это связано с тем, что при получении CdS происходит внедрение свободного атома кадмия Cd вдоль прослоек приповерхностном слое зерен. Таким образом, в зернах CdTe проявляется мелкие p-n-гомопереходы и структура состоит из последовательно включенных изотипных n CdTe – n CdS гетеропереходов и p CdTe – n CdTe гомопереходов. При формировании n-слоя CdTe нельзя исключить и роль индия, который диффундируется из CdS, так как CdS легирован с индием.

При напряжении $V > 0,6$ В начинается второй участок, где β принимает возрастающее значение. Надо отметить, что второй участок ВАХ в двойной логарифмической координате дает прямую линию и аппроксимируется зависимостью $I \sim V^n$, где $n \approx \frac{3}{2}$.

Обратная ветвь ВАХ гетероперехода p CdTe – n CdS состоит из двух участков как показано на рис. 4. Начальный участок при комнатной температуре в интервале напряжений $0 < V < 0,2\text{В}$ обладает экспоненциальной закономерностью с диодным коэффициентом $\beta \approx 2$. При напряжении $V > 0,2\text{В}$ зависимость тока от напряжения носит степенной характер: $I \sim V^n$, где $n \approx 0,5$. С увеличениями температуры начальный экспоненциальный участок расширяется и при 378°К доходит до напряжения $0,5\text{В}$. При обратных напряжениях нарушение диффузионно-дрейфового равновесия обуславливает расширение области объемного заряда (003) p-n-перехода и ее объединение как электронами, так и дырками. В этом случае генерация дырок в 003 преобладает над рекомбинацией. Плотность тока, обусловленного генерацией в обедненной области, выражается формулой,

$$I = \frac{qn_i d}{\tau_p}, \quad (3)$$

где d – ширина объединенного слоя.

Как видно из формулы (3), при заданной температуре ток генерации пропорционален ширине объединённого слоя, которая, в свою очередь, зависит от приложенного обратного напряжения. Таким образом, соответствующий участок обратной ветви ВАХ описывается сублинейной зависимостью

$$I = \frac{qn_i}{\tau_p} \sqrt{\frac{2\varepsilon_n V}{q N_a}}. \quad (4)$$

Прямые ветви вольтамперные характеристики гетероперехода p CdTe – n CdSe при $302, 338, 358$ и 376°С представлены на рис. 9. В этих структурах зависимость прямого тока от напряжения также имеет экспоненциальный характер, определяемый формулой (4). Однако диодный коэффициент β зависит от температуры, то есть он увеличивается с ее ростом.

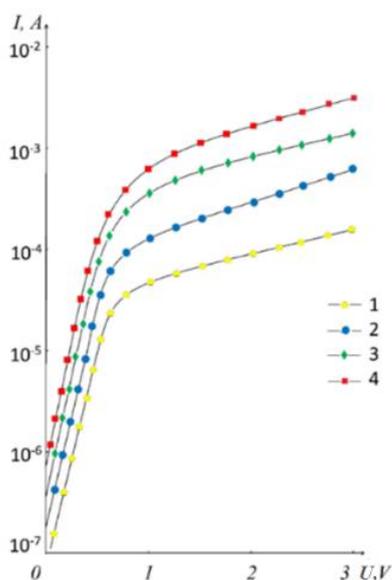


Рис. 4. Прямые ветви ВАХ гетероперехода p CdTe – n CdS при различных температурах, К: 1-302, 2-338, 3-358, 4-376

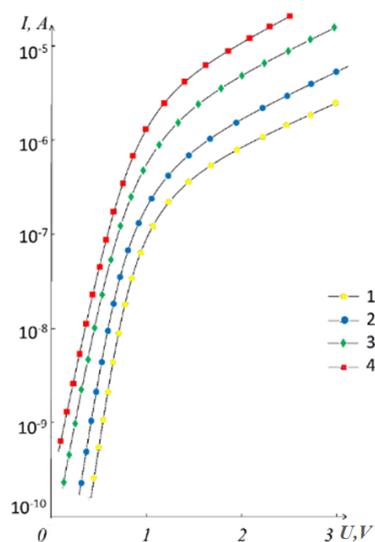


Рис. 5. Прямые ветви ВАХ гетероперехода p CdTe – n CdSe при различных температурах, К: 1-298, 2-325, 3-355, 4-376

Из первого квадратичного участка определялся фактор прилипания θ (θ – отношение свободного заряда к заряду, захваченному на ловушках). Оценка, проведенная по формуле

$$V_{\text{пзл}} = \frac{eN_t d^2}{2\varepsilon}, \quad (5)$$

дает для θ значение $\approx 10^{-9}$. Такое малое значение фактора прилипания свидетельствует о наличии большой концентрации ловушек в слое CdSe и границе раздела.

Концентрация ловушек N_t , вычисленная по направлению $V_{\text{пзл}}$, оказалось равной $N_t \approx 3,4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Зная θ и N_t , вычислили глубину залегания ловушек E_t , которая оказалось равной $\approx 0,5$ эВ (рис. 6).

Получены пленки CdTe толщиной 1 мкм, отожженные при различных температурах. Фотометрические измерения (пропускание, отражение и поглощение) пленок CdTe были проведены для характеристики материала в видимой области солнечного спектра для применения в солнечных элементах. Также была исследована картина порошковой рентгеновской дифракции отожженных пленок CdTe и на основе анализа PXRD рассчитаны некоторые структурные параметры. Это было сделано для оптимизации условий выращивания пленки хорошего качества, подходящей для оптоэлектронных устройств.

Процентные характеристики отражения пленок CdTe в зависимости от длины волны представлены на рисунке 7.

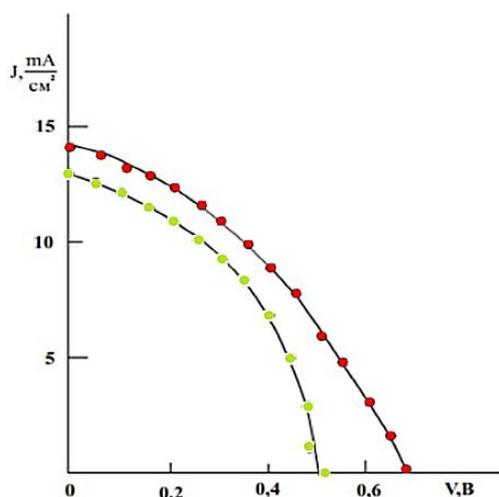


Рис. 6. Нагрузочная ВАХ пленочных солнечных элементов на основе гетероперехода $p\text{-CdTe} - n\text{-CdS}$ (1) и $p\text{-CdTe} - n\text{-CdSe}$ (2) при мощности солнечного излучения $60 \frac{\text{мВт}}{\text{см}^2}$

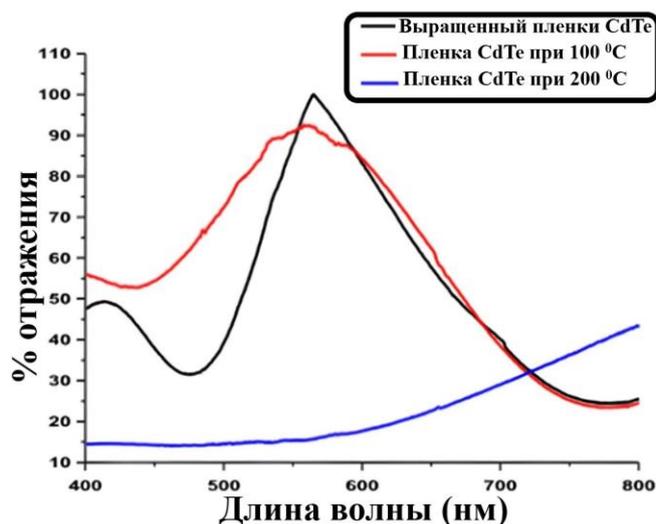


Рис. 7. Отражательная способность пленок CdTe толщиной 1 мкм, отожженных при разных температурах

Было обнаружено, что величина коэффициента отражения пленок CdTe периодически меняется в зависимости от длины волны. На кривых отражения возникают множественные колебания из-за интерференции нескольких отраженных волн. С увеличением длины волны период колебаний этих пленок

меняется. Таким образом, характеристики отражения пленок CdTe сильно зависят от длины волны электромагнитных спектров. Самое высокое пиковое значение процентного отражения, равное 99 %, наблюдалось при длине волны 566 нм для только что выращенной пленки CdTe. Пик максимального отражения 92 % наблюдался при длине волны 562 нм для пленки, отожженной при 100 градусах Цельсия, тогда как пик максимального отражения 43 % наблюдался для пленки CdTe, отожженной при 200 о С, при длине волны 800 нм. Спектры отражения демонстрируют интерференционную картину с отчетливыми пиками и впадинами.

Характеристики поглощения пленок CdTe, отожженных при разных температурах в зависимости от длины волны показаны на рисунке 8.

По спектрам поглощения наблюдалось, что поглощение уменьшалось с увеличением длины волны и составляло более 1,6, 1,2 и 0,8 Вт/м⁻¹ для пленок в свежеразработанном состоянии, отожженных при 100°С и 200°С соответственно. Обнаружено, что он выше для только что выращенной пленки в видимой области, что может быть связано с ее упорядоченной структурой, а также с поглощением свободных носителей заряда и указывает на полупроводниковую природу пленки CdTe.

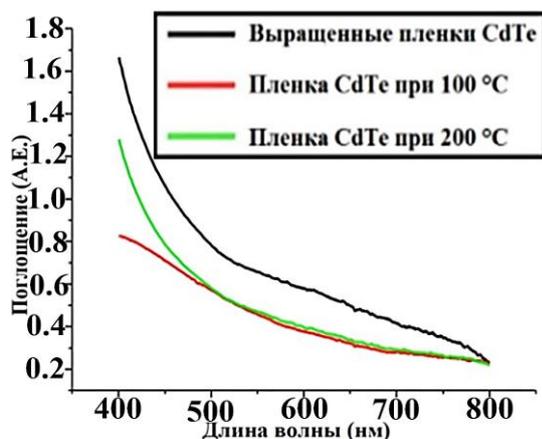


Рис. 8. Спектры поглощения пленок CdTe толщиной 1 мкм, отожженных при разных температурах

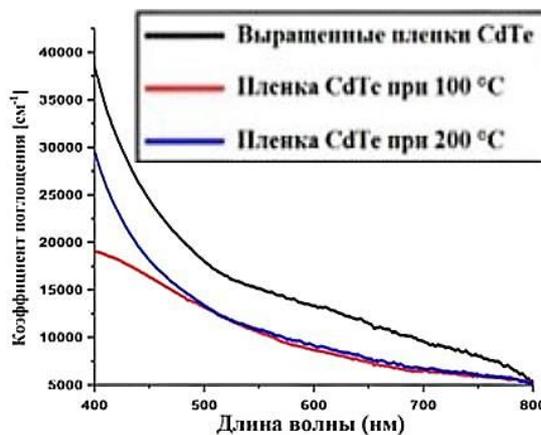


Рис. 9. Коэффициент поглощения пленок CdTe толщиной 1 мкм, отожженных при разных температурах

Из рисунка 9 видно, что коэффициент поглощения имеет более высокие значения в более коротковолновой области и уменьшается с увеличением длины волны в видимой области солнечного спектра. Значение также уменьшается с увеличением температуры отжига. Коэффициенты поглощения $3,9 \times 10^4$, $2,9 \times 10^4$ и $1,9 \times 10^4$ наблюдались при длине волны 400 нм для только что выращенных, отожженных при 100°С и 200°С пленок CdTe. Такие значения коэффициента поглощения ($>10^4$ см⁻¹) означают большую вероятность разрешенного прямого перехода.

Изменение коэффициента экстинкции пленок CdTe, отожженных при разных температурах, показано на рисунке 10 в зависимости от длины волны.

Коэффициент экстинкции (k) увеличивается с увеличением энергии фотонов и уменьшается с увеличением температуры отжига. Обнаружено, что коэффициент экстинкции выше для свежевыращенного CdTe, что можно объяснить преобладанием эффекта плотности в осажденной пленке. Полученные коэффициенты экстинкции составили 1,92, 1,5 и 0,98 для пленок CdTe, отожженных при 100°C и 200°C.

Запрещенная зона пленок CdTe, отожженных при разных температурах, визуализирована на рисунке 11.

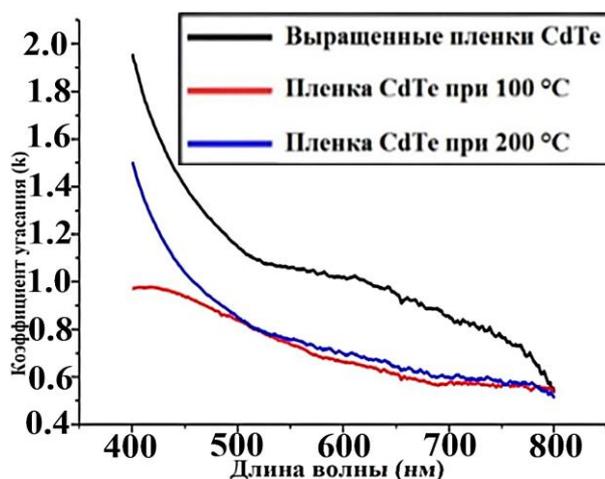


Рис. 10. Изменение коэффициента экстинкции пленок CdTe толщиной 1 мкм, отожженных при разных температурах

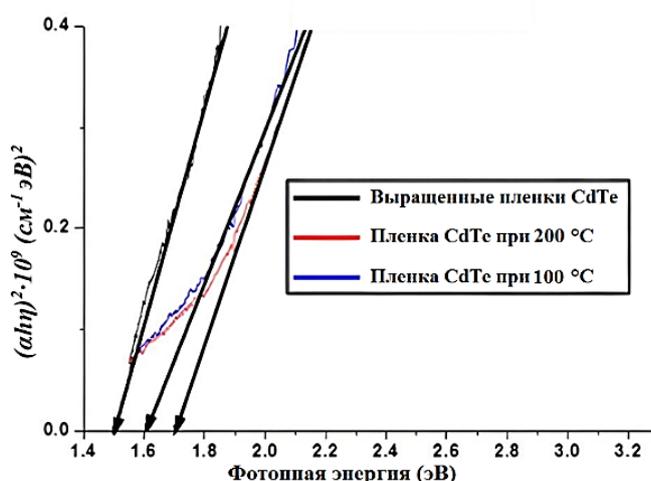


Рис. 11. Ширина запрещенной зоны пленок CdTe толщиной 1 мкм, отожженных при разных температурах

Энергии оптической запрещенной зоны оценивались путем экстраполяции прямой линии графика Тауца для нулевых коэффициентов поглощения ($\alpha = 0$). Приблизительно линейный характер графика наблюдается в сторону более низких длин волн и экспоненциальный характер в сторону более высоких длин волн, что указывает на наличие прямого оптического перехода. Экспоненциальное поведение графика можно объяснить локальными примесями материала. Обнаружено, что ширина запрещенной зоны оптической энергии увеличивается с увеличением температуры отжига. Ширина запрещенной зоны оптической энергии 1,5 эВ, 1,6 эВ и 1,7 эВ была получена для пленок CdTe, отожженных при 100°C и 200°C.

На рисунке 12 показан расшифрованный рентгенофлуоресцентный спектр гетероструктуры pCdTe-nCdS и pCdTe-nCdSe отожженной при 200°C.

По рентгенофлуоресцентным анализом (РФА) было исследовано гетероструктуры с целью получения его элементного состава, то есть его элементного анализа. С помощью него найдены различные элементы от бериллия (Be) до урана (U). Было обнаружено, что в пленках CdTe имеются элементы таких, как Te, Si, Au, Ag, Cd.

На рисунке 13 (а и б) показаны морфология поверхности пленки CdTe и пленок CdTe толщиной 1 мкм при различных температурах отжига.

Анализ с помощью сканирующего электронного микроскопа показан для гранул CdTe, только что выращенных и отожженных пленок при 100 и 200°C на

рисунке 13 (а и б). Поверхность пленок выглядит чистой, однородной и без отверстий.

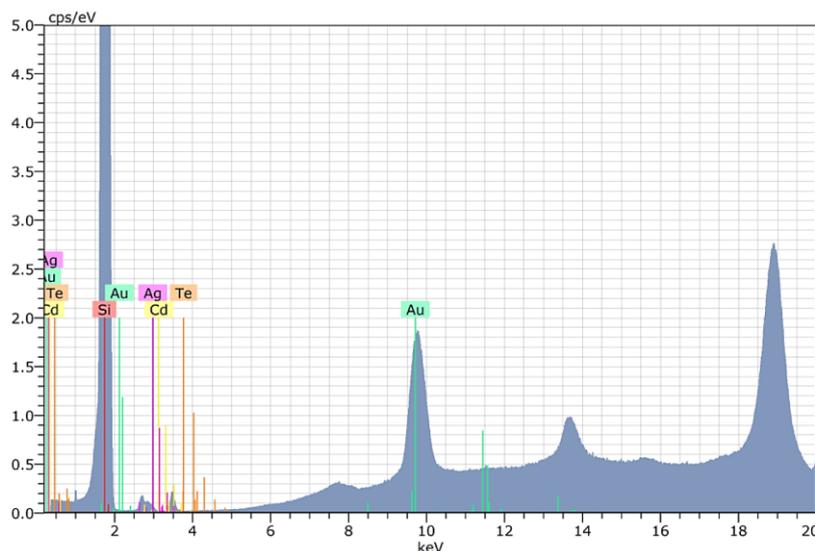


Рис. 12. Расшифрованный рентгенофлуоресцентный спектр гетероструктуры pCdTe-nCdS и pCdTe-nCdSe

Эти результаты подтвердили качество пленок, полученных методом термического испарения в высоком вакууме с введения примесей при осаждении. Температура отжига влияет на размеры зерен пленок (рис. 13 а и б), а также на ширину запрещенной зоны пленок (см. рис. 11).

Полученные результаты показали возможность использования пленки CdTe толщиной 1 мкм в качестве поглощающего слоя для разработки тонкопленочных солнечных элементов CdS/CdTe.

Четвёртая глава «**Оптические и электрофизические свойства гетероструктур pCdTe – nCdS и pCdTe – nCdSe с глубокими примесными уровнями и их практическое применение**» посвящена результатам электрофизические и поверхностно активные свойствам гетероструктуры p-CdTe-nCdS и pCdTe-CdSe с глубокими примесными уровнями, так же улучшения характеристики фотоэлементов на их основе и влияние толщины и температуры на фотоэлектрические свойства.

Спектральная зависимость fotocувствительности и коэффициента собирания исследованы в области энергии фотонов $E_{g_2} \geq h\nu \geq E_{g_1}$, где E_{g_1} и

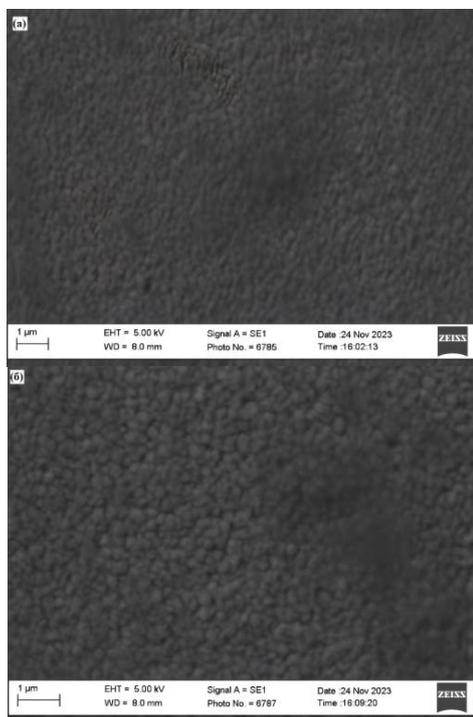


Рис. 13. Морфология поверхности (а и б $\times 48000$) гетероструктуры pCdTe-nCdS и pCdTe-nCdSe при различных температурах: а) – 100°C, б) – 200°C

E_{g2} - ширина запрещенной зоны узкозонного и широкозонного полупроводника соответственно. Как видно из рис. 14 и 15 фоточувствительность структур появляется за полосой собственного поглощения широкозонного полупроводника ($h\nu < E_{g2}$) и достигает максимума при $h\nu = 1,5$ эВ ($pCdTe - nCdS$) и $h\nu = 1,45$ эВ ($pCdTe - nCdSe$).

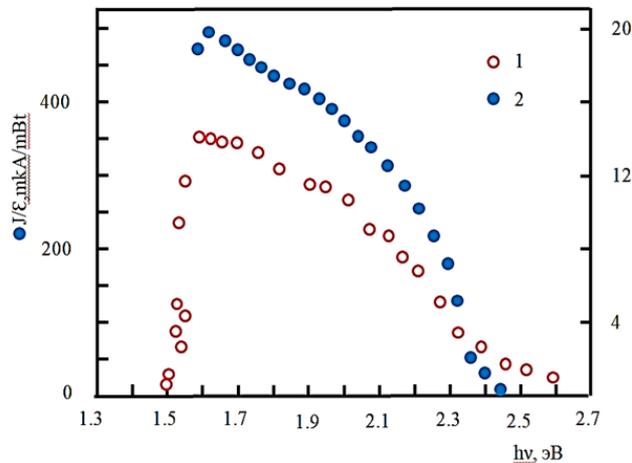


Рис. 14. Спектральная зависимость фоточувствительности пленочной гетероструктуры $pCdTe-nCdS$ (2) и $pCdTe-nCdSe$ (1)

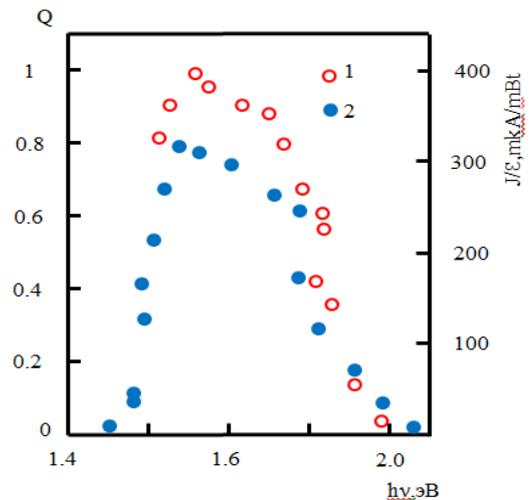


Рис. 15. Спектральная зависимость фоточувствительности (1) и коэффициента сбора (2) пленочной гетероструктуры $pCdTe-nCdSe$

Следует отметить, что коротковолновый край фоточувствительности $pCdTe-nCdS$ структуры начинает резко возрастать при энергии фотонов $h\nu \leq 2,3$ эВ ($E_{gCdS} = 2,4$ эВ), а у структуры $pCdTe-nCdSe$ уже при энергии фотонов ($E_{gCdSe} = 1,74$ эВ) фоточувствительность имеет значительную величину ~ 100 мкА/мВт. Чтобы выявить роль широкозонного оптического окна, был проведен следующий эксперимент. После измерения спектрального распределения фоточувствительности структуры широко зонный слой CdS вытравливается в HCl с целью выявления n- области теллурида кадмия. Затем на поверхность n-CdTe были нанесены тонко съемные контакты из индия.

Проведенные после этого измерения показывают, что чувствительность $pCdTe-nCdTe$ перехода намного ниже, чем с широкозонным оптическим окном (см. рис. 19, кривая 1). Однако, в нем коротковолновая часть фоточувствительности простирается до энергии фотонов $h\nu \approx 2,6$ эВ. Эти экспериментальные результаты дают возможность утверждать, что широкозонное оптическое окно значительно уменьшает скорости поверхностной рекомбинации.

Коэффициент сбора структур начисляется с помощью выражения:

$$Q = \frac{j_{k3}}{qN(1-\eta)(1-e^{-\alpha d})\beta}, \quad (6)$$

j_{k3} - плотность тока короткого замыкания, q - заряд электрона, N - число квантов, падающих на единицу площади, η - коэффициент отражения от поверхности структур, α - коэффициент поглощения узкозонного материала, β - квантовый выход внутреннего фотоэффекта.

Коэффициент отражения от поверхности фотопреобразователя измерялся в области длин волн $0,45+0,75$ мкм с помощью спектрофотометра ИКС-14, а в области $\lambda \approx 0,75$ мкм коэффициент отражения определен с помощью монохроматора ЭД 0,5-М.

В структурах pCdTe - nCdS и pCdTe - nCdSe когда реализуется модель p-n-перехода с верхним широкозонным оптическим окном, зависимость Q хорошо описывается уравнениями, обычно применяемыми для гомогенных переходов при условии S-O (где S- скорость поверхностной рекомбинации).

Поэтому, когда имеется тонкий слой nCdTe (d-O) в исследуемых структурах, целесообразно использовать уравнение, в котором общий фототок I_{ϕ} прибора представляется как сумма двух фототоков: $I_{\phi 1}$ - фототок, возникающий вследствие генерации носителей в обедненном слое nCdTe; $I_{\phi 2}$ - фототок, связанный с диффузией генерированных в базе носителей к краю обедненного слоя:

$$I_{\phi} = I_{\phi 1} + I_{\phi 2} = q N \exp(-\alpha_2 d) \left[1 - \frac{\exp(-\alpha_1 W)}{\exp(\alpha_2 L_n)} \right], \quad (7)$$

где W - толщина объединенного заряда,

d - толщина широкозонного слоя

L_n - длина диффузии электронов в p CdTe

Вычисленный из уравнения (7) коэффициент собирания между полосами собственного поглощения сульфида и теллурида кадмия (при значениях $W=5 \cdot 10^{-5}$ см, $d=5$ мкм), селенида и теллурида кадмия (при значениях $W=6 \cdot 10^{-5}$ см, $d=5$ мкм) имеет величину, равную единице (см. рис. 21, кривая 5).

На рис 16 (кривая 1 и 4) приведены экспериментальные зависимости $Q(\lambda)$ для структур pCdTe- nCdS и pCdTe- nCdSe, откуда следует, что в обеих структурах в зависимости Q отсутствует резкий максимум, характерный для гомогенных фотоэлементов с p-n - переходами.

Как видно из рис 16 (кривая 1 и 4) , в области энергии фотонов $E_{g2} \geq h\nu \geq E_{g1}$ для фотопреобразователя pCdTe- nCdS и pCdTe- nCdSe значение Q соответственно равно $0,8+0,9$ и $0,75+0,85$. С увеличением толщины широкозонного слоя значения Q возрастает. Однако, при этом ее величина в коротковолновой области немного уменьшается.

Отличие между $Q_{\text{выч}}$ и $Q_{\text{эксп}}$ в коротковолновой области спектра объясняется тем, что часть падающих фотонов поглощается в широкозонном полупроводнике. Поэтому экспериментальной значение Q меньше, чем вычисленное при условии d - O, S - O.

При достаточно больших длинах волн, поглощение света в исследуемых структурах происходит в p-области теллурида кадмия. По выражению (6) длинноволновой край ($\lambda \approx 0,81$) зависимости Q определена величина длины диффузии неосновных носителей (L_n) равная $3 \cdot 10^{-3}$ см.

В фотодиодном режиме у обеих структур значение Q с ростом приложенного напряжения возрастает и при V-0.4В достигает величины больше единицы в области энергии фотонов $E_{g2} > h\nu \geq E_{g1}$ (рис. 17 для pCdTe-nCdS). Отсюда следует полагать, что в поликристаллическом теллурида кадмия

формируется неидеальный p-n - переход. Как известно, в неидеальном p-n-переход происходит усиления тока неосновных носителей.

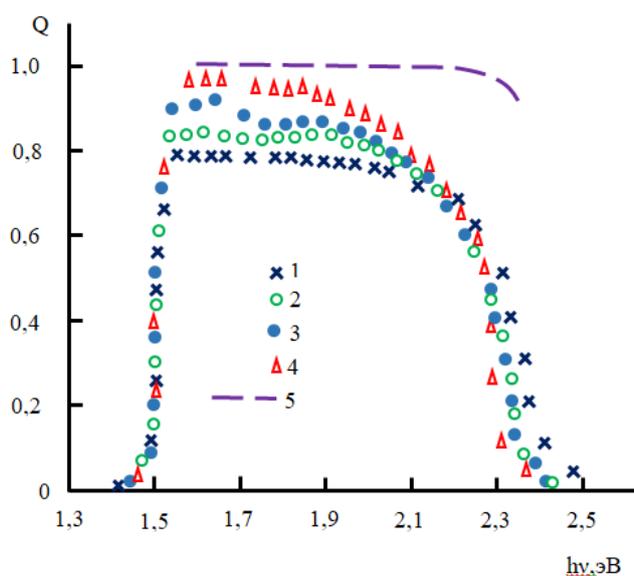


Рис. 16. Спектральная зависимость коэффициента сбора пленочной гетероструктуры p CdTe-n CdSe при различных толщинах слоя CdSe: 1-1; 2-2; 3-3; 4-5 мкм. 5-расчетная

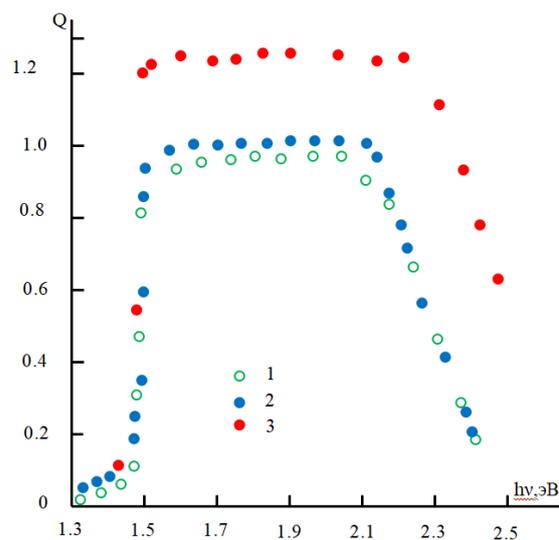


Рис. 17. Спектральная зависимость коэффициента сбора пленочной гетероструктуры p CdT-n CdS в фотодиодном режиме при различных напряжениях: 1-0; 2-0.4; 3-0.8 В

Допустим, что в диффузионной области базы путем освещения создан пакет электронов. Для компенсации объемного заряда электронов дырки не только из тыльного контакта, но также из шунтирующих областей p-n- перехода. Таким образом, световая добавка к обратному току в неидеальном p-n- переходе больше, чем в идеальном. Следовательно, коэффициент сбора может превышать единицу.

С целью определения стабильности изготовленных гетероструктур исследовали влияние температуры на спектральные характеристики. Установлено, что с увеличением температуры максимум фоточувствительности гетероструктур смещается в сторону больших длин света. В коротковолновой области спектра изменение фоточувствительности с температурой незначительно.

Сдвиг максимума фоточувствительности с температурой можно объяснить изменением ширины запрещенной зоны теллурида кадмия.

Наличие резкого спада фоточувствительности в длинноволновой области спектра позволяет определить температурный коэффициент ширины запрещенной зоны ($dE_{g1}/\alpha T$) теллурида кадмия. Величина $dE_{g1}/\alpha T$, определенная из температурного сдвига спада фоточувствительности в длинноволновой области спектра, составляет $\alpha - 4.10^{-4}$ эВ/град, что удовлетворительно согласуется с данными, определенными другими методами. Уменьшение фоточувствительности с уменьшением температуры в длинноволновой области спектра связано с тем, что при понижении температуры фотоны с меньшей

энергией проникают глубже в теллурид кадмия. Это приводит к частичному несоответствию областей генерации и разделения электронно-дырочных пар.

С повышением температуры увеличивается число фотонов, поглощаемых вблизи р-п- перехода и глубина поглощения ($K = \frac{1}{\alpha}$) становится сравнима с длиной диффузии неосновных носителей, вследствие чего происходит полное разделение электронно-дырочных пар, что приводит к увеличению фоточувствительности в длинноволновой части спектра. Для длинноволнового излучения наблюдается резкая зависимость фоточувствительности от температуры. Такое отличие в температурной зависимости фоточувствительности при различных длинах волн также объясняется изменением глубины поглощения света и диффузионной длины неосновных носителей в теллуриде кадмия.

Характерная особенность спектральной характеристики пленочной структуры рCdTe - nCdS и рCdTe - nCdSe является высокая стабильность фоточувствительности в коротковолновой области спектра.

Таким образом, полученная пленочная гетероструктура имеет диапазон фоточувствительности в пределах 0,4-2,5 эВ и характерна особенностями спектральной характеристики пленочной гетероструктуры рCdTe – nCdS и рCdTe – nCdSe является высокая стабильность фоточувствительности в коротковолновой области спектра.

Экспериментально показано, что широкозонное оптическое окно значительно уменьшает скорость поверхностной рекомбинации и приводит к увеличению коэффициента собирания пленочной гетероструктуры.

Созданная гетероструктура отличается тем, что она термостойкая, с повышением температуры увеличивается фоточувствительность в длинноволновой области спектра, из-за наличие глубоких примесных уровней в CdTe.

Спектр поглощения полупроводника характеризуется очень быстрым изменением коэффициента поглощения при энергиях фотонов, равных энергетической щели. Кристалл сильно поглощает фотоны с энергией выше энергетической щели и имеет коэффициент поглощения более 10^5 см^{-1} ; он почти прозрачен для фотонов с меньшей энергией; обычно коэффициент поглощения меньше 5 см^{-1} , если энергия фотона меньше ширины запрещенной зоны на 0,1–0,2 эВ при комнатной температуре, и быстро уменьшается при больших различиях.

Важными дефектами являются вакансии и междоузлия самих составляющих. В CdTe и CdSe вакансии Te или Se и междоузлия Cd вводят донорные уровни в запрещенную зону, тогда как междоузлия Te или Se и вакансии Cd создают акцепторные уровни. На рис. 19 приведены значения энергии ионизации таких дефектов в соединениях A^2B^6 в целом.

Схема энергетических зон CdTe, показаны на рис. 18, 19.

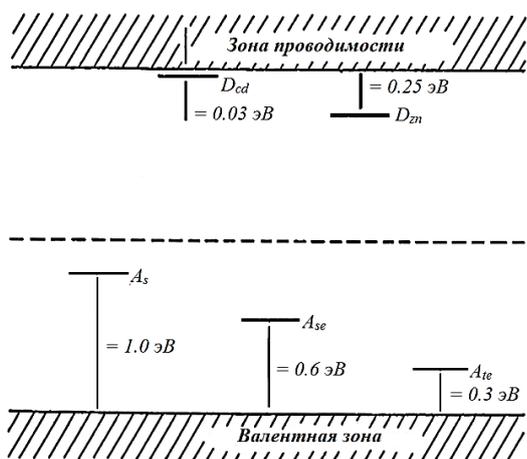


Рис. 18. Сводка характерных уровней энергии донора и акцептора в соединениях A^2B^6 .

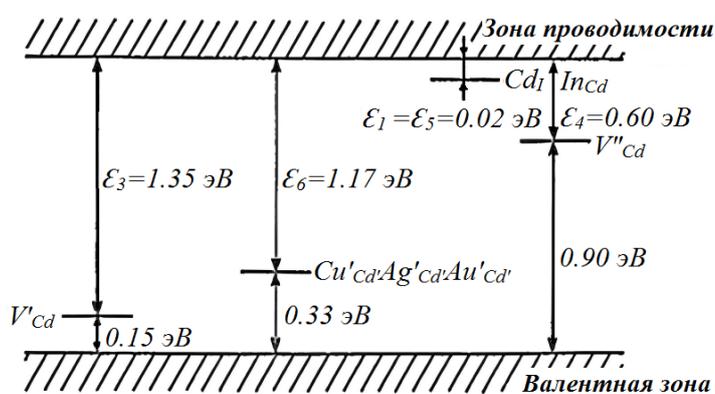


Рис. 19. Электронная схема энергетических зон CdTe, дающая значения энергии тепловой ионизации различных центров при комнатной температуре.

Дефекты вообще и точечные в частности являются очень важным фактором, определяющим электрические свойства соединений A^2B^6 (Таблица 2).

Таблица 2

Свойство	CdTe	CdSe	
Эффективная масса	электрон m_e^* дырка m_h^*	0.096 ± 0.005 м	0.13 м
		0.35 ± 0.05 м	1 м 0,45 м
Мобильность	электрон дырка	700 $см^2В^{-1}сек^{-1}$	650 $см^2В^{-1}сек^{-1}$
		65 $см^2В^{-1}сек^{-1}$	20-50 $см^2В^{-1}сек^{-1}$
Ширина запрещенной зоны при 300°К	1.5 эВ, 0.824 микрон	1.74 эВ, 0.71 микрон	
dEg/dT	$(2,3-5,4) \cdot 10^{-4}$ эВ/°К	$4,6 \cdot 10^{-4}$ эВ/°К	
Статическая диэлектрическая проницаемость	11	9,33	
		10,2	
Высокочастотная диэлектрическая проницаемость	7,21	6,05	
		5,96	
Сродство к электрону	4,28 эВ	4,95	
Постоянная решетки	6,481 Å	6.077 Å (кубический)	

Сводка измеренного энергетического положения и характеристик доноров, акцепторов и ловушек из-за примесей, структурных дефектов или нестехиометрии для CdSe.

Было обнаружено, что поглощение в CdTe чувствительно к состоянию поверхности, а также к объемным дефектам и несовершенствам в кристалле. На рис. 20 показан коэффициент поглощения CdTe в зависимости от энергии фотона

при комнатной температуре, как сообщалось в различных и наших исследованиях. Расхождение между этими результатами вызвано, прежде всего, различиями в объемных поверхностных дефектах в разных образцах.

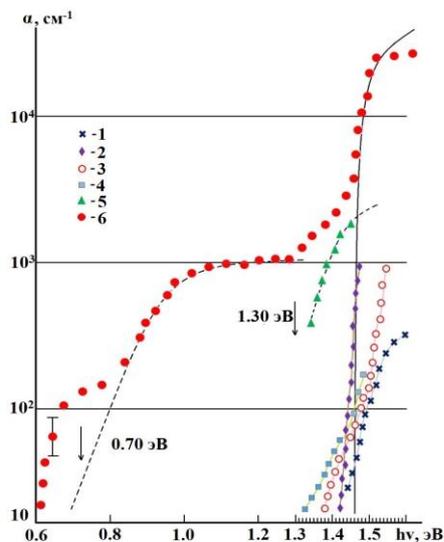


Рис. 20. Коэффициент поглощения (КП) CdTe при комнатной температуре в зависимости от энергии фотона, полученные нами и разными наблюдателями: 1- Dohyoung Kwon (2012); 2- Drew E. Swanson (2016); 3- К. Дроздов (2015); 4- Hamid Fardi (2013), 5 и 6 - Наши результаты КП, проведенной эксперименты в южном Федеральном университете, Ростов на Дону, Россия (2023).

Как видно, в спектрах поглощения света в этих пленках имеется явно выраженная примесная полоса поглощения света в области (1,46-1,5) эВ почти совпадает с данными для монокристаллов (имеется длинноволновой сдвиг около 0,02 эВ) и соответствует собственной полосе поглощения. Длинноволновой сдвиг может быть объяснен внутренним механическим напряжением в пленке CdTe $\approx 2,7 \cdot 10^8$ эВ, если использовать для барического коэффициента измерения ширины запрещённой значение $\frac{dE}{dP} = 7,9 \cdot 10^{-6} \frac{\text{эВ} \cdot \text{см}^2}{\text{кг}}$. Далее имеется одна более явно выраженная полоса с красной границей около 1,3 эВ и другая, не подающаяся надежной расшифровке, в которой коэффициент поглощения уменьшается от порядка 10^3 до 10^2 см^{-1} в области 0,7-1,3 эВ. Оба эти полосы связаны с поглощениями цвета глубокими центрами.

Отметим, что в исследуемых нами гетероструктурах поглощение в примесной области вблизи края поглощения достаточно большое $\approx 10^4$ см^{-1} , как и при собственном поглощении обуславливает пространственное неоднородное возбуждение носителей.

По спектрам поглощения определено глубокие примесные уровни, энергии активации, которых равны $E_c - 0,70$ эВ и $E_c - 1,30$ эВ. Эти глубокие уровни связаны вакансии кадмия и серебро, медь, соответственно.

Далее приведено результаты по вопросам практического применения созданных фотоэлементов на основе гетероструктур pCdTe – nCdS и pCdTe – nCdSe с глубокими примесными уровнями была создано автономном оптическим датчикам с новым гетероструктурным фотоприёмником на основе p CdTe – n CdS и p CdTe – n CdSe для определения загрязнения в воздухе с системой автоматического управления с применением Arduino и фотозлектрический модуль для датчика предназначена для приточной вытяжных вентиляции воздуха.

Сущность изобретения заключается в том, что в оптическом датчике определения загрязнения в воздухе, содержащем основание с центральным сквозным отверстием, на нижней и верхней поверхностях. Внутри датчика где проходит частицы загрязнённого воздуха расположен ИК светодиод, который при излучении лучей сквозь линзы попадают на поверхность частиц загрязнённого воздуха, а которые не попавшие лучи отражаются зеркалом расположенном внутри противоположенном стенке датчика. Таким образом лучи которые излучает ИК светодиод максимально попадает на частицы загрязнённого воздуха после отражённые частицами загрязнённого воздуха лучи попадают сквозь линзы фотоприёмник на основе гетероструктуры p CdTe – n CdS и p CdTe – n CdSe.

Способ изготовления полупроводникового датчика с новым гетероструктурным фотоприёмником на основе p CdTe – n CdS и p CdTe – n CdSe для определения загрязнения в воздухе заключается в следующем: полупроводниковый датчик изготавливается материалом пластмассы для корпуса, металлической крышкой от защиты электромагнитных полей. Внутри корпуса расположен полупроводниковые элементы, блок схема для контроля ИК светодиода, схема усилителя и стеклянное зеркало для отражения потока ИК луча. Оптический датчик имеет не большого размера весом 17 грамм, который изменился от веса прототипа используя новые детали как отражающая зеркало и фотоприёмник с новым гетеропереходом так же вместится в любые труднодоступные места.

На рис. 21 показано блок схема датчика с новым гетероструктурным фотоприёмником для определения загрязнения в воздухе позволяет легко понять какие блоки имеет важную роль в схеме датчика.

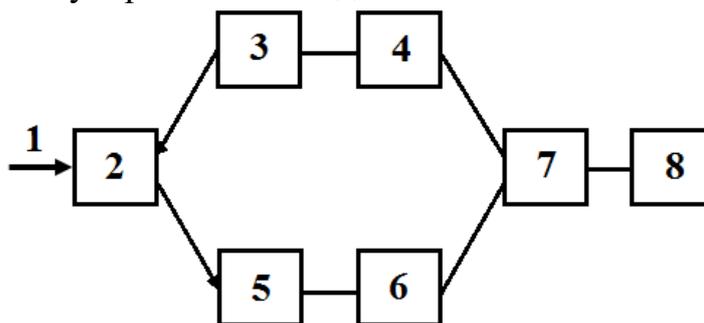


Рис. 21. Блок схема датчика с новым гетероструктурным фотоприёмником: 1- источник загрязненного воздуха, 2-рабочая камера, 3-инфракрасный светодиод, 4- контроллер светодиода, 5- гетероструктурный фотоприемник на основе p CdTe – n CdS и p CdTe – n CdSe, 6-оперционный усилитель сигнала, 7- микроконтроллерная платформа Arduino, 8-монитор или компьютер.

Принцип работы схемы полупроводникового датчика с новым гетероструктурным фотоприёмником для определения загрязнения в воздухе показан на рис. 22. Известно, что в составе солнечного луча имеется видимое, инфракрасное, ультрафиолетовые лучи. В наших пленочных гетероструктурах генерируется носители заряда не только из собственной области, но и в примесной области спектра, так как в пленках CdTe имеется глубокие примесные

уровни, которые расположено в запрещенной зоне. Так как, фотопроводимость прямо пропорционально концентрации носителей заряда и интенсивности света по известной формуле

$$\sigma = e n \mu \beta I \quad (8)$$

где, e -заряд электрона, n -концентрация носителей заряда, μ -подвижность носителей заряда, β -квантовый выход, I -интенсивность света.

Сила тока и сигнал увеличивается из-за того, что возбуждается носители заряда не только из собственной области, но и примесной области поглощения из глубоких примесных уровней, которой введено при получении гетероструктуры с теллурида кадмия.

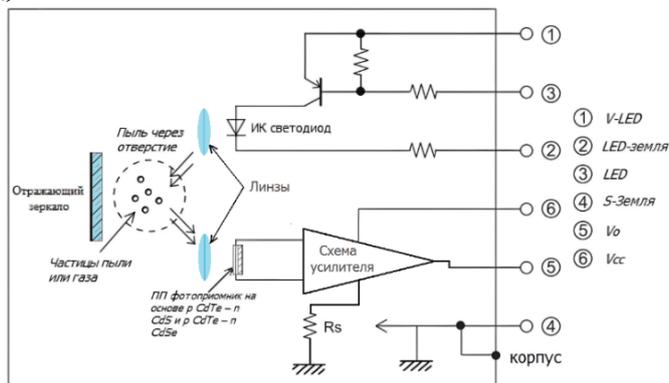


Рис. 22. Рабочая зона и электрическая схема датчика с новым гетероструктурным фотоприемником на основе $p\text{CdTe} - n\text{CdS}$ и $p\text{CdTe} - n\text{CdSe}$ для определения загрязнения воздуха

При применении гетероструктурного модуля в новом типе системы определяющего загрязнения воздуха необходимо учитывать напряжения аккумуляторной батареи, снабжающей платформу Arduino uno. Платформа Arduino uno снабжает другие блоки системы, как датчики гетероструктурным фотоприёмником и блок WIFI для без проводного соединения. Для того, чтобы система выглядела практически было создано блок схема датчика определяющего загрязнения воздуха в платформе Arduino с применением гетероструктурного солнечного модуля, который соединен через WIFI к системе винтеляцией автоматического управления, а именно к программируемому логическому контроллеру (ПЛК).

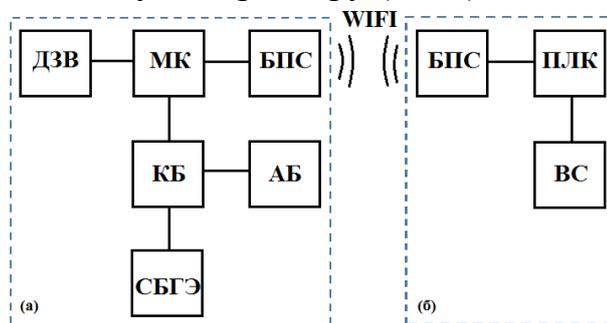


Рис. 23. Блок схема датчика определяющего загрязнения воздуха в платформе Arduino с применением гетероструктурного солнечного модуля (а) который соединен через WIFI к системе винтеляцией автоматического управления ПЛК (б)

В рис. 23 показано два блока который составляет общую вентиляционную систему где при блоке (а) расположен датчик загрязнения воздуха (ДЗВ) с новым гетероструктурным фотоприёмником $p\text{CdTe} - n\text{CdS}$ и $p\text{CdTe} - n\text{CdSe}$ с глубокими примесными уровнями (см. глава 4.5). После определения датчиком в воздухе посторонние частицы пыли или газа зафиксирует микроконтроллер

(МК) Atmega, который на базе платформы Arduino uno передает через блок беспроводной сети БПС WIFI к другому БПС расположенному блоке (б) соединённый программируемый логический контроллер (ПЛК) вентиляционной системы (ВС) помещения и цехов промышленных зданий.

В блоке (а) также расположен аккумуляторная батарея (АВ), солнечная батарея с гетероструктурными элементами (СБГЭ) рCdTe – nCdS и рCdTe – nCdSe с глубокими примесными уровнями и контроллер батарей, который контролирует тока в солнечных и аккумуляторных батареях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Впервые разработаны оптимальные технологии получения преобразователя солнечной энергии на основе гетероструктуры р CdTe – n CdS и р CdTe – n CdSe с глубокими примесными уровнями, которые значительно увеличивает мощность тока от 10^{-11} А до 10^{-7} А принимаемого электромагнитного излучения.

2. Показано, что коротковолновый край фоточувствительности р CdTe – n CdS структура начинает резко возрастать при энергии фотонов $h\eta \leq 2.3$ эВ, а у структуры р CdTe – n CdSe уже при энергии фотонов фоточувствительность имеет значительную величину $\sim 100 \frac{\text{мкА}}{\text{мВт}}$.

3. Впервые обнаружено, что при добавление примесей в CdTe фоточувствительность возрастает из-за наличие глобоких примесных уровней, энергии активации которых равны $E_c - 1.15$ эВ и при этом существенно снижается влияние поверхностной рекомбинации и расширяется спектральное распределение фоточувствительности от 0,4 эВ до 0,9 эВ.

4. Установлено, что высокотемпературный легирование Ag и Cu приводит к примесной фотопроводимости в CdTe, которые фоточувствительность увеличивается 2-3 раза в пределах 0,4-3,0 эВ принимаемого электромагнитного излучения ближе ИК области спектра.

5. Разработаны системы автономные оптические датчики с фотоэлектрическим модулем на основе р CdTe – n CdS и р CdTe – n CdSe с тонкой базой ($\leq 1,5$ мкм), имеющие удельное сопротивление 100 Ом·см и в первые применена для определения загрязнения в воздухе с системой автоматического управления с применением Arduino приточно-вытяжных вентиляции и открытых участков атмосферного воздуха.

6. Разработаны гетероструктурные фотоэлектрические модули из десяти гетероструктурных солнечных элементов и системы на их основе, позволяющие компенсировать дефицит напряжения, возникающий в результате нагрева и обеспечивает увеличение мощности тока и сигнала до $I \sim 10^{-7}$ А, по сравнению известных оптических датчиков $I \sim 10^{-10}$ А.

**SCIENTIFIC COUNCIL PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04
ON AWARDING SCIENTIFIC DEGREES AT THE
NAMANGAN INSTITUTE OF ENGINEERING AND TECHNOLOGY**

FERGANA STATE UNIVERSITY

ERGASHEV RAVSHANBEK NAZIROVICH

**RESEARCH OF THE OPTICAL, ELECTROPHYSICAL AND
PHOTOVELECTRIC PROPERTIES OF SOLAR CELLS BASED ON THE
HETEROSTRUCTURE p-CdTe-nCdS AND pCdTe-nCdSe WITH DEEP
IMPURITY LEVELS**

01.04.10 – Physics of semiconductors

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

Namangan – 2025

INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

The aim of research work is to study the electrical, optical and photovoltaic properties of solar cells based on the created pCdTe-nCdS and nCdTe-pCdSe heterostructures with deep impurity levels and to increase their current and signal power.

The object of research work is semiconductor materials from CdTe, CdS, CdSe, special pure, as well as elements of the first group, silver and copper.

The scientific novelty of the research work are as follows:

for the first time, an optimal technology for growing heterostructure solar cells based on pCdTe-nCdS and pCdTe-nCdSe with a deep doping layer by evaporation in a high-temperature vacuum was found;

it was found that the short-wave photosensitivity edge of the pCdTe-nCdS structure begins to increase sharply at photon energy $h\nu \leq 2.3$ eV, and for the pCdTe-nCdSe structure, photosensitivity already has a significant value of $\sim (100 \mu\text{A})/\text{mW}$ at photon energy;

it was found that with increasing temperature, the maximum photosensitivity of the heterostructure shifts to the long-wave region of light, which is due to a change in the width of the band gap of cadmium telluride;

for the first time, the presence of mixed photoconductivity of CdTe was revealed as a result of high-temperature diffusion introduction of Ag and Cu, which led to a 2-3-fold increase in photosensitivity in the wavelength range of light of 0.4-3.0 eV.

it was experimentally shown that a wide-band optical window leads to an increase in the collection coefficient of the film heterostructure due to a significant decrease in the surface recombination rate;

it was shown for the first time that with increasing temperature, the photosensitivity of the heterostructure in the short- and long-wavelength region of the spectrum increases, due to the presence of deep impurity levels with an activation energy of $E_c - 1.15$ eV;

optical sensors and a photoelectric module operating in a wide range of light (0.4–3.0 eV) based on pCdTe-nCdS and nCdTe-pCdSe heterostructures were developed to detect air pollution.

Implementation of the research results.

Based on the obtained scientific results on the electrophysical, optical, photoelectric properties and mechanisms of current passage of pCdTe-nCdS and pCdTe-nCdSe film heterostructures, an optimal technology for producing solar cells based on pCdTe-nCdS and pCdTe-nCdSe as a converter for solar energy was developed:

fundamental project OT-F2-71 “Study of the influence of light on the current-voltage characteristics of a deformed p-n junction in a very high-frequency electromagnetic field”, implemented in 2017-2020 within the framework of state scientific and technical programs at the Department of Physics of the Namangan Civil Engineering Institute (certificate No.: 06/15 dated June 26-2024 Namangan Civil Engineering Institute). The use of scientific results led to the stabilization of the

electrophysical parameters of doped cadmium telluride samples and made it possible to produce solar cells that correspond to the performance of their analogues;

it is shown that thermal diffusion introduction of Ag and Cu into cadmium telluride leads to impurity photoconductivity of the pCdTe-nCdS and pCdTe-nCdSe heterostructures, which increases photosensitivity by 2-3 times and stabilizes its parameters; the presence of deep impurity centers of the first group of elements on the surface of barriers in CdTe films leads to a sharp increase in the concentration of minority charge carriers, which are located in deep centers and are released during development in the range of 0.4-3.0 eV and these results are used in the production of semiconductor photoconverters solar energy in the joint-stock company "FOTON" and the joint-stock company "Uzeltehsanoat" (certificate "Uzeltehsanoat" dated June 27-2024 №123). The use of the results obtained made it possible to manufacture solar energy photoconverters and other electronic devices and improve their electrophysical and optical parameters.

The structure and scope of the dissertation. The dissertation work consists of an introduction, 4 chapters, a conclusion, a list of references and applications. The volume of the dissertation is 118 pages.

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

I bo'lim (I часть, I part)

1. **R. Ergashev** and others. Structure phase state and physical properties of $\text{YbMn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_3$ compositions // *Applied Physics A*. 2023. Vol.129, Iss.185, pp.1-13. (№3, **Scopus**, Q2. IF:2.58. <https://www.scopus.com/sourceid/27027>)
2. S.M. Otajonov, **R.N. Ergashev**, T. Axmedov, Ya. Usmonov and B. Karimov. Photoelectric properties of solar cells based on pCdTe-nCdS and pCdTe-nCdSe heterostructures // *APITECH-IV-2022, Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing*. 2022. Vol.2388, 012062, pp.1-4. (№3, **Scopus**, Q4. IF:0.56. <https://www.scopus.com/sourceid/130053>)
3. S.M. Otazhonov, **R.N. Ergashev**, K.A. Botirov, B.A. Qaxxorova, M.A. Xudoynazarova, N.A. Abdukarimova, M.E. Madaminova and E.M. Ismoilova. Influence of thickness and temperature on photoelectric properties of p-CdTe-nCdS and pCdTe-CdSe heterostructures // *APITECH-IV - 2022, Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing*, 2022. Vol.2388, 012001, pp.1-4. (№3, **Scopus**, Q4. IF:0.56. <https://www.scopus.com/sourceid/130053>)
4. S. Otajonov, **R. Ergashev**, Sh. Shuxratov, K. Botirov, Ya. Usmonov, M. Baxromov. Efficient Effect of Deep Levels on the Photoelectric Properties of a Heterostructure based on p CdTe – n CdS and p CdTe – n CdSe // *AIP Conference Proceedings*. 2024. Vol. 3045, 030001, pp.030001-1- 030001-5. (№3, **Scopus**, Q4. IF:0.41. <https://www.scopus.com/sourceid/26916>)
5. S. Otajonov, **R. Ergashev**, Z. Xaydarov, K. Botirov, M. Bahromov, T. Axmedov and M. Raxmonkulov. Creation of an optical sensor based on the pCdTe – nCdS and pCdTe – nCdSe heterostructure for detecting polluted air // *E3S Web of Conferences*. 2024. Vol.582, 05001, pp. 1-6. (№3, **Scopus**, Q4)
6. С.М.Отажонов, **Р.Н.Эргашев**. Электрофизические и поверхностно активные свойства гетероструктуры p-CdTe-n-CdS и p-CdTe-CdSe с глубокими примесными уровнями // *Физика полупроводников и микроэлектроника*. 2023, Том 5, Выпуск 1, стр.17-23. (01.00.00. №16).
7. А.Абдулвахидов, С.Отажонов, **Р.Эргашев**. Фоточувствительность солнечных элементов гетероструктуры pCdTe – nCdS и pCdTe – nCdSe с глубокими примесными уровнями // *Илмий хабарнома. Физика-математика тадқиқотлари (Махсус сон)*. 102-107 б. Андижон 2023 йил (01.00.00. №13).
8. 8. С.М. Отажонов, **Р.Н. Эргашев**, К.А. Ботиров. Разработка оптического датчика для определения пыли и газа на основе гетероструктуры pCdTe – nCdS и pCdTe – nCdSe // *Научный вестник НамГУ*. 2024. Вып.11, стр. 34-38. (01.00.00. №14).

II bo'lim (II часть, II part)

9. S.M. Otajonov, **R.N.Ergashev**, K.Botirov, N.Yunusov. Study of the photoelectric properties of solar cells based on pCdTe-nCdS and pCdTe-nCdSe heterostructures using innovative technology // «*Ishlab chiqarishning texnik*,

muhandislik va texnologik muammolarining innovatsion yechimlari» mavzusidagi xalqaro miqyosidagi ilmiy-texnik anjumani materiallari to‘plami. JizPI 2- Qism, 2022 yil 28-29-oktabr, 143-146 b.

10. С.Отажонов, **Р.Эргашев**, Н.Юнусов. Изучение поверхностной рекомбинации гетеропереходов на основе р CdTe – n CdS и р CdTe – n CdSe. ISSN 2308-4804. Science and world. Volgograd 2022. № 9 (109), стр. 26-28.
11. С.М. Отажонов, К.А. Ботиров, **Р.Н. Эргашев**, Н. Юнусов, Д. Тургунова, М. Бахромов. Влияние температуры на оптические характеристики гетероструктуры р CdTe – n CdS и р CdTe – n CdSe с глубокими примесными уровнями // Science and world International scientific journal. 2024. pp. 34-37. № 1 (125). Publishing House «Scientific survey». www.scienceph.ru
12. С.М.Отажонов, **Р.Н.Эргашев**, К.А.Ботиров. Влияние температуры и давления на электрофизические свойства гетероструктуры рCdTe-nCdS и рCdTe-nCdSe с глубокими примесными уровнями // Science and world International scientific journal. № 8 (120), 2023. © Publishing House «Scientific survey» Russia, Volgograd, pages 6-9.
13. С.Отажонов, **Р.Эргашев**, К.Ботиров. Разработка солнечных преобразователей на основе гетероструктуры р CdTe – n CdS и р CdTe – n CdSe // “Energetika sohasini rivojlantirishda muqobil energiya manbalarining roli” mavzusida vazirlik miqyosida ilmiy-amaliy konferensiya materiallari to‘plami. NamMQI, 28-29 aprel, 2022 yil, Namangan shahri, 196-198 b.
14. С.Отажонов, **Р.Эргашев**. Изучения вольтамперные характеристики фотоэлементов на основе р CdTe – n CdS и р CdTe – n CdSe при термической обработке // “Проблемы фотоники и перспективы развития” материалы республиканской научно-практической конференции. Урганч 2022 год 27-28 май стр. 98-100.
15. С.М.Отажонов, **Р.Н.Эргашев**, И.Каримов. Электрофизические и поверхностно активные свойство гетероструктуры р-CdTe-nCdS и рCdTe-CdSe с глубокими примесными уровнями // Ассоциация «Узэлтехсаноат», Сборник материалов II международной научной конференции “Современные тенденции развития физики полупроводников: достижения, проблемы и перспективы” 27-28 декабрь Ташкент-2022 стр. 192-194.
16. S.M. Otajonov, T. Akhmedov, K.A. Botirov, **R.N. Ergashev**, N.E. Alimov, M. Yokubjonova, M. Abdusattorova. Study of defects in photo-sensitive thin CdTe films under deformation // III International scientific conference Paris. France. 04-05.04.2023, pages 47-55. DOI <https://doi.org/10.5281/zenodo.7810249>
17. А.Абдулвахидов, С.Отажонов, **Р.Эргашев**. Фоточувствительность солнечных элементов гетероструктуры рCdTe – nCdS и рCdTe – nCdSe с глубокими примесными уровнями // Международной научно-практической конференции по «Полупроводниковая опто- и наноэлектроника, альтернативные источники энергии и их перспективы» Андижан, стр. 5-7. 12-13 октября 2023 года.
18. С.Отажонов, **Р.Эргашев**, М.Бахромов. Оптические свойства гетероструктуры на основе рCdTe – nCdS и рCdTe – nCdSe с глубокими

- примесными уровнями // II - Международная конференция «фундаментальные и прикладные проблемы физики полупроводников, микро- и наноэлектроники». Ташкент, 27-28 октября 2023 г. стр. 53-55.
19. С.М.Отажонов, **Р.Н.Эргашев**. Управление оптического поглощения гетероструктуры на основе pCdTe – nCdS и pCdTe – nCdSe с глубокими примесными уровнями с легирантами первой группы // IV Республиканской научной конференции молодых ученых и студентов-физиков (ЁОФТРИА-IV), стр. 205-208 Ташкент 2024.
 20. С.Отажонов, **Р.Эргашев**. Улучшения характеристики фотоэлементов на основе p CdTe – n CdS и p CdTe – n CdSe при термоциклировании в области альтернативных источников энергии // Научно-технический журнал акционерной обществе "Узбекгидроэнерго". 2022. Том.10, Вып.15, стр.78-79.
 21. С.М.Отажонов, **Р.Н.Эргашев**, Т.Ахмедов, К.А.Ботиров. Электрофизические свойства гетероструктуры pCdTe – nCdS и pCdTe – nCdSe с глубокими примесными уровнями // 2024. Vol.7, No.5, pp.233-240: PEDAGOG. <https://bestpublication.org/index.php/pedg/article/view/11049>
 22. **R.N.Ergashev**, M.A.Abduraxmonov. Oqimli tortuvchi vintelyatsiya uchun avtomatlashtirilgan boshqaruv tizimida Arduino uno platformasidan foydalanish // “Innovative scientific and practical research of scientists and youth of Uzbekistan” Part-16. Collection of scientific Remote online conference materials pp. 9-10. December 31, 2021, Tashkent: “Tadqiqot”.
 23. S. Otajonov, **R. Ergashev**. Chuqur aralashma sathli pCdTe - nCdS va pCdTe - nCdSe geterostructuralarning fotoelektrik xususiyatlariga tashqi omillarning ta'siri // “Yarimo‘tkazgichlar flzikasi, zamonaviy elektronika va energetikani fundamental va amaliy muammolari mavzusidagi xalqaro konferensiya. Namangan, NamMQI, 18-19 sentabr, 2024-yil, 279-283 betlar.
 24. С.М. Отажонов, **Р.Н. Эргашев**. Солнечные батареи с элементами на основе гетероструктуры pCdTe – nCdS и pCdTe – nCdSe для автономных устройств // Материалы международной научно-практической конференции на тему “Фундаментальные и прикладные проблемы физики полупроводников: решения и перспективы”, НамИТИ, 4-5 октября, 2024 г. стр. 377-382.
 25. С.М.Отажонов, Р.Н.Эргашев. Морфология поверхности и оптические свойства пленочной гетероструктуры p CdTe - n CdS и p CdTe - n CdSe с глубокими примесными уровнями при разных температурах // III Международная научная конференция «современные тенденции развития физики полупроводников: достижения, проблемы и перспективы», Ташкент, 2024 г., 26-27 сентябрь, стр. 219-222.

Avtoreferat Namangan shahar U.Nosir nashriyotida tahrirdan o‘tkazildi va o‘zbek, rus, ingliz tillaridagi matnlari mosligi tekshirildi (17.04.2025).

Bosishga ruxsat etildi 17.04.2025 y.
Bichimi 60X84 1/16, “Times New Roman”
Garniturada raqamli bosma usulida bosildi.
Shartli bosma tobog‘i 3. Adadi: 100. Buyurtma: № 127

“ FAZILAT ORGTEX SERVIS”
hususiy korxonasi bosmaxonasida chop etildi.
Manzil: Namangan sh. Amir Temur ko‘chasi 97 uy.
Tel: (+998) 91-346-44-43, (+998) 99-608-69-44