

**O‘ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI HUZURIDAGI  
YARIMO‘TKAZGICHLAR FIZIKASI VA MIKROELEKTRONIKA  
ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR  
BERUVCHI DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

---

**FARG‘ONA DAVLAT UNIVERSITETI**

**ALIMOV NODIR ESONALIYEVICH**

**XUSUSIYATLARI BOSHQARILADIGAN CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al VA CdTe-ZnSe  
KENG ZONALI YARIMO‘TKAZGICHLAR ASOSIDAGI  
GETEROSTRUKTURALARDAGI FOTOELEKTRIK XODISALAR**

**01.04.10 – Yarimo‘tkazgichlar fizikasi**

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

**Toshkent - 2023**

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

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

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

**Alimov Nodir Esonaliyevich**

Xususiyatlari boshqariladigan CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al va CdTe-ZnSe keng zonali yarimo'tkazgichlar asosidagi geterostrukturalardagi fotoelektrik xodisalar..... 3

**Алимов Нодир Эсоналиевич**

Фотоэлектрические явления в гетероструктурах широкозонных полупроводников на основе CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al и CdTe-ZnSe с управляемыми свойствами..... 21

**Alimov Nodir Esonaliyevich**

Photoelectric phenomena in heterostructures of wide – gap semiconductors based on CdTe-ZnSe and CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al with controlled properties..... 41

**E'lon qilingan ishlar ro'uxati**

Список опубликованных работ  
List of published works..... 45

**O‘ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI HUZURIDAGI  
YARIMO‘TKAZGICHLAR FIZIKASI VA MIKROELEKTRONIKA  
ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR  
BERUVCHI DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

---

**FARG‘ONA DAVLAT UNIVERSITETI**

**ALIMOV NODIR ESONALIYEVICH**

**XUSUSIYATLARI BOSHQARILADIGAN CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al VA CdTe-ZnSe KENG  
ZONALI YARIMO‘TKAZGICHLAR ASOSIDAGI GETEROSTRUKTURALARDAGI  
FOTOELEKTRIK XODISALAR**

**01.04.10 – Yarimo‘tkazgichlar fizikasi**

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

**Toshkent - 2023**

**Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Vazirlar Mahkamasi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2022.2.PhD/FM29 raqam bilan ro'yxatga olingan.**

Dissertatsiya Farg'ona Davlat universitetida bajarilgan.

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

**Ilmiy raxbar:**

**Otajonov Salim Madraximovich**  
fizika-matematika fanlari doktori, professor

**Rasmiy opponentlar:**

**Dadamirzayev Muxammadjon Gulomkodirovich**  
fizika-matematika fanlari doktori, professor

**Ayupov Kutup Sautovich**  
fizika-matematika fanlari doktori, professor

**Yetakchi tashkilot:**

**Nukus davlat pedagogika instituti**

Dissertatsiya himoyasi O'zbekiston Milliy universiteti qoshidagi Yarimo'tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti huzuridagi ilmiy darajalar beruvchi DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 raqamli Ilmiy kengashning 2023 yil «05» 07 soat 12-00 dagi majlisida bo'lib o'tadi. (Manzil: 100057, O'zbekiston, Tashkent sh., Yangi Olmazor ko'chasi, 20-uy, Tel.: (+99871)248-79-94, faks: (+99871)248-79-92, e-mail: info@ispm.uz)

Dissertatsiya bilan Axborot texnologiyalarini joriy etish bo'limida tanishish mumkin. (50 raqam bilan ro'yxatga olingan). Manzil: 100057, O'zbekiston, Toshkent shahri, Yangi Olmazor ko'chasi, 20-uy. Tel.: (+99871)248-79-59; e-mail: info@ispm.uz).

Dissertatsiya avtoreferati 2023 yil «21» 06 kuni tarqatildi.  
(2023 yil «21» 06 dagi 50 raqamli reestr bayonnomasi).



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

**O.X. Qo'ldashov**  
Ilmiy darajalar beruvchi  
Ilmiy kengash ilmiy kotibi, t.f.d., dotsent

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

## KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

**Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurligi.** Jahon amaliyotida yarimoʻtkazgichlar materialshunosligi bilan optoelektron priborsozlik sohasida elementar yarimoʻtkazgichlar bilan bir qatorda turli  $A^{II}B^{VI}$  birikmalar va ular asosidagi geterostrukturalardan keng foydalanish oʻsib bormoqda. Kadmiy tellurid (CdTe) radiofaol nurlanishga turgʻunligi tufayli, zarrachalarni qayd etuvchi detektorlar uchun istiqbolli material boʻlib, boshqa GaAs va GaN materiallarga nisbatan, ionlashtiruvchi nurlanishni sezilarli darajada yuqori qayd etuvchanligi bilan samaralidir va 250 keV gacha boʻlgan nurlanishlarni qayd etishda zarur material hisoblanadi. Shuningdek, geterooʻtishlarga ega boʻlgan yupqa polikristalli CdTe qatlamlari quyosh batareyalari, optik xotira yacheykalarini ishlab chiqish uchun ham istiqbolli element hisoblanadi. Shu munosabat bilan CdTe yupqa qatlamini sirtiy va hajmiy chuqur tutqichlarning spektrlarini oʻrganish va uni boshqarish muhim muammolardan biri hisoblanadi.

Hozirgi kunda dunyoda chuqur energiya sathlarga ega geterostrukturalarni legirlash orqali yangi materiallar sinfini olish boʻyicha ilmiy tadqiqotlarni amalga oshirish muhim vazifalardan biri sifatida qaralmoqda. Bu borada muayyan natijalarga erishilgan. Biroq, Si, CdTe va ZnSe ishtirokidagi geterostrukturani yaratishga yetarlicha eʼtibor qaratilmagan. Shu munosabat bilan CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si va CdTe-ZnSe asosida fotosezgir, elektromagnit nurlanishning keng diapazonida selektivlikni saqlay oladigan yuqori tezlikda ishlovchi qurilmalarni yaratish, ulardagi chuqur energetik sathlar spektrining paydo boʻlish qonuniyatlarini oʻrganish, yangi funksional imkoniyatlarni shakllantirish, materiallarning elektrofizik parametrlarini tashqi taʼsirlar bilan nazorat qilish, geterostrukturalarning hajmida yoki yuzasida joylashgan kirishmaviy sathlarning tabiatini oʻrganish ushbu dissertatsiyaning dolzarbligini koʻrsatadi.

Ushbu dissertatsiya tadqiqoti Oʻzbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi PF-60 son “2022-2026-yillarga moʻljallangan yangi Oʻzbekistonning taraqqiyot strategiyasi toʻgʻrisida”gi farmoni, Oʻzbekiston Respublikasi Prezidentining 2021-yil 19-martdagi PQ-5032-son «Taʼlim sifatini oshirish va fizika sohasida ilmiy tadqiqotlarni takomillashtirish chora-tadbirlari toʻgʻrisida»gi, 2021-yil 2-martdagi PQ-5011-son “Elektrotexnika va elektronika sanoatini yanada rivojlantirish va mahalliy mahsulotlarning raqobatbardoshligini oshirishga doir qoʻshimcha chora-tadbirlar toʻgʻrisida”gi qarorlari, hamda boshqa meʼyoriy – huquqiy hujjatlarda koʻrsatilgan vazifalarni maʼlum darajada bajarishga xizmat qiladi.

**Tadqiqotning Oʻzbekiston Respublikasida fan va texnologiyani rivojlanishining ustuvor yoʻnalishlariga mosligi.** Mazkur tadqiqot respublika fan va texnologiyalar rivojlanishining III. «Energiya, energiya resurslarini tejash, transport, mashinasozlik va asbobsozlik; zamonaviy elektronika, mikroelektronika, fotonika, elektron asbobsozlikni rivojlantirish» ustuvor yoʻnalishlariga muvofiq bajarilgan.

**Muammoning oʻrganilganlik darajasi.** Hozirgi kunga qadar  $A^{II}B^{VI}$  asosidagi yupqa qatlamlarini oʻstirish va ularning strukturaviy, fotoelektrik xususiyatlarini

tadqiq qilish muammolari dunyoning yetakchi mamlakatlaridagi ko'plab universitet va ilmiy markazlarda olib boriladi. Xususan, Ukraina Fanlar akademiyasi akademigi M.K. Sheynkman, V.P. Simashkevich (Ukraina) II-VI guruh elementlaridan tashkil topgan yarimo'tkazgichli birikmalaridan iborat geterostrukturalarning elektr xossalarini har tomonlama o'rganishgan. Professor V.S. Bagaev (Moskva, Rossiya) boshchiligida yuqori tozalikdagi CdTe nuqsonlarini optik va elektrofizik xususiyatlari o'rganilgan. Litvalik olimlar Y.Y. Vishakas, Y.K. Pojela, Y.Y. Vaytkus yuqori tezlikka ega fotodetektorlarni yaratishni eksperimental ravishda tadqiq etishgan.

Akademik R.A. Muminov, professorlar B.E. Umirzoqov, Sh.A. Mirsagatov boshchiligidagi bir guruh o'zbek olimlari CdTe yupqa qatlamidagi tok oqimining mexanizmlarini eksperimental tarzda tadqiq etilgan.

Shu bilan birga, polikristalli CdTe yupqa qatlamlardagi fotoo'tkazuvchanlikning nostatsionar jarayonlariga kirishmalarning ta'siri to'liq o'rganilmagan. Sirt rekombinatsiyasiga ta'sir qiluvchi asosiy, chuqur tutqichlar aniqlanmagan. Polikristall CdTe namunalarining hajmiy va yuzaviy fototashuvchilarining yashash vaqtini o'zgarishi baholanmagan, shuningdek CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al asosidagi geterostrukturalarda zaryad tashuvchilarning yashash vaqti aniqlanmagan.

**Dissertatsiya tadqiqotning dissertatsiya bajarilgan oliy ta'lim yoki ilmiy-tadqiqot muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog'liqligi.** Dissertatsiya tadqiqoti Farg'ona davlat universiteti va Vilnyus universitetidagi Evropa mintaqaviy taraqqiyot jamg'armasining № 01.2.2-LMT-K-718-1-0013-sonli "Jahon miqyosidagi tadqiqotchilar guruhlaridan tomonidan amalga oshirilgan tadqiqot loyihalari" (2015-2020 yy.) ilmiy loyihasi doirasida bajarilgan.

**Tadqiqotning maqsadi** CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al va CdTe-ZnSe geterostrukturalarda chuqur sathlarga bog'liq yangi fotoelektrik hodisalarni aniqlash, ular asosida ko'rinma va infraqizil nurlanishga yaqin sohalarda samarali bo'lgan fotoo'zgartirgichlarni yaratishdan iborat.

**Tadqiqotning vazifalari:**

ZnSe yuzasiga va SiO<sub>2</sub> bilan qoplangan Si-tagliklarga polikristall CdTe qatlamlarini o'stirish;

CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al, CdTe-ZnSe geterostrukturalarda chuqur sathlarni aniqlash; polikristal p-CdTe qatlamlarda chuqur tutqichlarning spektroskopiyasini o'rganish va sirt rekombinatsiyasi tezligini aniqlash;

polikristall CdTe namunalarining hajmi va yuzasi yaqinida, shuningdek polikristalli CdTe qatlamlarda esa sirt mikroelefini hisobga olgan holda fototashuvchilarning yashash vaqtlarini o'zgarishini baholash.

**Tadqiqotning ob'ekti** sifatida A<sup>II</sup>B<sup>VI</sup> guruh elementlarining birikmalari va CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al, CdTe-ZnSe geterostrukturalar olingan.

**Tadqiqotning predmeti** CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al, CdTe-ZnSe yupqa qatlamli geterostrukturalardagi mikropotensial to'siqlarni tashqi omillar ta'sirida boshqarish, shuningdek kirishmaviy fotoo'tkazuvchanlik sohasidagi chuqur kirishma markazlarining tabiatini o'rganishdan iborat.

**Tadqiqotning usullari.** Dissertatsiyada qo'yilgan vazifalarni hal qilishda impulsli fotoionlash spektroskopiyasi (PPIS), chuqur sathlarni aniqlash uchun Lukovskiy modeli, (BELIV) usuli, mikroto'liqlik zond fotoo'tkazuvchanligi (MW-PC) usullari qo'llanildi. (Yuqorida keltirib o'tilgan ikkita usul Vilnyus universitetining (Litva) ilmiy laboratoriyasida ishlab chiqilgan bo'lib, muallifning o'zi 2017 yil dekabr oyida geterostruktura namunalarini o'lchashda foydalangan).

**Tadqiqotning ilmiy yangiligi** quyidagilardan iborat:

ilk bor 300÷2300 nm diapazonda lazer nuri bilan qo'zg'atishdan foydalangan holda mikroto'liqlik zond va kontaktli fotoo'tkazuvchanlik usullari bilan CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al geterostrukturasida o'tish jarayonlarni kompleks o'lchashdan foydalanib sirt rekombinatsiyasining xarakterli vaqti  $\tau_R=19$  ns ekanligi aniqlangan;

CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al va CdTe-ZnSe yupqa pardali geterostrukturalar asosida 0,4÷3,0  $\mu\text{m}$  to'liqlik uzunligida ishlaydigan fotoqabulqilgichlarni olishning optimal texnologiyalari ishlab chiqilgan;

ilk bor CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al va CdTe-ZnSe geterostrukturalarida yupqa  $d \sim (0,5 \div 0,8)$   $\mu\text{m}$  polikristalli CdTe plyonkalari fotoo'tkazuvchanligining statsionar bo'lmagan o'tkinchi jarayonlari faollashtirish energiyasi  $\sim 1,23$  eV bo'lgan chuqur tutqichlar orqali fototashuvchilarning sirt rekombinatsiyalari bilan bog'liqligi aniqlangan;

ilk bor mikroto'liqlik zond fotoo'tkazuvchanligi (MW-PC) usuli bilan CdTe qatlami sezilarli xususiy fotoo'tkazuvchanligiga ega ekanligi aniqlangan va fotoionlanish energiyalari  $E_{b1} = 0,57$  eV (tugunlararo Te),  $E_{b2} = 0,94$  eV va  $E_{b5} = 1,42$  eV (Cd vakansiyasi),  $E_{b4} = 1,13$  eV (Te vakansiyasi) va  $E_{b3} = 1,05$  eV (Cd va Te nuqtaviy nuqsonlarining kompleksi) bo'lgan ichki nuqsonlarning hajmiy tutqichlari mavjudligi topilgan;

ilk bor CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al va CdTe-ZnSe yupqa pardali geterostrukturalarning fotosezgirlik spektri tashqi elektr maydoniga bog'liqligi o'rganilib, bunda kuchlanish 0 dan 100 V gacha oralig'ida qisqa tutashuv tokining maksimumi ( $I_{qt}$ ) spektrning 0,93÷1,5 eV sohalariga siljishi aniqlangan.

**Tadqiqotning amaliy natijalari** quyidagilardan iborat:

CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al geterostruktura asosidagi fotopriyomnikning sezgirligini boshqarishda Ag va Cu kirishmalar rolining samaradorligini oshirish usullari ishlab chiqilgan;

CdTe-ZnSe geterostrukturasida optik spektral xotira elementi sifatida signallarni yozib olish usuli hamda rentgen, ultrabinafsha, infraqizil nurlanishlarni qayd etuvchi fotodetektor ishlab chiqilgan.

**Tadqiqot natijalarining ishonchliligi:**

zamonaviy o'lchash asboblari va tadqiqot usullarini qo'llanilganligi, eksperimental va hisoblangan ma'lumotlarni boshqa mualliflarning nazariy natijalari bilan muvofiqligi, shuningdek olingan natijalarni zamonaviy fizik modellar asosida tavsiflanganligi bilan asoslangan.

**Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.** Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati kremniy (SiO<sub>2</sub>-Si) tagliklarga olingan CdTe yupqa qatlamlaridagi sirt rekombinatsiya tezligi bilan chuqur tutqichlar spektroskopiyasi haqidagi tasavvurlarni aniqlashtirish va takomillashtirish bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati ZnSe tagliklariga o‘stirilgan ZnSe-CdTe geterostrukturalar samarador yorug‘lik va elektr datchiklarni, SiO<sub>2</sub>-Si taglikka o‘stirilgan CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al geterostrukturalar esa spektral fotosezgirlikka ega xotira elementlarini ishlab chiqarishda qo‘llanilishidan iborat.

### **Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi.**

CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al asosidagi yupqa pardali geterostrukturalarni strukturaviy, elektrofizik, fotoelektrik xususiyatlari va tok o‘tish mexanizmlari bo‘yicha olingan ilmiy natijalar asosida:

CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al geterostrukturani, rentgen nurlarini qayd etish uchun fotodetektor sifatida foydalanish usuli yaratilganligi Namangan muhandislik-qurilish instituti Fizika kafedrasida Davlat ilmiy-texnika dasturlari doirasida 2017-2020 yillarda bajarilgan OT-F2-71. “O‘ta yuqori chastotali elektromagnit maydondagi deformatsiyalangan p-n o‘tish volt-ampere xarakteristikasiga yorug‘likning ta’sirini tadqiq etish” mavzusidagi fundamental loyihada qo‘llanilgan (Namangan muhandislik-qurilish institutining 2021 yil 14 dekabr № 06/10 son ma’lumotnomasi). Ilmiy natijalardan foydalanish, infraqizil fotoqabulqilgichlarni elektrofizik parametrlarini uning analoglari darajasidagi ko‘rsatkichlariga mos keladigan, namunalarini tayyorlash imkonini bergan;

Yuqori vakuumda ( $10^{-6}$  mm simob ustuni) ZnSe yuzasiga kondensatsiya tezligi 0,45 nm/s bilan 1  $\mu$ m qalinlikda CdTe yupqa qatlamlarini o‘stirish natijasida olingan ZnSe-CdTe geterostrukturalar “OLTARIK-INNOVATSIYA” MChJ tashkilotining payvandlash apparatlari va aqlli svetoforlarni ishlab chiqishda yorug‘lik va elektr datchiklar sifatida qo‘llanilgan. CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al, CdTe-ZnSe geterostrukturalar asosida 0,4 - 3,0  $\mu$ m elektromagnit nurlanish diapazonida ishlay oladigan fotodetektorlar va fotodatchiklar yaratish mumkin, ular bilan ultrabinafsha va rentgen nurlarini qayd etishda “OLTARIK-INNOVATSIYA” mas’uliyati cheklangan jamiyatining turli xil texnik ishlanmalarida qo‘llanilishi mumkin (“OLTARIK-INNOVATSIYA” mas’uliyati cheklangan jamiyatining 2021 yil 29 oktyabridagi №25/01-son ma’lumotnomasi). Ilmiy natijalardan foydalanish amalda yorug‘lik va elektr datchiklarning ishchi parametrlarini yaxshilash imkonini bergan.

FOTON OAJda mikroto‘lqinli zond usullaridan foydalangan holda CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al geterostrukturasi vaqtinchalik jarayonlarni kompleks o‘lchash imkoniyati va 300 - 2300 nm oralig‘ida lazer qo‘zg‘alishidan foydalangan holda kontaktli fotoo‘tkazuvchanlik o‘z qo‘llanilishini topdi, bu esa sirt rekombinatsiyasining xarakterli vaqti  $\tau_R = 19$  ns tenglini aniqlashga imkon berdi. 0,4 - 3,0  $\mu$ m spektral diapazonda elektromagnit nurlanishning fotodetektorlarini va CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al va Cd-da yupqa  $d \sim (0,5 - 0,8)$   $\mu$ m polikristalli CdTe plyonkalarining fotoo‘tkazuvchanligi statsionar bo‘lmagan vaqtinchalik jarayonlarini yaratish imkoniyati, geterostrukturalar faollashtirish energiyasi  $\sim 1,23$  eV bo‘lgan chuqur tutqichlar orqali fototashuvchilarning sirt rekombinatsiyasi orqali hosil bo‘lishiga olib keladi. Ular FOTON OAJ tomonidan ishlab chiqarilgan yarimo‘tkazgichli elektron qurilmalarni ishlab chiqarishda qo‘llanilgan (“O‘zeltexsanoat” aksiyadorlik kompaniyasining 2022 yil 21 noyabrdagi 04-3/2405-sonli ma’lumotnomasi). Ilmiy natijalardan foydalanish eksperimental namunalarda

elektron texnik qurilmalarni ishlab chiqarish va ularning elektrofizik parametrlarini yaxshilash imkonini berdi.

**Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi.** Dissertatsiyaning asosiy natijalari 7 ta xalqaro va 5 ta respublika ilmiy-amaliy anjumanlarida muhokama qilingan.

**Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi.** Dissertatsiya mavzusi bo'yicha asosiy natijalar esa 29 ta ilmiy ishda, ulardan 2 tasi patent va 7 tasi dissertatsiya ishlarining asosiy ilmiy natijalarini nashr etish uchun O'zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasi tomonidan tavsiya etilgan ilmiy jurnallarda, shu jumladan 5 ta maqola xorijiy xalqaro jurnallarda chop etilgan.

**Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi.** Dissertatsiya kirish, 4 ta bob, xulosa va foydalanilgan adabiyotlar ro'yxatidan iborat. Dissertatsiyaning hajmi 26 ta rasm, 1 ta jadvalni o'z ichiga olgan holda, 112 betni tashkil etadi.

## DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

**Kirish** qismida dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati asoslangan, tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga mosligi ko'rsatilgan, ilmiy ishlar tahlili, muammoni o'rganilganlik darajasi va tekshirish metodlari keltirilgan. Tadqiqotning ilmiy yangiligi, olingan natijalarning ishonchliligi asoslangan hamda nazariy va amaliy ahamiyati ochib berilgan, dissertatsiya tuzilishi va hajmi tadqiqot natijalarining joriy qilinishi, nashr etilgan ishlar va dissertatsiya tuzilishi bo'yicha ma'lumotlar keltirilgan.

**“p-CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al asosidagi geterostrukturalar va yupqa pardalardagi fotoo'tkazuvchanlik” deb nomlangan birinchi bobida** muammoning holati bo'yicha adabiyotlar sharhi berilgan; A<sup>II</sup>B<sup>VI</sup> guruhlariga mansub yarimo'tkazgichlarning spektral xususiyatlarini o'rganish natijalari tahlil qilingan.

Yupqa parda ko'rinishidagi CdS, CdTe va p-CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al va CdTe-ZnSe geterostrukturalarida fotoo'tkazuvchanlikning hosil bo'lishing mexanizmlari tahlil etilgan. Shu bilan birga, geterostrukturalarda chuqur sathlar to'g'risidagi ma'lumotlar juda kamligi va ularning geterostrukturalarda parametrlari yo'qligi aniqlandi. Shu sababli, CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si va CdTe-ZnSe geterostrukturalarida chuqur markazlarni batafsil o'rganish, barerlarda fotoo'tkazuvchanlik va foto EYuK hosil bo'lishida rol o'ynaydigan sathlarni aniqlashtirish, shuningdek spektral fotosezgirlikni tadqiq etish aktual masala qilib olindi.

Yakuniy qismda umumiy tahlil natijasida dissertatsiyada belgilab olingan tadqiqotlar vazifalari belgilab olish bo'yicha asosnoma keltirilgan.

**“p-CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al va CdTe-ZnSe asosidagi geterostrukturalarni tayyorlashdagi texnologik jarayonlar”** deb nomlangan ikkinchi bobda, p-CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al asosidagi geterostrukturani tayyorlash texnologiyasi bilan p-CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al geterostrukturada Lukovskiy modeli asosida fotoo'tkazuvchanlik spektrlaridan (MW-PC metodi) foydalangan holda chuqur energetik sathlarni aniqlash va teskari yo'nalishdagi vaqtinchalik tok oqimlarining jarayonlariga asoslangan, kuchlanishni chiziqli kuchaytirish yordamida barerni baholash (BELIV metodi) deb yuritiladigan ikki usul keltirilgan.

Rekombinatsiya xususiyatlarini baholash uchun fotoo'tkazuvchanlikning kontaktsiz mikroto'lqinli o'lchashlardan foydalanilgan. Bu erda namunadagi ortiqcha tashuvchilarni qo'zg'atish uchun 1062 nm to'lqin uzunligi bilan qayd etilgan qisqa 400 ps lazer impulsidan foydalanilgan. Ortiqcha tashuvchilarning konsentratsiyasi, namunaning mikroto'lqinlarining uzatish va aks ettirish koeffitsientlarini belgilaydi. Ortiqcha tashuvchilarning yashash vaqti tashuvchining sochilishi bilan bog'liq mikroto'lqinli javob bilan o'tish jarayonlarini qayd etish orqali baholash mumkin. Bu usulda impulsli fotoionizatsiya spektroskopiyasi qo'llaniladi, uning doimiy fotooqim usulidan afzalligi shundaki, qorong'u tok oqimining sirqishi PPISda sig'imli filtr tomonidan oddiygina bartaraf etiladi. Unda fotoqo'zg'atilgan tashuvchilarning rekombinatsiyasi va tutilishi vaqtlarining o'zgarishi fotoionlanishning ma'lum spektral bosqichlari bilan bog'liq korrelyatsiyalanadi va bir vaqtning o'zida boshqariladi. Bundan tashqari, PPIS xona haroratida kontaktsiz rejimda qayd etiladi, shu bois kontakt bilan bog'liq ta'sirlar hisobga olinmaydi. Amalga oshirilgan o'lchovlarda PPI spektroskopiyasi parametrik optik generatorlar (optical parametric oscillator -OPO) bilan jihozlangan femtosekundli (fs) va nanosekundli (ns) lazerlar yordamida qo'zg'atilib amalga oshirilgan. Bunda, nanosekundli Ekspla NT342B qurilmasi, impuls davomiyligi 4 ns va to'lqin uzunligini sozlash diapazoni 210 dan 2300 nm gacha bo'lgan tizim bilan impuls davomiyligi ~ 40 fs va to'lqin uzunligi 350-2500 nm bo'lgan diapazonli sapfir lazeridan iborat Ti asosidagi OPO tizimdan tashkil topgan.

Geterostruktura kontaktlarining sifati va chiziqlilik diapazoni impuls usuli (BELIV) yordamida tokning o'tish jarayonlarini o'lchash orqali tekshirildi. Tokning o'tish jarayonlari Agilent DSO6102A ostsilografning chiqish qismiga 50 Om yuklanishni kiritishi yordamida qayd etiladi. Bundan tashqari, o'lchov sxemasi ketma-ket ulangan, chizikli ortib borayotgan kuchlanish generatori (GLIV) va sinov ostidagi diodning tartibga solinadigan chiqish quvvatidan iborat. Vaqtinchalik tok oqimlari o'nlab pA dan o'nlab mA gacha bo'lgan vaqtlari 100 ns dan 10 ms gacha bo'lgan GLIV impulslari yordamida o'lchanadi, o'lchovlar esa qo'shimcha oqim kuchaytirgichsiz amalga oshiriladi. Har xil materiallarning birikmalari, sohalari va ayniganlik zonalari tekshirilishi mumkin. To'siqning sig'im oqimini o'lchashning sezgirliги LIV impulslarining tezligini o'zgartirish orqali o'zgarishi mumkin. Bunga qo'shimcha ravishda, agar kerak bo'lsa, uni kuchaytirgich yordamida kuchaytirish mumkin. Statistik shovqinni kamaytirish uchun odatda o'rtacha 10-100 o'tish jarayoni amalga oshiriladi. BELIV usulini amalga oshirish uchun GLIV signalining chiziqlilik muhim ahamiyatga ega. Shuning uchun, ostsilografning ikkinchi kanali yordamida bir vaqtning o'zida o'lchangan LIV signali va uning hosilasi doimo qayd etiladi. O'lchov tizimi kompyuter tomonidan boshqariladi.

Dissertatsiyaning "**Chuqur aralashma sathli p-CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al va CdTe-ZnSe asosidagi geterotuzilmalarning fotoelektrik xususiyatlari**" nomli uchinchi bobida turli yarimo'tkazgich strukturalar yuzasiga olingan CdTe qatlamlarni elektrofizik xususiyatlari hamda qisqa tutashuv toki va fotoo'tkazuvchanlik spektrlarini tahlilini soddalashtirish uchun yupqa qatlamlarni yutilish chegaralari ko'rib chiqilgan. Ushbu qatlamlarni bir necha soddada fenomenologik modellari ko'rilgan. Bobning oxirida polikristall yupqa qatlamlarning yorug'likni xususiy va

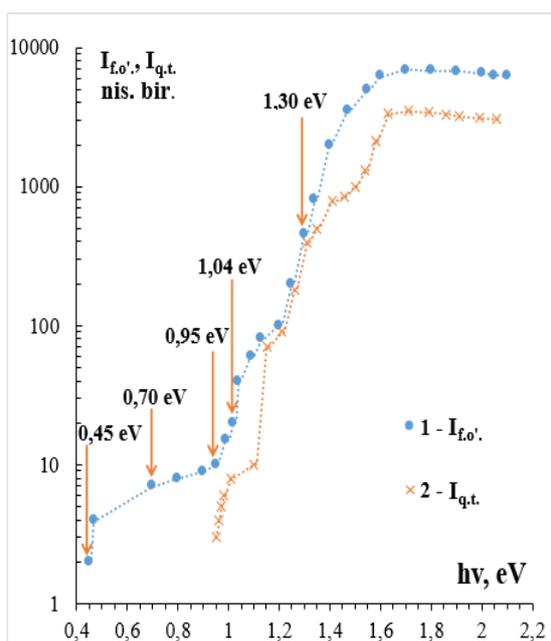
aralashma yutilish sohalaridagi fotosezgirlikni hosil bo'lish nazariyasi va real modelini yaratishga harakat qilingan.

CdTe-ZnSe tuzilmalaridagi fotosergirlikni aniqlash uchun <Ag> bilan legirlangan CdTe qatlamni qisqa tutashuv tokini spektral xarakteristikasi o'lchanadi va chuqur sathlarni ionizatsion optik energiyasi xisoblanadi.

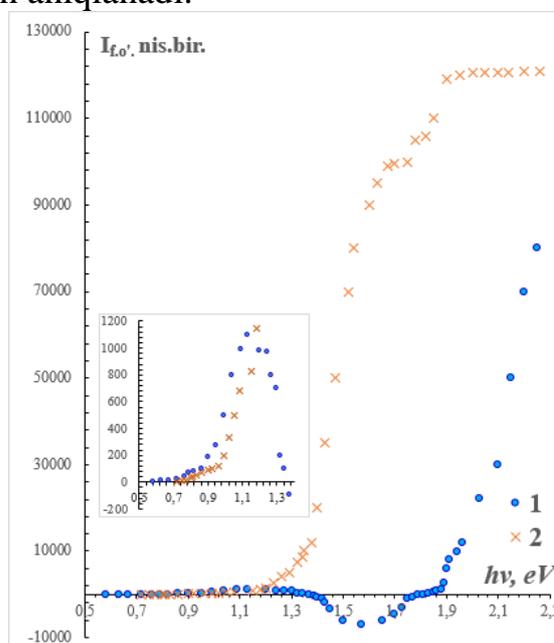
CdTe yupqa qatlamni fotosezgirliги yorug'lik kvant energiyasining  $h\nu = 0.45 \div 2.7$  eV oralig'ida bo'ladi (1-rasm.)

CdTe qatlamidagi foto EYuK zonalararo va ionizatsion optik energiyasi 1.04; 1,15; 1,32 eV bo'lgan chuqur sathlardan uyg'otilgan tok tashuvchilar hisobiga hosil bo'ladi va butun tsink selen lyuminesentsiya chiziqlarini o'z ichiga qamrab oladi (1-rasm, 2-egri chiziq).

<Ag> bilan legirlangan CdTe yupqa qatlamlarini fotosezgirliги frontal yoritish orqali doimiy fotoo'tkazuvchanlik rejimida spektrlarni o'lchash orqali aniqlanadi. 2-rasmda 1-egri chizig'i kadmiy tellur yupqa qatlamni fotosezgirliğini qutbi, qo'yilgan maydon qutbi bilan mos kelishini xarakterlaydi; 2-egri chizig'i esa qutblar qo'yilgan maydonga qarama-qarshi bo'lgan holatini xarakterlaydi. CdTe yupqa qatlamlaridagi fotokuchlanish tashqaridan qo'yilgan elektr maydon yo'nalishiga bog'liq holda fotoo'tkazuvchanlikni o'lchash yo'li bilan aniqlanadi.



1-rasm. CdTe-ZnSe geterostruktura ustidagi CdTe <Ag> yupqa qatlamlarni frontal yoritishdagi  $I_{f.o'}$ ,  $I_{q.t}$  spektrlari.



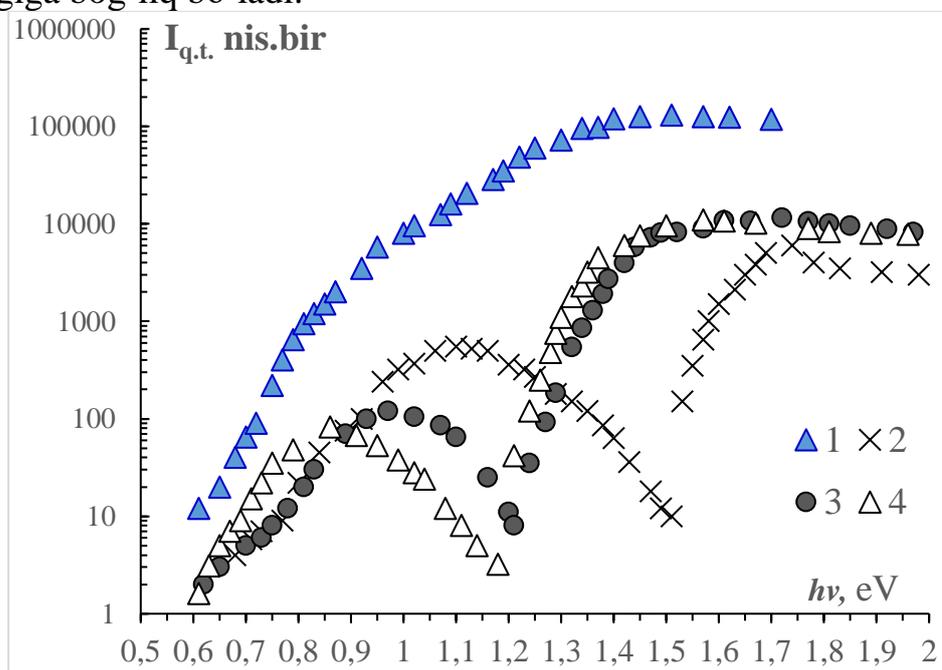
2-rasm. ZnSe ustiga olingan CdTe <Ag> yupqa qatlamlarni frontal yoritilganidagi fotokuchlanish spektrlari: 1- $\times$  fotokuchlanish kutblanganligi maydon kutblanganligi bilan ustma ust va 2- $\bullet$  qarama qarshi bo'lganida.  $U = 18$  V.

Qo'yilgan elektr maydon yuqori fotokuchlanish hosil bo'lishiga olib keladi. Bu esa kadmiy tellurning yutilish chegara sohasida yuqori fotosezgirlikni hosil bo'lishiga va bu o'tkazuvchanlik belgisini o'zgarishiga olib keladi. Yupqa qatlamda hosil bo'lgan fotosignal yo'nalishi foto EYuK yupqa qatlam belgisi bilan mos tushadi (1-egri chiziq). Bu shu bilan izohlanadiki, qo'yilgan elektr maydon nosimmetrik to'siqlar sohasidan zaryad tashuvchilarni tortib oladi va natijada foto EYuK ortib ketadi.

CdTe va ZnSe sirtida to‘siqlarni boshqarish orqali yoruglik kvant energiyasini 1,4; 1,7 eV va 1,9; 2,3 eV ikkita sohasida foto EYuK ni bir xil va har xil belgili olish mumkinligini ko‘rish mumkin (2-rasm). CdTe asosidagi fotosezgir yupqa qatlamlarni muhim xususiyatlardan biri, uning avtonom xarakterga egaligidir, shuning uchun yupqa qatlamli optoelektronikada alohida qiziqish uyg‘otadi ayniqsa elektromagnit nurlanishning keng diapazonida ultrabinafsha va rengen nurlanishlari asosida ishlaydigan energiya uzgartirgichlar sifatida qo‘llash mumkin.

Yupqa qatlam ko‘rinishidagi p-CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si strukturasi spektral fotosezgirlikni tashqi elektr maydon ta‘siri ettirilgan va u o‘chirilgandan keyingi holatini ko‘rib chiqamiz (3-rasm.).

Bu spektral fotosezgirlikning qoldikli xarakterini ochib beradi. Statsionar  $I_{q.t.} = 300$  V bilan fotosezgirlik 100 V (egri chiziq 1) dan 1000 V gacha (2-egri chiziq) ortadi. Tashqi maydon ta‘sirini olib tashlagandan so‘ng, fotosezgirlik 25 kun ichida asl qiymatiga (3, 4-egri chiziqlar) qaytmaydi. Qoldiq o‘tkazuvchanlik holatida bo‘lgan geterostrukturaning fotosezgirlikni asl holatiga qaytarish, bir necha millisekund davomiyligidagi teskari kuchlanish impulsini qo‘llash orqali amalga oshiriladi. Xotiraning bunday “o‘chirilishi” qoldiq o‘tkazuvchanlikning maydonni o‘chirilishi bilan izohlanadi. Maksimal fotosezgirlik elektr maydonining kattaligi va intensivligiga bog‘liq bo‘ladi.

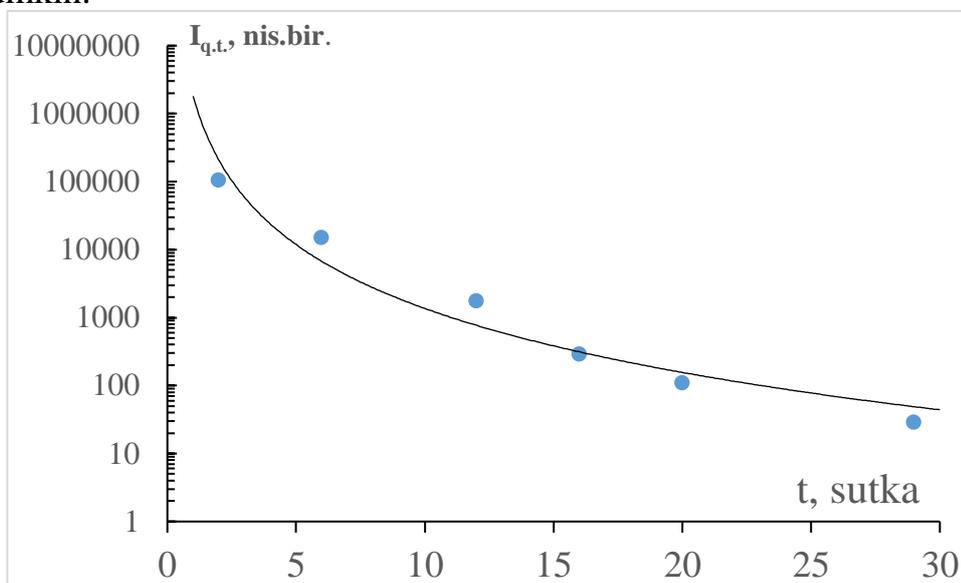


**3-rasm. CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si strukturasi 300 V kuchlanish bilan zaryadlangandan va qorong‘ida tutib turilgandan so‘ng vaqtiga nisbatan bog‘lanish spektrlari. 1 - zaryadlangandan so‘ng, 2 - 6 kundan keyin, 3 - 19 kundan keyin, 4 - zaryadlashdan oldingi bog‘lanishlarning egri chiziqlari.**

Kuzatilgan qoldiq fotosezgirlikning fizik tabiatini va qo‘llaniladigan tashqi doimiy elektr kuchlanish ta‘siri p-CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al geterostrukturada sodir bo‘ladigan elektron o‘tkazish hodisasining mexanizmini sifatli tavsiflash uchun quyidagi model ko‘rib chiqiladi. Bunda statsionar tok - bu CdTe yarimo‘tkazgichning o‘tkazuvchanlik zonasidan SiO<sub>2</sub> oksidi qatlami orqali Si yarimo‘tkazgichning o‘tkazuvchanlik zonasi bilan yarimo‘tkazgichning o‘tkazuvchanlik zonasidan dielektrikda joylashgan chuqur sath va ularning

chegasidagi tutqichlarga tunnel effekt orqali o'tayotgan elektronlar oqimidan iborat. Yorug'lik ta'sirida ushbu sathlardan ajralib chiqadigan tok tashuvchilari, uzoq vaqt saqlanib turadigan o'tkazuvchanlikka o'z hissasini qo'shadi. Bunga sabab, elektronlarning sirt holatlarida tutilib qolishi bilan ortib ketadigan assimetrik potentsial to'siqni, tashuvchilarning rekombinatsiyasiga to'sqinlik qilishidir. Bunda, potentsial to'siq faqat sirt holatlaridagi zaryad tufayli yuzaga keladigan bir hil yarimo'tkazgichdan farqli o'laroq, p-CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al geterostrukturasi kontakt materiallarni chiqish ishlarining farqi tufayli qo'shimcha ravishda ortadi. Shu sababli geterostrukturada optik spektral xotira hodisasi ko'proq namoyon bo'ladi.

Shunday qilib, elektr kuchlanishining kattaligini o'zgartirib, namunani qorong'u tok va maksimal qoldiqli o'tkazuvchanlik oqimi o'rtasidagi har qanday holatga o'tkazish mumkin. p-CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al geterostrukturani nafaqat signallarni saqlashga qodir optoelektronik spektral xotira sifatida ishlatilishi mumkin, balki ularni yig'ib borish ham mumkin. Bundan tashqari, ushbu spektral xotiraning o'ziga xos xususiyati, signallarni tashqi kuchlanishni qo'llamasdan qayd eta olish olish qobiliyatidir, chunki p - CdTe yuqori fotosezgirlikka ega va uzun to'lqinli yorug'lik nurlanishining (0,5 - 2,7 μm) keng diapazonida joylashgan ma'lumotlarni qayd eta olishi mumkin.



4-rasm. Vaqt o'tishi bilan p-CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al geterostrukturaning fotosignalining so'nish egri chizig'i:  $\lambda = 0,85 \text{ mkm}$ ;  $h\nu = 1,5 \text{ eV}$ .

Dissertatsining **p-CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al asosida olingan geterotuzilmalarda fotoo'tkazuvchanlik kinetikasi** nomli to'rtinchi bobida bug' fazali epitaksiya metodi bilan Si taglikga o'stirilgan SiO<sub>2</sub> yuzasiga 1μm qalinlikdagi p-CdTe polikristall yupqa qatlamlardagi sirt rekombinatsiya tezligi va chuqur tutqichlar spektroskopiyasi haqida ma'lumotlar keltirilgan. Ikkita nusxadagi qatlamlar tekshirilgan, ya'ni yorug'lik nurlanishi uchun shaffof, silliqlangan saphir tagliklarga o'rnatilgan alohida CdTe qatlamlari bilan CdTe da yon yo'nalishda omik kontaktli p-CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al geterotuzilmalar tanlab olingan. CdTe qatlamlarda sirt rekombinatsiya tezligini baholash va p-CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al geterotuzilma uchun chuqur sathlar spektrini qayd etib borishda to'lqin uzunligi bo'yicha impuls ko'zg'alishlarni muvofiqlashtiruvchi fotoo'tkazuvchanlikni o'tish jarayoni bilan mikroto'lqinli zond metodikasidan foydalanildi.

Ortiqcha zaryad tashuvchilar parchalanish o'tish jaraenini kontaktsiz qayd etish fotoo'tkazuvchanlikni mikroto'lqinli zond (MW-PC) metodi orqali o'tkazildi.

Ortiqcha zaryad tashuvchilarni qo'zg'atish to'lqin uzunligini davomiyligi 4ns bo'lgan lazer impulslari yordamida amalga oshirildi. Zaryad tashuvchilarni qo'zg'atuvchi to'lqin uzunligi, bir vaqtning o'zida chuqur tutqichlar to'lib qolmasligi uchun, fotonlarning kichik energiyasiga to'g'ri keladigan spektral diapazondan olib boriladi, bunda tutqichlarning har biri qayd etiladigan foto-javobga ega bo'ladi.

Mikroto'lqinli (MW) o'lchash sistemasini sezgirligini orttirish uchun to'lqin sistema MW - ko'prikkaga ega. Zaryad tashuvchilarni qo'zg'otish 210 dan 2300 nm gacha bo'lgan to'lqin uzunlikdagi optik parametrik generatorlar sistemasi Ekspla NT342dan foydalanilgan holda amalga oshirildi. O'lchanadigan namuna 20-22 GHz chastotali kuchaytirgich tirqishiga joylashtiriladi, lazer impulsi esa CdTe materialida  $\sigma(t) = \sigma_0 + \Delta\sigma(t)$  fotoo'tkazuvchanlikni hosil qiladi. Vaqtinchalik fotoo'tkazuvchanlik MW tsirkulyator bilan ajratilgan MW detektor signalini o'zgartiradi. MW-PC signalni  $U_{MW-PC}(t) \sim \Delta\sigma(t)/\sigma_0$  amplitudasi ortiqcha zaryad tashuvchilar  $\Delta n(t) \sim \Delta\sigma(t)$  kontsentratsiyasiga proporsionaldir. O'zgaruvchan MW-PC jarayoni, fotoionizatsiya jarayonlarida ishtirok etuvchi turli chuqur sathlarga tegishli, elektron o'tishlar hisobiga erkin zaryad tashuvchilar zichligining o'zgarishini tasvirlaydi. Fotoionizatsion javob, tushayotgan lazer nurlarining to'lqin uzunligiga bog'liq bo'lgan elektron-foton o'zaro ta'sir kesimga bog'liq bo'ladi.

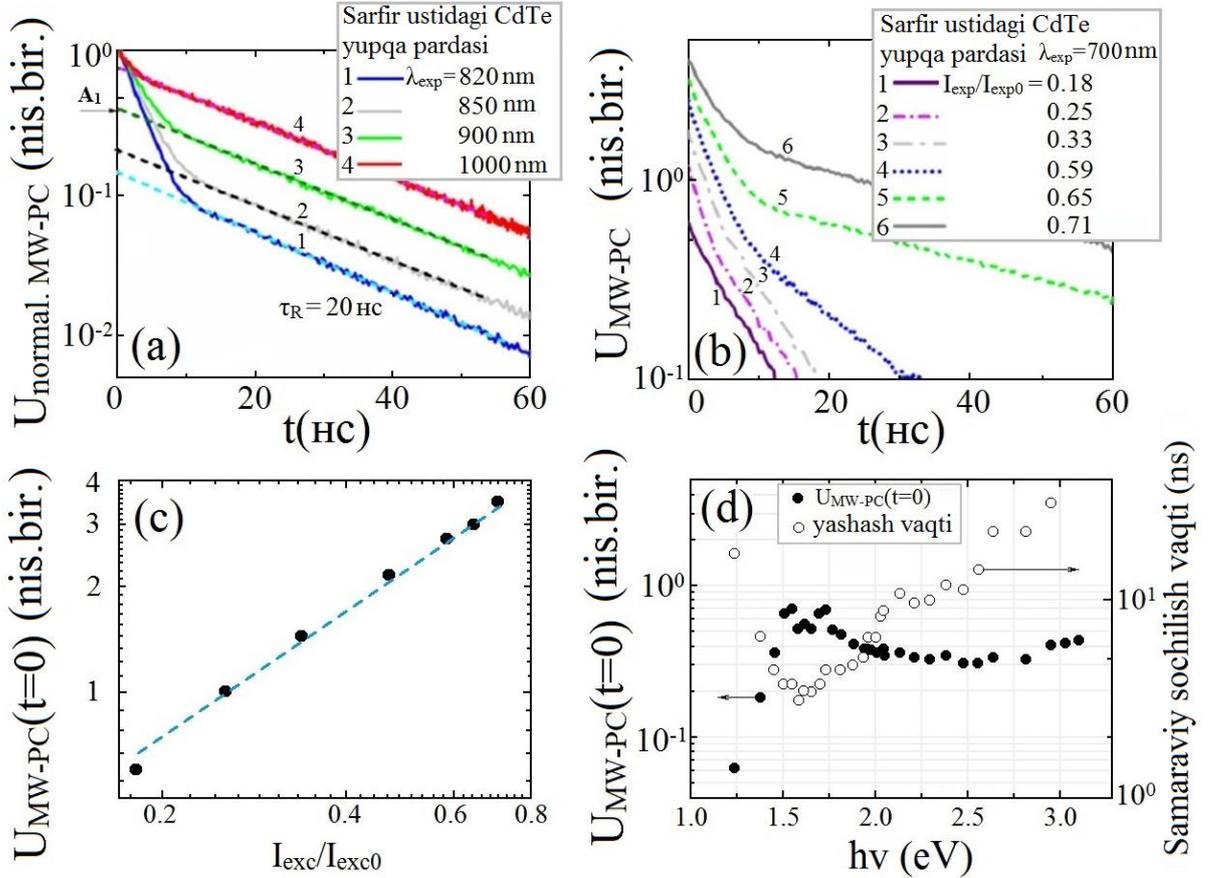
Odatda fotoionizatsiya spektri MW-PC o'tkazuvchanlik javoblarning pog'anasimon tuzilishini o'z ichiga olib, kalibrlangan kvant miqdori va tushayotgan foton energiyasiga bog'liq bo'ladi. Ushbu spektr, chuqur sathlardagi fotoionizatsiya energiyasini qizil chegarasini baholash uchun Lukovskiy modelidan foydalanib tahlil qilinadi. Lukovskiy modeli,  $E_d$  -ning bitta parametridan foydalanib elektron fotonning tutilish kesim yuzasini tushuntirish uchun eng sodda yaqinlashishdir.

Lazer impulslarini turli spektrlarida ushlangan zaryad tashuvchilar fotoionizatsiyasi chuqur tutqichlar parametrlarini va ularni to'ldirilish holatini aniqlashga yordam beradi. Lukovskiy modelida  $\sigma_{p-s}$  kesim quyidagicha ifodalanadi:

$$\sigma_{p-s}(h\nu) = \frac{BE_d^{1/2}(h\nu - E_d)^{3/2}}{(h\nu)^3} \quad (1)$$

bu erda  $V$  multiplikativ koeffitsientdir.  $\alpha(h\nu) = \sigma_{p-s}(h\nu)n_d^0$  bo'lganida  $h\nu$  fotonlar energiyasi uchun  $\alpha(h\nu)$  yutilish koeffitsientini o'zgarishi, ushlangan zaryad tashuvchilar  $n_d^0$  zichligiga proporsional bo'ladi.  $n_d^* = \sigma_{p-s}(h\nu)n_d^0 F(h\nu)$  fotoionlashgan zaryad tashuvchilar zichligi tushayotgan fotonlar  $F(h\nu)$  sirt zichligi asosida MW - zond orqali nazorat qilinadi. Keyin  $N_d$  tutqichlar zichligi  $\alpha(h\nu)$  yutilish koeffitsienti spektri bo'yicha mustaqil holda baholanadi.  $n_d/N_d$  to'ldirish koeffitsienti,  $\alpha(h\nu)$  ni  $F|_{h\nu}$  nisbatan yoki MW-PC signalini yuqori qiymatini kombinatsiyalashgan o'lchashlari orqali nazorat qilinadi va ushbu xarakteristikalarini to'yinishi  $N_d$  tutqichlarni to'liq fotoionlanishini bildiradi.

Alohida CdTe namunalarida, belgilangan va nisbatan past ( $I_{exc}/I_{exc0} = 0,2$ ) qo'zg'alish zichligi uchun qayd etilgan MW-PC ning vaqtinchalik jarayonlari 5.a - rasmda ko'rsatilgan. 5.a-rasmdan shunday xulosaga kelish mumkinki, MW-PC vaqtinchalik shakli, qo'zg'alish to'liqin uzunligi ortishi bilan ikki komponentlidan deyarli bir eksponentialga o'zgaradi. Bu sirt rekombinatsiyasining namoyon bo'lishining aniq belgisidir. Bu ikki tomoni ochiq yuzalarga ega bo'lgan juda yupqa namuna uchun juda mos keladi.



**5-rasm. Qo'zg'alish to'liqin uzunligining o'zgarishi (qo'zg'alishning past qiymatlarida ( $I_{exc}/I_{exc0} = 0,2$ ) - (a) va qo'zg'alish zichligi yuqori ( $\lambda_{exc} = 700$  nm) - (b) salfirda o'rnatilgan CdTe yupqa pardasida  $T = 300$  K da qayd etilgan vaqtinchalik MW-PC jarayonlari (c) -  $t = 0$  da 1000 nm to'liqin uzunligidagi qo'zg'alish zichligiga bog'liq MW-PC signali (d) -  $t = 0$  dagi MW-PC signalining variatsiyalari va CdTe yupqa pardasida qo'zg'alish zichligini ( $I_{exc}/I_{exc0} = 0,2$ ) qiymatida qayd etilgan, sochilishni boshlangich bosqichidagi tashuvchilarning, samaraviy yashash vaqtining so'nishi.**

Kontakli fotoo'tkazuvchanlikni o'zgaruvchan jarayonlari qo'zg'atuvchi to'liqin uzunligiga bog'liq holda qo'shimcha ravishda o'lchangan. Bu o'lchashlar shuningdek, 50 Omli yuklanish rezistorida fototok va fotorezistorni elektrod oraliq'idagi qo'zg'atish yo'li bilan amalga oshiriladi.

Fototok va MWning javob signali Tektronix 1 GGts TDS -5104 ossillografi yordamida yozib boriladi.

Ushbu hodisa samarali qo'zg'alish chuqurligini asosiy modasi  $A_1$  amplitudasining pasayishi bilan izohlanib, yutilish koeffitsientiga nisbatan teskari bo'lgan  $\alpha$  kattalikdir. Taxminan 800-1000 nm to'liqin uzunligi diapazonida, CdTe materialining yutilish qiymatini chetida qo'zg'atuvchi foton energiyasi bilan yutilish

koefitsienti keskin ortadi. Bunda CdTe nanostrukturalariga xos bo'lgan yutilish koefitsientining qatlam qalinligiga bog'liqligiga e'tibor bermaslik mumkin, chunki 1 mikron qatlam qalinligi, hajmiy materialning xususiyatlariga ega bo'lish uchun yetarlidir.

Plastina  $x$  chuqurligining koordinatasi bo'ylab  $t$  vaqt bilan tashuvchilar zichligining o'zgarishi, quyidagi munosabat bilan tavsiflanadi:

$$n(x,t) = n_0 \sum_{m=1}^{\infty} A_m e^{-(D\eta_m^2 + 1/\tau_R)t} \sin\left(\eta_m x + \arctg \frac{D\eta_m}{s}\right) \quad (2)$$

bu erda  $n_0$  - yorug'lik tomonidan kiritilgan ortiqcha tashuvchi juftlarning konsentratsiyasi,  $A_m$  - sochilish rejimining fazoviy chastotasi  $m$  uchun tayinlangan so'nish amplitudasi,  $\tau_R$  - hajmiy rekombinatsiyaning yashash vaqti,  $D$  - tashuvchilarning ambipolyar tarqalishi koefitsienti,  $s$  - sirt rekombinatsiyasi tezligi.

Vaqtinchalik jarayonlarning eng yuqori amplitudalari qo'zg'alish intensivligi bilan chiziqli o'sishni ko'rsatadi (5.c-rasm), bu bir xil qo'zg'alish ostida chiziqli rekombinatsiya jarayonlarini nazarda tutadi, dastlabki bosqichda tashuvchilarning sochilishi (5.a-rasm) bir xil bo'lmagan qo'zg'alishda eksponentsial bo'lmagan sochilishi jarayonini ko'rsatadi. Qatlam  $d$  qalinligi bo'yicha va uning eng yuqori qiymatiga ( $t=0$  da) normallashtirilgan tashuvchi juftlarning o'rtacha konsentratsiyasi vaqt o'tishi bilan o'zgarishi quyidagicha ifodalanadi

$$\frac{\langle n(t) \rangle_d}{\langle n(0) \rangle_d} = \sum_{m=1}^{\infty} \langle A_m \rangle_d e^{-(D\eta_m^2 + 1/\tau_R)t} \quad (3)$$

Qarama-qarshi sirtlarda rekombinatsiyaning teng tezliklari ( $s_1 = s_2 = s$ ) uchun fazoviy chastotalarni quyidagi transsendental tenglamani yechish orqali aniqlash mumkin.

$$ctg(\eta d) = \eta d \frac{D}{sd}. \quad (4)$$

Sirtning rekombinatsiya tezligining bir xil qiymatlari haqidagi taxmin, ochiq yuzalarga ega bo'lgan CdTe namunasi uchun mos kelishining ehtimoli yuqori bo'lishi mumkin. Keyin  $m$ -chi so'nish uchun  $A_m$  cho'qqi amplitudasining ifodasi quyidagicha olinadi.

$$\langle A_m \rangle_d = \frac{8}{(\eta_m d)^2 \left( 1 + \left( \frac{D}{sd} \right)^2 (\eta_m d)^2 + 2 \frac{D}{sd} \right)^{\frac{\alpha d/2}{1 + (\alpha d/\eta_m d)^2}} \left( ctg \frac{\alpha d}{2} + \frac{D\alpha}{s} \right). \quad (5)$$

Vaqtinchalik asimptotada o'lchangan samarali parchalanish vaqti quyidagicha ifodalanadi

$$\tau_{eff}^{-1} = \tau_R^{-1} + \frac{D(\eta_1 d)^2}{d^2} \quad (6)$$

Sirtning rekombinatsiya tezligining qiymatlarini olish uchun parametrlari  $s$  i va  $D$  bo'lgan ikkita tenglama (5) va (6) tenglamalari olinadi.

Shuning uchun,  $\eta_1$  asosiy sochilish modasida tegishli bo'lgan  $A_1$  cho'qqisining amplitudasi (5.a-rasm) bir o'lchovli diffuziya yaqinlashuvi yordamida o'lchovsiz

sirt rekombinatsiya  $S = sd/D$  parametrining funksiyasi sifatida modellashtirilishi mumkin.  $\tau_{eff}(\eta_1(s), \tau R)$  yashash vaqtini asimptotik so‘nishni  $A_1(\eta_1(s))$  ishonchli

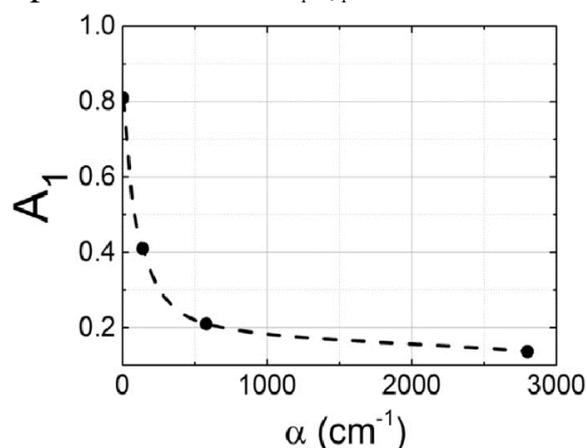
baholash uchun kamida ikkita qo‘zg‘alish to‘lqin uzunligidan foydalanish kerak: bir jinsli bo‘lmagan boshlang‘ich qo‘zg‘alish rejimidan foydalangan holda asosiy parchalanish modasi  $\eta_1$  amplitudasining ( $A_1(\eta_1(s))$ ) sezilarli pasayishi 5.a- rasmda aniq ko‘rsatilgan, bir jinsli qo‘zg‘alish bilan  $\tau_{eff}$  eng aniq o‘lchanish mumkin.

Ma‘lum  $\alpha d$  va  $D$  larni  $A_1$  orqali baholash bilan  $s$  parametr to‘g‘ridan-to‘g‘ri olinadi. Yutilish koeffitsientini  $\alpha$  funksiyasi sifatida olingan  $A_1$  qiymatlar 6-rasmda ko‘rsatilgan.  $p$  – CdTe dagi

$N_A$  aktseptor konsentratsiyasi ortiqcha tashuvchilar zichligidan oshib ketadigan past qo‘zg‘alishda,  $D$  kovaklarning qiymati  $D_p = 2 \text{ sm}^2/\text{s}$  ga yaqinlashadi. Yuqori darajadagi qo‘zg‘alish uchun,  $D_n = 25 \text{ sm}^2/\text{s}$  dan foydalanilganda  $D \approx 3,7 \text{ sm}^2/\text{s}$  olinadi. Ushbu  $s = 2 \times 10^7 \text{ sm/s}$  olingan parametrlar qiymatini ishda juda yaqin deb faraz qilamiz. Bunday katta  $s$  qiymatlar diffuziya bilan chegaralangan sirt rekombinatsiyasi o‘zining oniy yashash vaqti  $\tau_D = d_{eff}^2 / \pi^2 D$  bilan sodir bo‘lishi mumkinligini anglatadi. Yashash vaqtlarini bunday lahzali 5 ns hisoblangan qiymatlari 5- rasmda ko‘rsatilgan qiymatlarga juda yaqindir.  $d_{eff} \approx \alpha^{-1}$  dagi bir jinsli bo‘lmagan qo‘zg‘alishda 800 nm teng.

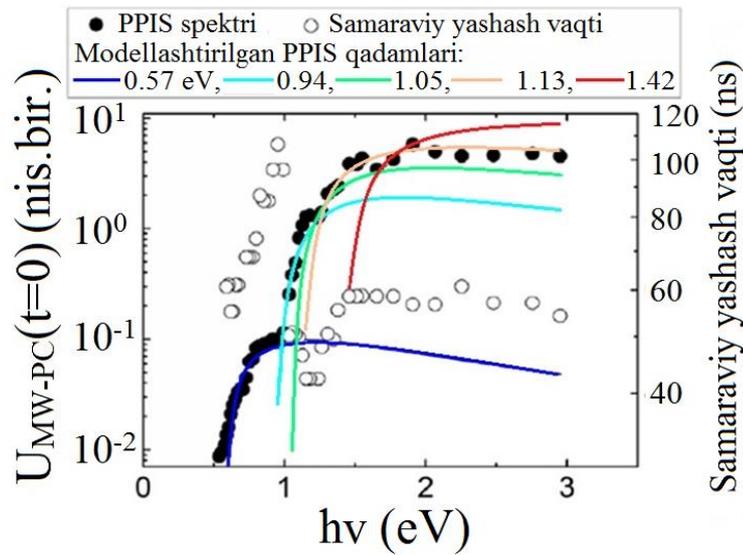
Sirt rekombinatsiyasi bilan aniqlangan va turli qo‘zg‘alish chuqurliklari uchun olingan bir qator vaqtinchalik jarayonlarga xos bo‘lgan yana bir xususiyat (5.a-rasm) asimptotik so‘nish fazasidagi deyarli o‘zgarmas bo‘lgan samarali yashash vaqtlaridir (5.a-rasmda bir xil sochilishning egri chizig‘i sifatida ko‘rib chiqiladi). Unda yashash vaqtining ishonchli rekombinatsiya qiymatlari deyarli bir jinsli qo‘zg‘alish ( $\lambda_{exc} = 1000 \text{ nm}$  uchun)da qayd etilgan vaqtinchalik jarayonlardan olinishi mumkin. Shunday qilib, 19 ns qiymati olingan.

CdTe yupqa qatlamida kontaktli fotoo‘tkazuvchanlik metodi bilan o‘lchangan sirt rekombinatsiyasini ta’siri aniq kuzatilmadi. Buni elektrodlar oralig‘idagi maydon hamda yondagi kontaktlar maydoni bilan taqqoslanganda nisbatan katta emasligi bilan tushuntirish mumkin. Kontaktlar ostidagi yuza CdTe metall to‘siqlar shaklida bo‘lib, shu bilan bir qatorda kontaktlardan zaryad tashuvchilar injeksiya bo‘lib sirdagi tutqichlarni yetarli darajada to‘ldiradi.  $p$ -CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al strukturasi chegaraning boshqa yuzasida, ya’ni SiO<sub>2</sub>- dagi turg‘un tizimlashgan zaryad sirt rekombinatsiyasini so‘ndirish uchun xizmat qiladi.



**6-rasm.  $A_1$  asosiy so‘nish modasi amplitudasining eng yuqori qiymatlari turli qo‘zg‘alish to‘lqin uzunliklarida o‘lchanadigan CdTe uchun  $\alpha$  yutilish koeffitsienti funksiyasi sifatida**

Tushayotgan kvant miqdorini bir xilligini saqlagan holda va qo'zg'aluvchi foton energiyasini o'zgarishi yo'li bilan 300 K da CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al tuzilmasidagi PPIS spektrlari 7-rasmda ko'rsatilgan.



**7- rasmda SiO<sub>2</sub>-Si taglikka xona temperaturasida ustirilgan CdTe polikristall yupqa qatlamlarida fotoo'tkazuvchanlikni o'tish jarayonini qayd etish yo'li bilan fotoionlashishni impuls spektri keltirilgan. CdTe materialida olingan fotoionlashish chegaraviy energiyasining qiymati turli nuqtaviy nuqsonlarga tegishli bo'lib adabiyotlar malumotlariga taqqoslandi, ya'ni 0,57 eV-Tei, 0,94 eV- (0,8 eV) V<sub>Cd</sub>, 1,13 eV-V<sub>Te</sub>, 1,42 eV-V<sub>Cd</sub> va 1,05 eV Cd-qatlamdagi Te -notuzilmaviy nuqson.**

7- rasmda PPIS uchun 5 ta qadamni keltirib chiqarish mumkin. Ushbu qadamlar Lukovskiy modelidan foydalanib olingan. 7-rasmdagi uzluksiz chiziqlar, chegaraviy fotoionlashish enegiyalarini turli qiymatlariga tegishli ekanligini va tushayotgan fotonlarning soni bir xil ekanligini bildiradi. Bu chiziqlar fototokning spektral o'zgarishi bilan yetarli darajada yaxshi mos tushadi. Samaraviy tok tashuvchilarning yashash vaqtlarini variatsiyalari (7-rasmda o'ngdagi shkala) bir necha spektral qadamlar bilan o'zaro bog'liq ravishda monoton bo'lmagan o'zgarishga olib keladi.

$E_{b1} = 0,57$  eV sathda fotoionlashgan energiya chegarasining eng kichik spektral qadami, zaryad tashuvchilarning yashash vaqtlarini ortishiga o'zaro bog'liq bo'ladi. Bu shuni bildiradiki, zaryad tashuvchilarni fotoinduksiya o'tishi tutqichlarni foto-neytrallashgan holatga olib keladi, bu esa zaryadlangan tutqichlarni ortishiga olib keladi.

Keyingi spektral qadam  $E_{b2} = 0,94$  eV sathdagi fotoionlashishning zaryad tashuvchilar yashash vaqtlarini kamayishi bilan o'zaro bog'liqligini ko'rish mumkin (5- rasm). Ushbu tutqichlarning fotoionlashishi bildiradi, bu esa ularni bo'shagandan keyin aktiv markazlarga aylanib qolishidan darak beradi. PPISning qolgan ruxsat etilgan qadamlardagi aktivatsiya energiyalari  $E_{b3} = 1,05$  eV,  $E_{b4} = 1,13$  eV va  $E_{b5} = 1,42$  eV ga teng bo'lgan sathlarda tashuvchilarning yashash vaqtini o'zgarishini ko'rish mumkin. Bu shu bilan tushuntiriladiki, eng chuqur tutqichlar ( $E_G - E_{b1} = 0,93$  eV va  $E_G - E_{b2} = 0,56$  eV) o'zini yetakchi bo'lgan tashuvchilarni tutib qoluvchi markazlardek tutadi. Ushbu hajmiy tutqichlar uchun olingan fotoionlashish energiyalarning chegaraviy qiymatlari, adabiyotlar tahliliga ko'ra CdTe

materialidagi turli nuqtaviy nuqsonlarga tegishli deb topilgan. Bunda PPIS qadamlarining belgilanishlari keltirilgan:  $E_{b1} = 0,57$  eV tugunlar aro nuqson Te<sub>i</sub>,  $E_{b2} = 0,94$  eV Cd vakansiyasiga  $0,94$  eV- ( $0,8$  eV) ( $V_{Cd}$ ),  $E_{b3} = 1,05$  eV Cd dagi Te antitugun nuqsoniga,  $E_{b4} = 1,13$  eV Te( $V_{Te}$ ) vakansiyasiga,  $E_{b5} = 1,42$  eV ham Cd ( $V_{Cd}$ ) vakansiyasiga, tegishli ekanligi aniqlandi. Ko'rsatilgan tutqichlarning fotoionlashish energiyasining chegarasi  $E_s = 1,23$  eV sirt tutqichlarining energiyasidan farq qiladi.

## XULOSA

1. Birinchi marta dielektrikda indutsiyalangan tartibli elektr zaryadlar bilan bog'liq p-CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al yupqa qatlamli gererostrukturalarda yaqqol ifodalangan samaraviy xotira eksperimental kuzatildi hamda CdTe da yorug'lik nurlanishini uzun to'lqinlar chegarasining keng diapozonida ( $0,5 \div 2,7$   $\mu$ m) signallarni qayd etishga imkon beruvchi spektrning infraqizil sohasi yaqinida ( $700 \div 1000$  nm) yuqori spektral fotosezgirlikni ta'minlovchi chuqur aralashma sathlar aniqlandi.

2. CdTe-ZnSe geterastrukturasi asosida signallarni yig'ish samaradorligini 80% gacha orttiruvchi fotodetektor yaratildi va u elektromagnit nurlanishlarni ( $0,4 \div 3,0$   $\mu$ m) keng diapozonida selektivlikni saqlagan holda spektral fotosezgirlikni boshqara olishi hamda uni tibbiyotda foydalanish mumkinligi ko'rsatildi.

3. p-CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al geterostrukturasi yorug'lik yutilishining kirishmaviy sohasida tashqi ta'sirlar ostida spektral fotosezgirlikni boshqarishni ta'minlovchi energiya aktivatsiyasi  $0,7$  eVga teng bo'lgan (Pul-Frenkel effekti bo'yicha) chuqur sathning yaqqol o'zgarishi aniqlandi.

4. Birinchi marta, CdTe polikristali yupqa qatlamlarida sirt rekombinatsiyasi ta'sirini kamaytiruvchi fotoaktivatsiya energiyasi  $1,23$  eVga teng bo'lgan chuqur sath aniqlandi.

5. p-CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al gererostrukturasi hajmiy tutqichlarni  $E_{b1} = 0,57$  eV,  $E_{b2} = 0,94$  eV va  $E_{b5} = 1,42$  eV Te ( $E_{b4}$ ) va ( $E_{b4}$ ) (Te va Cd) nuqsonlarga tegishli ekanligi va chegaraviy fotoionlashish energiyalari 5 qadamlı spektrga ega ekanligi aniqlandi.

6. Birinchi marta silliqlangan sapfir tagliklarga o'rnatilgan bir-biridan alohida turuvchi CdTe polikristall yupqa qatlamlarda chuqur sathlarni kontaktsiz spektroskopiya va sirt rekombinatsiya tezligini baholovchi metodika qo'llanilib, sirt rekombinatsiya tezligining qiymati  $\tau_R = 19$  ns ga tengligi aniqlandi.

7. Birinchi marta, effektiv zaryad tashuvchilarni yashash vaqtlari, bir nechta spektral qadamlar bilan korrelyatsiya qilinishi ko'rsatildi va zaryadlangan tutqichlarni ortishiga olib keluvchi zaryad tashuvchilar yashash vaqtlari ortishi bilan korrelatsiyalanuvchi eng kichik spektral qadamning fotoionizatsiya energiyasi  $E_{b1} = 0,57$  eVga teng ekanligi aniqlandi.



**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ  
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ  
ИНСТИТУТЕ ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ И МИКРОЭЛЕК-  
ТРОНИКИ НАЦИОНАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА УЗБЕКИСТАНА**

---

**ФЕРГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**АЛИМОВ НОДИР ЭСОНАЛИЕВИЧ**

**ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ  
ШИРОКОЗОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ НА ОСНОВЕ CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al И CdTe-  
ZnSe С УПРАВЛЯЕМЫМИ СВОЙСТВАМИ**

**01.04.10 – Физика полупроводников**

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

**Ташкент–2023**

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № В2022.2.PhD/FM29.

Диссертация выполнена в Ферганском государственном университете.

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

Научный руководитель:

**Отажонов Салим Мадрахимович,**  
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты:

**Дадамирзаев Мухаммаджон Гуломқодирович**  
доктор физико-математических наук, профессор

**Аюнов Кутуп Саутович**  
доктор физико-математических наук, профессор

Ведущая организация:

**Нукусский государственный педагогический институт**

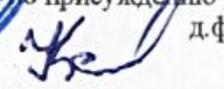
Защита диссертации состоится «15» 07 2023 года в 12<sup>00</sup> часов на заседании Научного совета DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 при Научно-исследовательском институте физики полупроводников и микроэлектроники Национального университета Узбекистана. (Адрес: 100057, Узбекистан, г. Ташкент, ул. Янги Олмазар, дом 20. Тел: (+99871) 248-79-94, факс (+99871) 248-79-92, e-mail: info@ispm.uz).

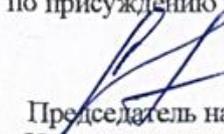
С диссертацией можно ознакомиться в отделе внедрения информационных технологий института (зарегистрирована за № 50). Адрес: 100057, Узбекистан, г. Ташкент, ул. Янги Олмазар, дом 20. Тел: (+99871) 248-79-59.

Автореферат диссертации разослан «21» 06 2023 года  
(реестр протокола рассылки № 50 от «21» 06 2023 года)



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

  
**О.Х. Кулдашов,**  
Ученый секретарь Научного совета  
по присуждению ученых степеней,  
д.т.н, доцент

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

## **ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))**

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** В мировой практике в области оптоэлектронных устройств с полупроводниковым материаловедением, наряду с элементарными полупроводниками, возрастает широкое применение различных соединений  $A^{III}B^{VI}$  и гетероструктур на их основе. Теллурид кадмия (CdTe) является перспективным материалом для детекторов регистрации частиц благодаря своей стабильности радиоактивным излучениям, эффективен при регистрации ионизирующего излучения со значительно более высокой чувствительностью, чем другие материалы GaAs и GaN, и является необходимым материалом для регистрации излучения до 250 кэВ. Тонкие поликристаллические слои CdTe с гетеропереходами, также являются перспективным материалом для создания солнечных элементов и элементов оптической памяти. В связи с этим одной из важных задач является исследование и управление спектров поверхностных и объемных глубинных ловушек тонкой пленки CdTe.

В настоящее время в мире одной из важнейших задач считается проведение научных исследований по получению нового класса материалов гетероструктур с глубокими энергетическими уровнями полученных путем легирования. В этом отношении достигнуты определенные результаты. Однако недостаточно уделено внимание на создание гетероструктур с участием Si, CdTe и ZnSe. В связи с этим создание фоточувствительных, быстродействующих приборов, способных сохранять селективность в широком диапазоне электромагнитного излучения на основе CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si и CdTe-ZnSe, изучение закономерностей возникновения в них спектра глубоких энергетических уровней, формирование новых функциональных возможностей, управление электрофизическими параметрами материалов при внешних воздействиях, исследование природы примесных уровней расположенных в объеме или на поверхности гетероструктур, указывает актуальность данной диссертации.

Настоящее диссертационное исследование соответствует задачам, обозначенным в Указе Президента Республики Узбекистан №УП-60 «О стратегии развития нового Узбекистана на 2022-2026 годы» от 28 января 2022 года, в Постановлениях Президента Республики Узбекистан № ПП-5032 «О мерах по повышению качества образования и совершенствованию научных исследований в области физики» от 19 марта 2021 года, № ПП-5011 «О дополнительных мерах по дальнейшему развитию электротехнической промышленности и повышению конкурентоспособности отечественной продукции» от 03 февраля 2021 года, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

**Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан.** Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий республики: III. «Энергия, энергосбережение, транспорт,

машиностроение и приборостроение; развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники, электронного приборостроения».

**Степень изученности проблемы.** До настоящего времени проблемы выращивания и исследования структурных и фотоэлектрических свойств гетероструктур на основе  $A^{II}B^{VI}$  проводятся в многих университетах и научно-исследовательских центрах ведущих стран мира. В частности, во главе академиком АН Украины М.К. Шейнкманом, В.П. Симашкевичом (Украина) проводились комплексные исследования электрофизических свойств гетероструктур на основе полупроводниковых соединений, состоящих из элементов II-VI групп. Под группой профессора В.С. Багаева (Москва, Россия) изучены оптические и электрофизические свойства дефектов высокочистого CdTe. Литовскими учеными Ю.Ю. Вышакасом, Ю.К. Пожела, Ю.Ю. Вайткусом рассмотрено создание быстродействующих фотодетекторов на основе CdTe.

Группой узбекских ученых, под руководством академика Р.А. Муминова, профессорами Б.Е. Умирзаковым, Ш.А. Мирсагатовым экспериментально исследованы механизмы протекания тока в тонких слоях CdTe.

В то же время, влияние примесей на нелинейные процессы фотоэлектричества в тонких слоях поликристаллического CdTe до конца не изучены. Не выявлены основные, глубокие ловушки, влияющие на поверхностную рекомбинацию. Не произведена оценки изменения времени жизни фотоносителей в объеме и вблизи поверхности поликристаллических образцов CdTe, а также не уточнены время жизни носителей в гетероструктурах на основе CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al.

**Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация.** Диссертационная работа выполнена в рамках проекта № 01.2.2-LMT-K-718-1-0013 Европейского фонда регионального развития в соответствии с поддерживаемой деятельностью «Исследовательские проекты, реализуемые исследовательскими группами мирового уровня» (2015-2020 гг.) Ферганского государственного университета и Вильнюсского университета.

**Цель исследования** заключается в выявлении новых фотоэлектрических явлений, связанных с глубокими уровнями в гетероструктурах CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al и CdTe-ZnSe, создании на их основе эффективных фотопреобразователей в видимой и ближней инфракрасной области.

**Задачи исследования:**

выращивание поликристаллических пленок CdTe на SiO<sub>2</sub>-покрытых Si-подложках и на поверхность ZnSe;

определение глубоких уровней в гетероструктурах CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al, CdTe-ZnSe;

изучение спектроскопии глубоких ловушек и определение скорости поверхностной рекомбинации на поликристаллических пленках p-CdTe;

оценка изменения времени жизни фотоносителей в объеме и вблизи

поверхности поликристаллических образцов CdTe, а также в поликристаллических пленках CdTe с учетом микрорельефа поверхности.

**Объектом исследования** являются соединения элементов группы A<sup>II</sup>B<sup>VI</sup> и гетероструктуры CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al, CdTe-ZnSe.

**Предметом исследования** являются управление микропотенциальных барьеров в тонкопленочных гетероструктурах CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al, CdTe-ZnSe под воздействием внешних факторов, а также изучение природы глубоких примесных центров в области примесной фотопроводимости.

**Методы исследований.** Для решения поставленных задач были использованы импульсная фотоионизационная спектроскопия (PPIS), для определения глубоких уровней использована модель Луковского, методы (BELIV) и микроволновой зондовой фотопроводимости (MW-PC). (Два указанных выше метода были разработаны в научной лаборатории при Вильнюсском университете (Литва), которые использовал сам автор при измерении образцов гетероструктур в декабре 2017 года).

**Научная новизна** исследования заключается в следующем:

впервые с применением комплексного измерения переходных процессов в гетероструктуре CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al методами СВЧ-зонда и контактной фотопроводимости с помощью лазерного возбуждения в диапазоне 300÷2300 нм выявлено, что характерное время поверхностной рекомбинации составит  $\tau_R = 19$  нс;

разработаны оптимальные технологии получения фотоприемников на основе тонкопленочных гетероструктур CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al и CdTe-ZnSe, работающих в диапазоне длин волн 0,4÷3,0 мкм;

впервые установлено, что нестационарные переходные процессы фотопроводимости тонких  $d \sim (0,5 \div 0,8)$  мкм поликристаллических пленок CdTe в гетероструктурах CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al и CdTe-ZnSe обусловлены поверхностными рекомбинациями фотоносителей через глубокие ловушки с энергией активации  $\sim 1,23$  эВ;

с помощью методом фотопроводимости микроволнового зонда (MW-PC) впервые обнаружена значительная собственная фотопроводимость тонких плёнок CdTe, и при этом определены энергии фотоионизации, которые составляют  $E_{b1} = 0,57$  эВ (междоузельный Te),  $E_{b2} = 0,94$  эВ и  $E_{b5} = 1,42$  эВ (вакансии Cd), наличие объемных ловушек внутренних дефектов с  $E_{b4} = 1,13$  эВ (вакансии Te) и  $E_{b3} = 1,05$  эВ (комплекс точечных дефектов Cd и Te);

впервые установлена зависимость спектра fotocувствительности пленочных гетероструктур CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al и CdTe-ZnSe от внешнего электрического поля, причем с ростом напряжения от 0 до 100 В максимум силы тока ( $I_{кз}$ ) короткого замыкания смещается в коротковолновую область спектра в пределах 0,93÷1,5 эВ.

**Практические результаты исследования** заключаются в следующем:

разработаны методы повышения эффективности роли образования глубоких уровней Ag и Cu в CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al для управления чувствительностью фотодетектора;

разработан метод на основе гетероструктуры CdTe-ZnSe регистрации

сигналов в качестве элемента оптической спектральной памяти и фотоприемника для регистрации рентгеновского, ультрафиолетового и инфракрасного излучений.

**Достоверность результатов исследований** обеспечивается применением современных методик исследований, хорошо апробированных методов эксперимента, статистической обработкой экспериментальных данных и воспроизводимостью полученных результатов, а также соответствием экспериментальных результатов современным физическим теориям и их сопоставлением с существующим литературными данными. Полученные результаты обсуждались на международных и республиканских научных конференциях.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.** Научная значимость результатов исследований заключается в развитии и уточнении представлений о поверхностной рекомбинации и анализа спектров глубоких (объемных и поверхностных) ловушек CdTe на кремниевых ( $\text{SiO}_2\text{-Si}$ ) подложках;

Практическая значимость результатов исследования заключается в применении гетероструктуры CdTe-ZnSe, выращенных на ZnSe подложках, для разработки эффективных световых и электрических датчиков, а гетероструктуры CdTe- $\text{SiO}_2\text{-Si}$ , выращенных на  $\text{SiO}_2\text{-Si}$  подложках, для разработки элементов памяти с спектральной фоточувствительностью.

#### **Внедрение результатов исследования.**

На основе полученных научных результатов о структурных, электрофизических, фотоэлектрических свойствах и механизмах токопереноса тонкопленочных гетероструктур на основе CdTe- $\text{SiO}_2\text{-Si-Al}$ :

разработка метода использования гетероструктуры CdTe- $\text{SiO}_2\text{-Si-Al}$  в качестве фотоприемника для записи рентгеновского излучения были применены в фундаментальном проекте ОТ-Ф2-71 «Исследование влияния света на вольт-амперные характеристики деформированного p-n-перехода в очень высокочастотном электромагнитном поле», реализованного в 2017-2020 годах в рамках государственных научно-технических программ на кафедре физики Наманганского инженерно-строительного института (справка № 06/10 от 14 декабря 2021 года Наманганского инженерно-строительного института). Использование научных результатов позволило изготовить образцы инфракрасных фотоприёмников, электрофизические параметры которых соответствуют показателям на уровне их аналогов;

разработанный полупроводниковый датчик из гетероструктуры ZnSe-CdTe, полученного выращиванием в вакууме  $10^{-6}$  мм рт.ст. тонких пленок CdTe на поверхность ZnSe со скоростью конденсации 0,45 нм/с толщиной 1 мкм нашел применение в качестве сигнальных световых и электрических датчиков, при разработке умных светофоров и сварочных аппаратов организации ООО «ОЛТАРИК-ИННОВАЦИЯ». На основе гетероструктуры CdTe- $\text{SiO}_2\text{-Si-Al}$ , выращенного на  $\text{SiO}_2\text{-Si}$  подложке, для разработки фотодетекторов и фотоприемников использованы в технологическом процессе изготовления детекторов короткого излучения  $0,4\div 3,0$  мкм организации ООО «ОЛТАРИК-

ИННОВАЦИЯ» (справка № 25/01 от 29 октября 2021 года ООО «ОЛТАРИК-ИННОВАЦИЯ»). Использование научных результатов позволило на практике улучшить рабочие параметры световых и электрических датчиков;

в АО «ФОТОН» нашел возможность применения комплексного измерения переходных процессов в гетероструктуре CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al методами СВЧ-зонда и контактной фотопроводимости с помощью лазерного возбуждения в диапазоне 300 – 2300 нм, что позволило определить характерное время поверхностной рекомбинации  $\tau_R = 19$  нс. Возможность создания фотоприёмников электромагнитного излучения в области спектра 0,4 - 3,0 мкм и нестационарные переходные процессы фотопроводимости тонких  $d \sim (0,5 - 0,8)$  мкм поликристаллических пленок CdTe в гетероструктурах CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al и CdTe-ZnSe обусловлены поверхностными рекомбинациями фотоносителей через глубокие ловушки с энергией активации  $\sim 1,23$  эВ, были использованы в производстве полупроводниковых электронных приборов производства АО «ФОТОН» (справка № 04-3/2405 от 21.11.2022 акционерного общества «Ўзэлтехсаноат»). Использование научных результатов позволило изготовить электронные технические устройства на экспериментальных образцах и улучшить их электрофизические параметры.

**Апробация результатов исследования.** Основные результаты диссертации обсуждались на 7 международных и 5 республиканских научно-практических конференциях.

**Публикации результатов исследования.** Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 29 научных трудах, из них 2 патента, 7 статей в научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных работ, в том числе 5 статей в зарубежных международных реферируемых журналах.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы. Текст диссертации изложен на 112 страницах, включая 26 рисунков и 1 таблицы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, определена связь исследования с основными приоритетными направлениями развития науки и технологий в Республике Узбекистан, приведены обзор научных работ по теме диссертации, степень изученности проблемы и методы исследования, изложена научная новизна исследования, обоснована достоверностью полученных результатов, раскрыта теоретическая и практическая значимость, приведены краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, а также об объеме и структуре диссертации.

**В первой главе «Фотопроводимость в гетероструктурах и тонких пленках на основе p-CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al»** приведен обзор литературы по проблеме. Проанализированы результаты при проведении исследований спектральных характеристик полупроводников A<sup>IV</sup>B<sup>VI</sup> легированных ионами

различных групп.

Проанализированы механизмы образования фотопроводимости в тонких пленках CdS, CdTe и гетероструктурах p-CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al и CdTe-ZnSe. При этом выявлено что данные о глубоких уровнях в гетероструктурах весьма отрывочны, а параметры их в гетероструктурах отсутствуют. Поэтому было решено целесообразно провести детальное изучение глубоких центров в гетероструктурах CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si и CdTe-ZnSe, идентифицировать и выяснить те уровни, которые играют роль в фотопроводимости и в генерации фото-ЭДС в барьерах и управление спектральной фоточувствительности под действием внешних факторов.

По итогам проведенного анализа дано обоснование постановки задачи исследований, выполненных в диссертационной работе.

**Во второй главе «Технологические процессы изготовления гетероструктур на основе p-CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al и CdTe-ZnSe»** приведена технология изготовления гетероструктур на основе p-CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al и две методики для определения энергетических положений глубоких уровней на гетероструктуре p-CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al по спектрам фотопроводимости с моделью Луковского и метод оценки барьера с помощью линейного увеличения напряжения (BELIV), основанный на измерениях переходных процессов тока при обратном смещении.

Для оценки рекомбинационных характеристик использовались бесконтактные микроволновые измерения фотопроводимости. Здесь короткий лазерный импульс 400 пс с фиксированной длиной волны 1062 нм используется для возбуждения избыточных носителей в образце. Концентрация избыточных носителей определяет коэффициенты передачи и отражения микроволн образца CdTe. Время жизни избыточных носителей можно оценить, записывая переходные процессы микроволнового отклика, связанные с распадом носителей. В этом методе применяется импульсная фотоионизационная спектроскопия, его преимущество от метода постоянного фототока заключается в том, что темновой ток утечки просто отклоняется в PPIS ёмкостным фильтром. В нем изменения времён рекомбинации и захвата фотовозбуждённых носителей коррелируют с определёнными спектральными ступенями фотоионизации и одновременно контролируются. Кроме того, PPIS записывается в бесконтактном режиме при комнатной температуре, исключая эффекты, связанные с контактом. В проведённых измерениях спектроскопия PPI была проведена с использованием возбуждения фемтосекундным (фс) и наносекундным (нс) лазерами, оснащёнными параметрическими генераторами оптики (optical parametric oscillator - OPO). Наносекундный прибор Ekspla NT342B с длительностью импульса 4 нс и диапазоном перестройки длины волны от 210 до 2300 нм и система OPO на основе Ti:сапфирового лазера с длительностью импульса ~ 40 фс и диапазоном длин волн 350-2500 нм.

Качество контактов гетероструктуры и диапазон линейности была проверена с помощью измерений переходных процессов тока, записанных с использованием импульсного метода (BELIV). Переходные процессы тока

регистрируются с использованием входа нагрузки 50 Ом осциллографа Agilent DSO6102A. Кроме того, измерительная схема содержит регулируемую выходную мощность генератора линейно возрастающего напряжения (GLIV) и исследуемого диода, соединённые последовательно. Переходные токи измеряются в диапазоне от десятков пА до десятков мА с использованием импульсов GLIV с длительностью в диапазоне от 100 нс до 10 мс, в то время измерения выполняются без какого-либо дополнительного усилителя тока. Могут быть исследованы соединения различных материалов, области и зоны вырождения. Чувствительность измерения тока барьерной ёмкости можно варьировать, изменяя темп импульсов LIV. Кроме того, при необходимости его можно увеличить с помощью усилителя тока. Усреднение 10-100 переходных процессов обычно выполняется для уменьшения статистического шума. Линейность сигнала GLIV важна для реализации метода BELIV. Поэтому сигнал LIV и его производная, измеряемые одновременно с использованием второго канала осциллографа, всегда записываются. Система измерения управляется компьютером.

В третьей главе диссертации **«ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ свойства гетероструктур на основе p-CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al и CdTe-ZnSe с глубокими примесными уровнями»** рассмотрена структура края поглощения пленок, что необходимо для упрощения анализа спектров фотопроводимости и тока короткого замыкания, а также систематизирована электрофизические свойства слоев CdTe, полученных на поверхности разных полупроводниковых структур. Рассмотрены и некоторые простые феноменологические модели этих слоев. В конце главы сделана попытка построения более реальной модели пленки и теории образования в фоточувствительных поликристаллических пленках в области собственного и примесного поглощения света.

Для определения фоточувствительности структуры CdTe-ZnSe рассчитывают оптическую энергию ионизации глубоких уровней, измеряют спектральную характеристику тока короткого замыкания слоя CdTe, легированного <Ag>, которая в интервале энергии квантов света  $h\nu = 0,45 - 2,7$  эВ обусловлена фоточувствительной пленкой теллурида кадмия (Рис. 1.).

В слое CdTe фото-ЭДС возникает как при возбуждении зона-зона, так и из глубоких уровней с энергией оптической ионизации, равной 1,04; 1,15; 1,32 эВ, чем охватываются практически все полосы люминесценции селенида цинка (Рис. 1., кривая 2).

Фоточувствительность пленки CdTe, легированного <Ag> определяется измерением спектров в режимах фотопроводимости при фронтальном освещении. Кривая 1 на Рис. 2. характеризует полярность приложенного поля, которая совпадает с полярностью фоточувствительной пленки теллурида кадмия; кривая - 2, когда полярность приложенного поля противоположна. Фотонапряжение пленки CdTe измеряется, путем измерения фотопроводимости в зависимости от направления приложенного извне электрического поля.

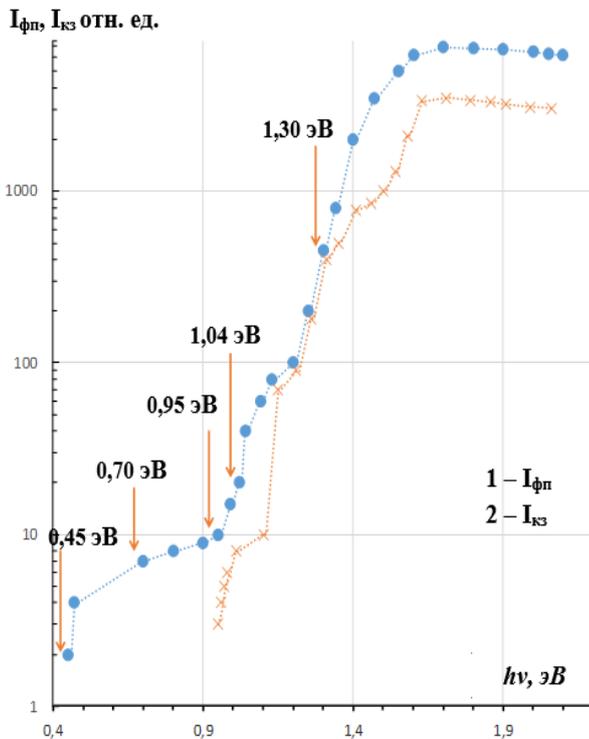


Рис. 1. Спектры  $\times$  – 1- $I_{фп}$ ,  $\bullet$  - 2- $I_{кз}$  пленок CdTe <Ag> на гетероструктуре CdTe-ZnSe при фронтальном освещении

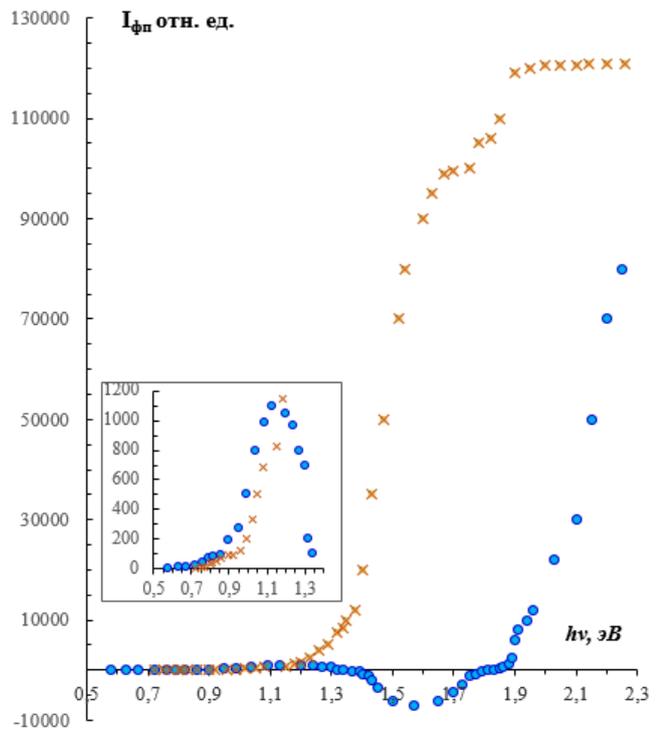
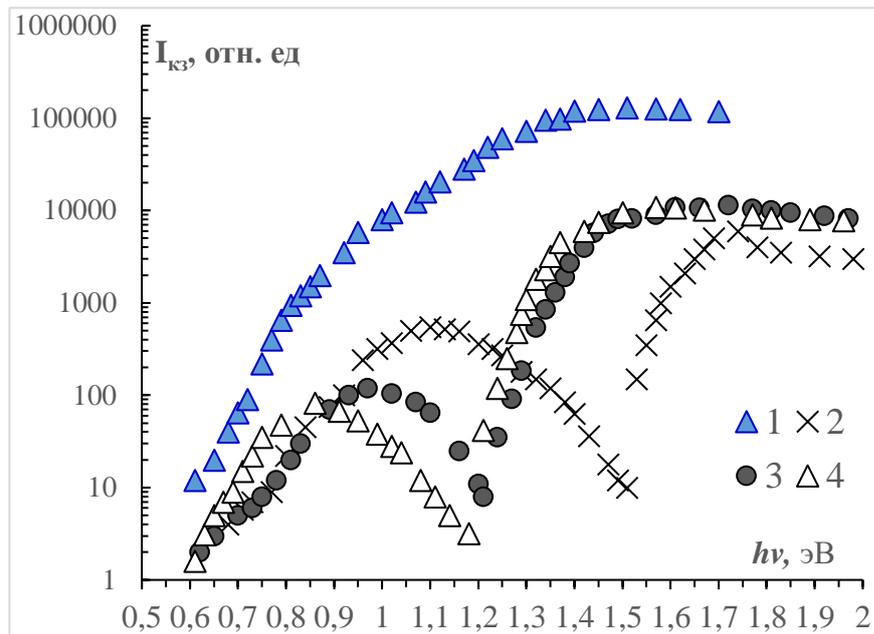


Рис. 2. Спектры фотонапряжений пленок CdTe <Ag>, полученных на ZnSe, при фронтальном освещении: 1 –  $\times$  когда полярность приложенного поля совпадает с полярностью фотонапряжения и противоположно  $\bullet$  - 2.  $U = 18$  В.

Приложенное электрическое поле стимулирует возникновению большого фотонапряжения. В области края поглощения теллурида кадмия возникает большая фоточувствительность, приводящий к изменению знака фотопроводимости. Выделенный фотосигнал пленки совпадает со знаком фото-ЭДС (кривая 1). Это обусловлено тем, что приложенное электрическое поле втягивает носители в область асимметричных барьеров, из-за чего возрастает фото-ЭДС (кривая 1).

Управляя влиянием барьеров на поверхности CdTe и у поверхности ZnSe, можно получать как одинаковые, так и разные знаки фото-ЭДС в двух областях энергии квантов света, равных 1,4; 1,7 эВ и 1,9; 2,3 эВ (Рис. 2.). Важной особенностью фоточувствительной пленки на основе теллурида кадмия является ее автономный характер, что представляет особый интерес в пленочной оптоэлектронике, в качестве преобразователя излучения при ультрафиолетовых и рентгеновских излучениях, в широком диапазоне принимаемого электромагнитного излучения.

Рассмотрим спектральную фоточувствительность структуры p-CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si в виде тонкой плёнки, подвергнутой действию внешнего электрического поля и после его выключения (Рис. 3.).



**Рис. 3.** Спектры  $I$  в зависимости от времени выдержки в темноте после зарядки структуры  $\text{CdTe-SiO}_2\text{-Si}$  под напряжением 300 В. Кривая 1 - сразу после зарядки, 2 - через 6 суток, 3 - через 19 суток, 4 - до зарядки.  $I_{kz}$  отн.ед.

При этом обнаруживается остаточной характер спектральной фоточувствительности. При стационарном  $u_{вн} = 300$  В фоточувствительность возрастает от 100 В (кривая 1) до 1000 В (кривая 2). После снятия воздействия внешнего поля фоточувствительность не возвращается к своему первоначальному значению (кривые 3, 4) в течение 30 суток. Возвращение фоточувствительности гетероструктуры, находящейся в состоянии остаточной проводимости к исходному состоянию, осуществляется подачей импульса обратного напряжения длительностью в несколько миллисекунд. Такое “стирание” памяти объясняется полевым гашением остаточной проводимости. Максимум фоточувствительности зависит от величины, напряжённости электрического поля.

Для качественного описания физической природы обнаруженной остаточной фоточувствительности и механизма явления электронного переноса, протекающего в гетероструктуре  $p\text{-CdTe-SiO}_2\text{-Si-Al}$  рассмотрена модель в условиях приложенного внешнего постоянного электрического напряжения. При этом стационарный ток представляет собой поток туннелирующих электронов из зоны проводимости полупроводника  $\text{CdTe}$  в зону проводимости полупроводника  $\text{Si}$  через слой окисла  $\text{SiO}_2$  и из зоны проводимости полупроводника в глубокий уровень, находящейся в диэлектрике, и в том числе в ловушку на границе их раздела. Носители тока, освобождённые под действием света с этих уровней, дают вклад в проводимость, сохраняющуюся достаточно долго. Это происходит в следствии того, что рекомбинации носителей препятствует асимметричный потенциальный барьер, увеличивающийся по мере захвата электронов на поверхностные состояния. При этом, в отличие от однородного полупроводника, у которого потенциальный барьер вызван только зарядом на поверхностных состояниях, в случае гетероструктуры  $p\text{-CdTe-SiO}_2\text{-Si-Al}$  он

увеличивается дополнительно за счёт разности работ выхода контактирующих материалов. В силу этой причины явление оптической спектральной памяти в гетероструктуре выражено более ярко.

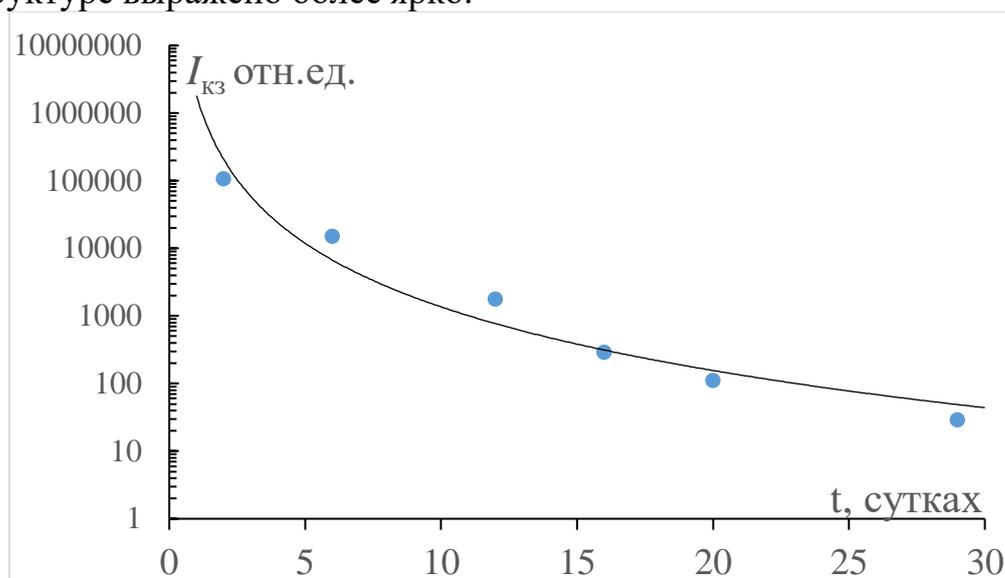


Рис. 4. Кривая затухания фотосигнала гетероструктуры p-CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al по времени:  $\lambda = 0,85$  мкм;  $h\nu = 1,5$  эВ.

Таким образом, меняя величины электрического напряжения, можно переводить образец в любое состояние, находящееся между темновым током и максимальным током остаточной проводимости. Гетероструктуру p-CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al можно использовать как оптоэлектронную спектральную память, способную не только запоминать сигналы, но и суммировать их. Кроме того, особенностью данной спектральной памяти является возможность регистрировать сигналы без приложения внешнего напряжения, так как p-CdTe обладает высокой фоточувствительностью и может регистрировать информацию, лежащую в широких пределах длинноволнового светового излучения (0,5 - 2,7 мкм).

В четвертой главе диссертации «**Кинетика фотопроводимости в гетероструктурах на основе CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si**» В данной главе приведена спектроскопия глубоких ловушек и скорость поверхностной рекомбинации на поликристаллических пленках p-CdTe толщиной ~ 1 мкм, выращенных на SiO<sub>2</sub>-изолированных подложках Si методом парофазной эпитаксии. Были исследованы два набора образца CdTe, а именно: отдельно стоящие приподнятые слои CdTe, установленные на полированных сапфировых подложках, прозрачных для света возбуждения, и гетероструктуры p-CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al с развернутыми в боковом направлении омическими контактами на CdTe. Для оценки скорости поверхностной рекомбинации на слоях CdTe и записи спектров глубоких уровней для гетероструктур p-CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al использовалась методика переходного процесса фотопроводимости с микроволновым зондированием в сочетании с настраиваемым импульсным возбуждением по длине волны.

Бесконтактная регистрация, переходных процессов распада избыточных носителей, проводилась методом микроволновой зондовой фотопроводимости (MW-PC).

Возбуждение избыточных носителей осуществляется с помощью перестраиваемых лазерных импульсов с длиной волны длительностью 4 нс. Поиск длины волны возбуждения начинается с использованием спектрального диапазона малых энергий фотонов, чтобы избежать одновременного заполнения нескольких глубоких ловушек, несмотря, что они обладают регистрируемым фотоответом.

Для повышения чувствительности измерительной системы СВЧ (MW), волноводная система содержит MW – мост. Перестраиваемое возбуждение осуществляли с использованием системы оптических параметрических генераторов (ОРО) Ekspla NT342, варьируя длины волн от 210 до 2300 нм. Образец помещается на щелевой усилитель с частотой 20–22 ГГц, а лазерный импульс индуцирует фотопроводимость  $\sigma(t) = \sigma_0 + \Delta\sigma(t)$  материала CdTe. Переходная фотопроводимость изменяет сигнал детектора MW, который отделен от генератора MW циркулятором. Амплитуда  $U_{MW-PC}(t) \sim \Delta\sigma(t)/\sigma_0$  сигнала MW-PC пропорциональна концентрации избыточных носителей  $\Delta n(t) \sim \Delta\sigma(t)$ . Переходный процесс MW-PC дополнительно представляет изменения плотности свободных носителей из-за электронных переходов, приписываемых различным глубоким уровням, участвующим в процессах фотоионизации. Фотоионизационный отклик зависит от сечения электронно-фотонного взаимодействия, которое зависит от длины волны падающего лазерного луча.

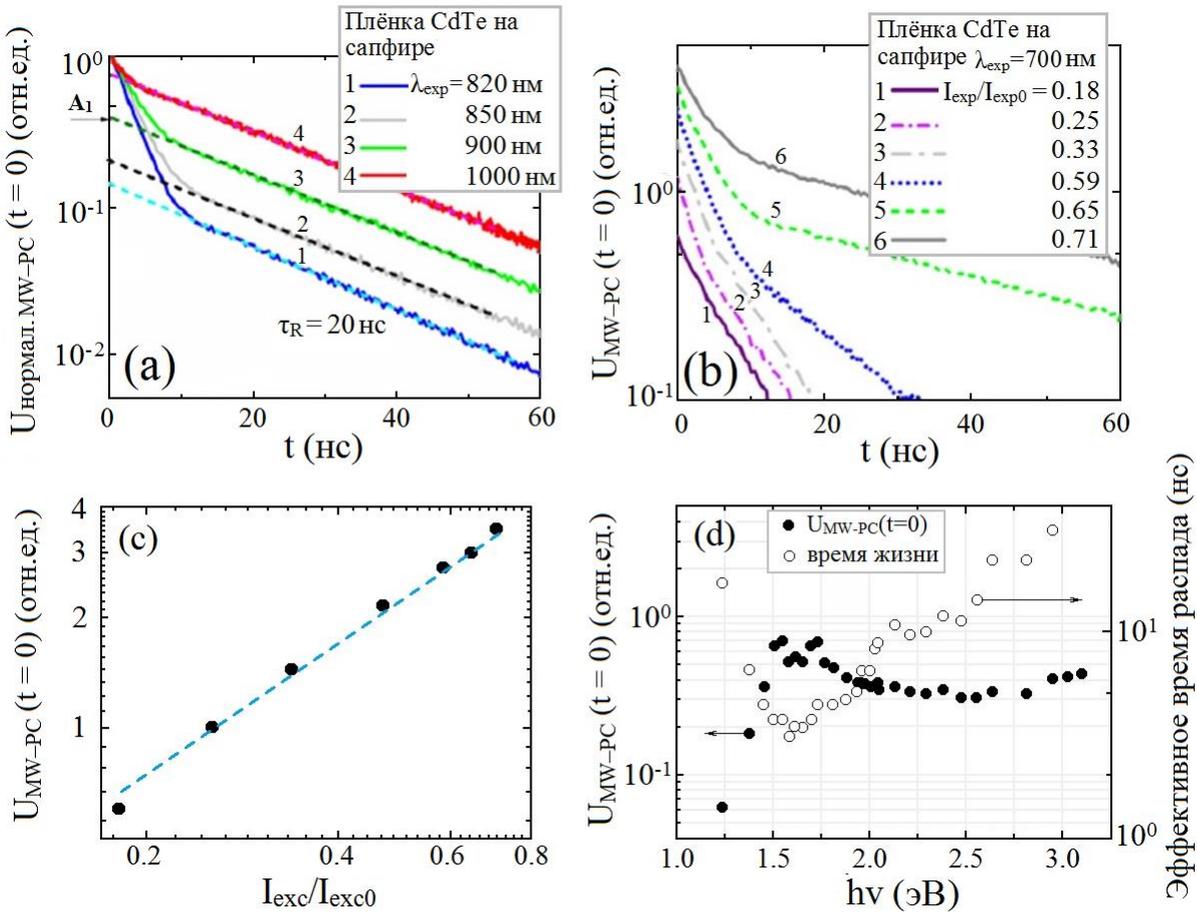
Спектр фотоионизации обычно содержит ступенчатую структуру откликов MW-PC, зависящую от энергии падающих фотонов, калиброванных по тому же количеству квантов. Этот спектр часто анализируется с использованием модели Луковского, подходящей для оценки красной границы энергии фотоионизации глубоких уровней. Модель Луковского представляет собой простой подход для описания сечения захвата с использованием одного параметра  $E_d$ .

Фотоионизация захваченных носителей  $n_d$  спектрально различимыми лазерными импульсами позволяет определять параметры глубоких ловушек и состояние их заполнения. Сечение  $\sigma_{p-s}$  в модели Луковского выражается так

$$\sigma_{p-s}(h\nu) = \frac{BE_d^{1/2}(h\nu - E_d)^{3/2}}{(h\nu)^3} \quad (1)$$

где  $B$  мультипликативный коэффициент. Изменения коэффициента поглощения  $\alpha(h\nu)$  для фотонов энергии  $h\nu$  при  $\alpha(h\nu) = \sigma_{p-s}(h\nu)n_d^0$  также пропорциональны плотности  $n_d^0$  захваченных носителей. Плотность фотоизлучаемых носителей  $n_d^* = \sigma_{p-s}(h\nu)n_d^0 F(h\nu)$  при фиксированной поверхностной плотности  $F(h\nu)$  падающих фотонов контролируется MW-зондом. Затем плотность  $N_d$  - ловушек может быть независимо оценена по спектрам коэффициента поглощения  $\alpha(h\nu)$ . Коэффициент заполнения  $n_d/N_d$  может контролировать комбинированными измерениями пикового значения

сигнала MW-PC или  $\alpha(h\nu)$  в зависимости от  $F|_{h\nu}$ , и насыщение этих характеристик указывает на полную фотоионизацию ловушек  $N_d$ .



**Рис. 5.** Изменение длины волны возбуждения (при низких значениях возбуждения ( $I_{\text{exc}}/I_{\text{exc}0} = 0,2$ )) - (а) и плотности возбуждения (при  $\lambda_{\text{exc}} = 700$  нм) – (б) зависящих переходных процессов MW-PC, зарегистрированных при  $T = 300$  К на свободном стоящая плёнке CdTe, установленная на сапфире. (с) - сигнал MW-PC при  $t = 0$  как функция плотности возбуждения на длине волны 1000 нм. (д) - вариации сигнала MW-PC при  $t = 0$  и затухание эффективной времени жизни носителей на начальной стадии распада как функция энергии фотонов возбуждения, измеренная на оголенном плёнке CdTe при фиксированной ( $I_{\text{exc}}/I_{\text{exc}0} = 0,2$ ) плотности возбуждения.

Переходные процессы MW-PC, записанные на отдельно стоящих образцах CdTe, показаны на рис. 5.а для фиксированной, относительно низкой ( $I_{\text{exc}}/I_{\text{exc}0} = 0,2$ ) плотности возбуждения. Из рисунка 5.а можно сделать вывод, что форма переходного процесса MW-PC изменяется с двухкомпонентного на почти одноэкспоненциальным виде при увеличении длины волны возбуждения. Это явный признак проявления поверхностной рекомбинации, что весьма вероятно для довольно тонкого образца с оголёнными поверхностями.

Переходные процессы контактной фотопроводимости были дополнительно измерены в зависимости от длины волны возбуждения. Эти измерения проводились путем возбуждения межэлектродного зазора фоторезистора и регистрации фототока на нагрузочном резисторе 50 Ом.

Фототок и ответные сигналы MW были записаны с помощью осциллографа Tektronix 1 ГГц TDS-5104.

Это явление обусловлено уменьшением амплитуды  $A_1$  основной моды затухания с эффективной глубиной возбуждения, которая является обратной величиной относительно коэффициента поглощения  $\alpha$ . Коэффициент поглощения резко возрастает с энергией фотона возбуждения на краю поглощения материала CdTe в диапазоне длин волн около 800–1000 нм. При этом зависимость коэффициента поглощения от толщины слоя, относящий наноструктурам CdTe, можно игнорировать, так как толщина слоя в 1 мкм достаточна для того, чтобы иметь свойства объёмного материала.

Изменение плотности носителей во времени  $t$  по координате глубины пластины  $x$  описывается соотношением

$$n(x, t) = n_0 \sum_{m=1}^{\infty} A_m e^{-(D\eta_m^2 + 1/\tau_R)t} \sin\left(\eta_m x + \arctg \frac{D\eta_m}{s}\right) \quad (2)$$

где  $n_0$  - концентрация введённых светом пар избыточных носителей,  $A_m$  - амплитуда затухания, приписанная пространственной частоте  $m$  моды распада,  $\tau_R$  - время жизни объёмной рекомбинации,  $D$  - коэффициент амбиполярной диффузии носителей,  $s$  - скорость поверхностной рекомбинации.

Пиковые амплитуды переходных процессов показывают линейное увеличение с интенсивностью возбуждения (рис. 5.в), что подразумевает процессы линейной рекомбинации при однородном возбуждении, в то время как распад носителей в начальной фазе (рис. 5.а) указывает на неэкспоненциальный процесс затухания в неоднородном возбуждении. Усреднённая концентрация пар носителей по толщине слоя  $d$  и нормированная к её пиковому значению (при  $t = 0$ ) изменяется во времени как

$$\frac{\langle n(t) \rangle_d}{\langle n(0) \rangle_d} = \sum_{m=1}^{\infty} \langle A_m \rangle_d e^{-(D\eta_m^2 + 1/\tau_R)t} \quad (3)$$

Пространственные частоты для равных скоростей ( $s_1=s_2=s$ ) рекомбинации на противоположных поверхностях могут быть определены путём решения трансцендентного уравнения

$$\text{ctg}(\eta d) = \eta d \frac{D}{sd}. \quad (4)$$

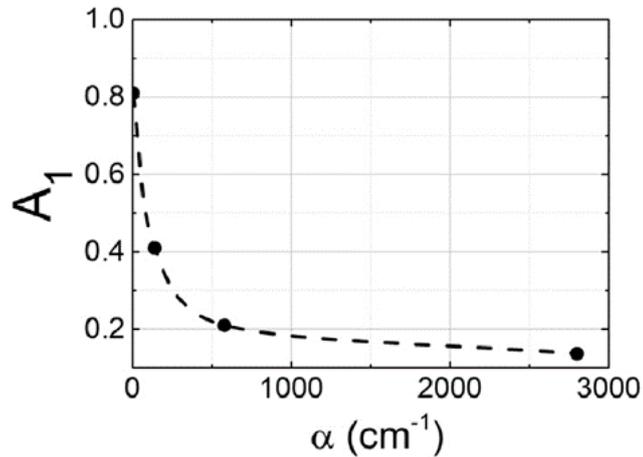
Предположение об одинаковых значениях скорости поверхностной рекомбинации весьма вероятно для образца CdTe с открытыми поверхностями. Затем выражение для амплитуды пика  $A_m$   $m$ -й моды затухания получается как

$$\langle A_m \rangle_d = \frac{8}{(\eta_m d)^2 \left( 1 + \left( \frac{D}{sd} \right)^2 (\eta_m d)^2 + 2 \frac{D}{sd} \right)^{\frac{ad/2}{1+(ad/\eta_m d)^2}} \left( \text{ctg} \frac{ad}{2} + \frac{D\alpha}{s} \right). \quad (5)$$

Эффективное время затухания, измеренное в асимптоте переходного процесса, затем выражается как

$$\tau_{eff}^{-1} = \tau_R^{-1} + \frac{D(\eta_1 d)^2}{d^2} \quad (6)$$

Для извлечения значений скорости поверхностной рекомбинации получают два уравнения (уравнения (5) и (6)) с параметрами  $s$  и  $D$ . Следовательно, амплитуду пика  $A_1$  (рис. 5.а), приписываемую основной моде распада  $\eta_1$ , можно моделировать как функцию безразмерного параметра поверхностной рекомбинации  $S = sd/D$  с использованием одномерного диффузионного приближения. Для надёжной оценки  $A_1(\eta_1(s))$  и времени жизни



**Рис. 6. Пиковые значения амплитуды  $A_1$  основной моды затухания как функции коэффициента поглощения  $\alpha$  для CdTe, измеренные для различных длин волн возбуждения.**

асимптотического затухания  $\tau_{eff}(\eta_1(s), \tau_R)$  следует использовать как минимум две длины волны возбуждения: значительное уменьшение амплитуды ( $A_1(\eta_1(s))$ ) основной моды распада  $\eta_1$  отчётливо наблюдается на рис. 5., а с использованием неоднородного начального режима возбуждения, а  $\tau_{eff}$  можно измерить наиболее точно для однородного возбуждения.

Оценив  $A_1$  для известных  $\alpha d$  и  $D$  параметр  $s$  извлекается напрямую. Извлечённые значения  $A_1$  как функции коэффициента поглощения  $\alpha$  изображены на рис. 6. При низком возбуждении, когда концентрация акцептора  $N_A$  в  $p$ -CdTe превосходит избыточную плотность носителей,  $n < N_A$ , значения  $D$  приближаются к этому  $D_p = 2 \text{ см}^2/\text{с}$  дырок. Для высокого уровня возбуждения получается  $D \approx 3,7 \text{ см}^2/\text{с}$  при использовании  $D_n = 25 \text{ см}^2/\text{с}$ . Предполагая, что эти параметры, значение  $s = 2 \times 10^7 \text{ см}/\text{с}$  было извлечено, довольно близко к тому, что использовалось в работе.

Такие большие значения  $s$  означают, что диффузионная ограниченная поверхностная рекомбинация может иметь место с собственными мгновенными временами жизни  $\tau_D = d_{eff}^2 / \pi^2 D$ . Расчётные значения таких мгновенных времён жизни 5 нс довольно близки к тем значениям, которые наблюдаются на рис. 5., а для неоднородного возбуждения при 800 нм  $d_{eff} \approx \alpha^{-1}$ .

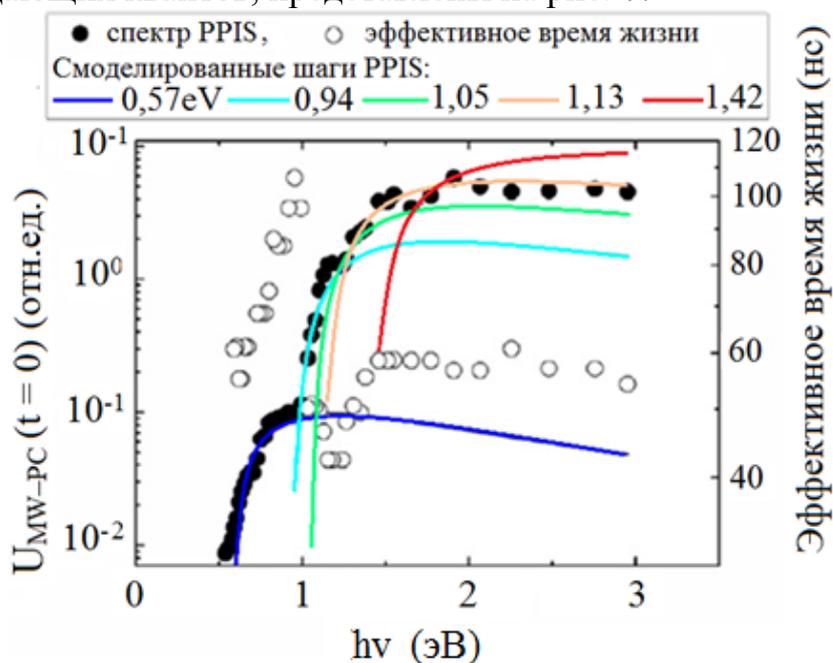
С другой стороны (другим атрибутом), присущим для ряда переходных процессов, определяемых поверхностной рекомбинацией и получаемых для различной глубины возбуждения (рис. 5.а), является почти неизменное эффективное время жизни в фазе асимптотического затухания (рассматриваемое как тот же наклон затухания на рис. 5.а). Тогда значения времени жизни рекомбинации могут быть более надёжно извлечены из

переходных процессов, зарегистрированных при почти однородном возбуждении (для  $\lambda_{exc} = 1000$  нм). Таким образом, была оценена величина  $\tau_R \approx 19$  нс.

Влияние поверхностной рекомбинации в пленке CdTe, измеренное методом контактной фотопроводимости, четко не наблюдалось. Это можно объяснить сравнительно небольшой относительной площадью межэлектродного зазора по сравнению с площадью боковых контактов. Поверхность под контактами, по-видимому, пассивируется барьером металл-CdTe, в то время как инжекция носителя из контактов приводит к достаточному заполнению поверхностных ловушек.

На другой поверхности в границе раздела структуры CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si статический встроенный заряд в SiO<sub>2</sub> является поверхностным рекомбинационным гасителем.

Спектры PPIS, записанные в структуре CdTe - SiO<sub>2</sub>-Si при 300 К, путем изменения энергии фотонов возбуждения и сохранения одинакового количества падающих квантов, представлены на рис. 7.



**Рис. 7.** Импульсные спектры фотоионизации, полученные при комнатной температуре на поликристаллической пленке CdTe, выращенной на подложке SiO<sub>2</sub>-Si, путем регистрации переходных процессов фотопроводимости. Извлеченные значения пороговой энергии фотоионизации были отнесены к различным точечным дефектам в материале CdTe и идентифицированы с использованием литературных данных, как: 0,57 эВ-Te, 0,94 эВ- (0,8 эВ) V<sub>Cd</sub>, 1,13 эВ-V<sub>Te</sub>, 1,42 эВ-V<sub>Cd</sub> и 1,05 эВ-точечный структурный дефект Te в Cd-слое.

Пять шагов PPIS могут быть выведены из рис. 7. Эти шаги были смоделированы с использованием модели Луковского. Сплошные линии на рис.7 представляют смоделированные спектральные шаги, приписываемые различным значениям пороговой энергии фотоионизации и сохраняющие одинаковое количество падающих фотонов. Эти линии достаточно хорошо соответствуют спектральным изменениям фототока. Вариации времени жизни эффективных носителей (правая шкала на рис. 7) показывают немонотонные

изменения, которые коррелируют только с несколькими спектральными шагами. Самый малый спектральный шаг с извлеченной пороговой энергией фотоионизации  $E_{b1} = 0,57$  эВ коррелирует с увеличением времени жизни носителей. Это означает, что фотоиндуцированные переходы носителей приводят к фото-нейтрализации ловушек, что вызывает увеличение заряженных ловушек.

Следующий спектральный шаг с извлеченной пороговой энергией фотоионизации  $E_{b2} = 0,94$  эВ коррелирует с уменьшением времени жизни носителей. Это означает, что на фотоионизацию этих ловушек, которые становятся активными центрами захвата после опустошения. Другие разрешенные шаги PPIS с пороговыми энергиями активации  $E_{b3} = 1,05$  эВ,  $E_{b4} = 1,13$  эВ и  $E_{b5} = 1,42$  эВ не сопровождаются явным изменением времени жизни носителей. Это можно объяснить тем, что глубокие ловушки ( $E_G - E_{b1} = 0,93$  эВ и  $E_G - E_{b2} = 0,56$  эВ) действуют как центры захвата доминирующих носителей. Извлеченные значения пороговой энергии фотоионизации для этих объемных ловушек были приписаны различным точечным дефектам в материале CdTe и идентифицированы с использованием литературных данных. Была проведена следующая обозначение шагов PPIS:  $E_{b1} = 0,57$  эВ приписывается межузельному Te<sub>i</sub>,  $E_{b2} = 0,94$  эВ соответствует вакансии Cd ( $V_{Cd}$ ) с 0,94 эВ (0,8 эВ),  $E_{b3} = 1,05$  эВ является дефектом межузла Te на Cd,  $E_{b4} = 1,13$  эВ относится к вакансии Te ( $V_{Te}$ ), а  $E_{b5} = 1,42$  эВ также связано с вакансией Cd ( $V_{Cd}$ ). Пороговая энергия фотоионизации указанных ловушек отличается от энергии, приписываемой поверхностной ловушке с  $E_s = 1.23$  эВ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Впервые экспериментально установлено, что явно выраженный эффект спектральной памяти в пленочной гетероструктуре p-CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al, который связываются индуцированной встроенным электрическим зарядом диэлектрика и выявлено глубоких примесных центров в CdTe, обеспечивающих высокую спектральную фоточувствительность в ближней инфракрасной области спектра (700÷1000 нм), что позволяет регистрировать сигналы в широких пределах длинноволнового светового излучения (0,5÷2,7 мкм).

2. Создан на основе гетероструктуры CdTe-ZnSe фотодетектор эффективность собирания, которых достигается до 80% и позволяют управлять их спектральной фоточувствительности с сохранением селективностью в широких диапазонах электромагнитного излучения (0,4÷3,0 мкм), что можно использовать его в медицине.

3. Выявлено, что в гетероструктурах на основе p-CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al явное изменение энергии активации глубокого уровня 0,7 эВ (по эффекту Пула-

Френкеля), обеспечивающих управлять спектральной фоточувствительностью под действием внешних воздействий в примесной области поглощения.

4. Впервые показано, что в поликристаллических пленках CdTe доминирующий глубокий уровень с энергией фотоактивации 1,23 эВ, которые приводят к уменьшению воздействия поверхностной рекомбинации.

5. Выявлено, что объёмные ловушки в гетероструктуре p-CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al обладают спектром с пятью этапами фотоионизации, имеющими пороговую энергию фотоионизации  $E_{b1} = 0,57$  эВ,  $E_{b2} = 0,94$  эВ и  $E_{b5} = 1,42$  эВ,  $E_{b4} = 1,13$  эВ, и  $E_{b3} = 1,05$  эВ. которые приписывают междоузлиям Te ( $E_{b1}$ ), вакансиям Cd ( $E_{b2}$  и  $E_{b5}$ ) и Te ( $E_{b4}$ ) и принадлежащему дефекту (Te в Cd) ( $E_{b3}$ ) соответственно.

6. Впервые с применением методики бесконтактной спектроскопии глубоких ловушек и оценки скорости поверхностной рекомбинации в отдельно стоящих тонких слоях поликристаллических пленок CdTe установленных на полированных сапфировых подложках, которые позволяло определить величину поверхностной рекомбинации  $\tau_R \approx 19$  нс.

7. Впервые показано, что вариации времени жизни эффективных носителей, коррелирует только несколькими спектральными шагами и определен самый малый спектральный шаг с извлеченной пороговой энергией фотоионизации  $E_{b1}=0.57$ эВ, который коррелируется с увеличением времени жизни носителей, приводящих увеличение заряженных ловушек.



**SCIENTIFIC COUNCIL DSc. 03/30.12.2019.FM/T.01.12 ON THE  
AWARDING ACADEMIC DEGREES AT THE SCIENTIFIC RESEARCH  
INSTITUTE OF SEMICONDUCTOR PHYSICS AND  
MICROELECTRONICS AT THE NATIONAL UNIVERSITY OF  
UZBEKISTAN**

---

**FERGANA STATE UNIVERSITY**

**ALIMOV NODIR ESONALIYEVICH**

**FOTOELECTRIC PHENOMENA IN HETEROSTRUCTURES OF WIDE –  
GAP SEMICONDUCTORS BASED ON CdTe-ZnSe AND CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al  
WITH CONTROLLED PROPERTIES**

**01.04.10 - Physics of semiconductors**

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

**Tashkent – 2023**

The theme of the dissertation of the doctor of philosophy(PhD) on physical and mathematical sciences was registered by the Supreme Attestation Commission under the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2022.2.PhD/FM29.

The dissertation was carried out at the Fergana State University

The abstract of the dissertation was posted in three (Uzbek, Russian, English (resume)) languages on the website of the Scientific Council at [www.ispm.uz](http://www.ispm.uz) and on the website of "ZiyoNet" Information and Educational Portal at [www.ziyo.net](http://www.ziyo.net).

**Scientific supervisor:** **Otajonov Salim Madrakhimovich**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

**Official opponents:** **Dadamirzaev Mukhammadjon Gulomkodirovich**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

**Ayupov Kutup Sautovich**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

**Leading organization:** **Nukus State Pedagogical Institute**

The defense of the doctoral dissertation will be held on "05" 07 2023, at 12<sup>02</sup> at the meeting of the Scientific Council No. DSc.03/30.12.2019.FM/T.01.12 at the Scientific Research Institute of Physics of Semiconductors and Microelectronics at the National University of Uzbekistan (Address: 20 Yangi Olmazor str., 100057 Tashkent city, Uzbekistan. Tel. (+99871) 248-79-94, fax: (+99871) 248-79-92, e-mail: [info@ispm.uz](mailto:info@ispm.uz))

The doctoral dissertation can be looked through in the ICT Implementation Unit (registered under No. 50). Address: 20 Yangi Olmazor str., 100057 Tashkent city, Uzbekistan. Tel.: (+99871) 248-79-59, e-mail: [info@ispm.uz](mailto:info@ispm.uz).

The abstract of the dissertation was distributed on "21" 06 2023.  
(Registry record No. 50 dated "21" 06 2023)



**Sh. B. Utamurova,**  
Chairwoman of the Scientific Council on  
Award of Scientific Degrees,  
Doctor of Physical and Mathematical  
Sciences (DSc), Professor

**O.Kh. Kuldashov,**  
Scientific Secretary of the Scientific Council  
on Award of Scientific Degrees, Doctor of  
Technical Sciences (DSc), Ass. Professor

**N.A. Turgunov,**  
Chairman of the Scientific Seminar of the  
Scientific Council for the Award of Scientific  
Degrees, Doctor of Physics and Mathematics  
Sciences (DSc), Ass. Professor

## INTRODUCTION (abstract of the PhD dissertation)

**The aim of the research work** is to reveal new photoelectric phenomena associated with deep levels in CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al and CdTe-ZnSe heterostructures in order to create effective photoconverters in the visible and near infrared regions based on them.

**The objects of investigation** are compounds of the elements of the A<sup>II</sup>B<sup>VI</sup> group and thin-film heterostructures CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al, CdTe-ZnSe.

**The scientific novelty of the research** consists of the following:

for the first time, the possibility of using a complex measurement of transient processes in the CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al heterostructure by the methods of a microwave probe and contact photoconductivity using laser excitation in the range of 300–2300 nm was shown, which made it possible to determine the characteristic time of surface recombination  $\tau_R = 19$  ns;

on the basis of thin-film heterostructures CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al and CdTe-ZnSe, optimal technologies have been developed for obtaining photodetectors operating in the wavelength range of 0.4-3.0  $\mu\text{m}$ ;

for the first time, it was established that non-stationary transient processes of photoconductivity of thin  $d \sim (0.5 - 0.8)$   $\mu\text{m}$  polycrystalline CdTe films in CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al and CdTe-ZnSe heterostructures are due to surface recombinations of photocarriers through deep traps with an activation energy of  $\sim 1, 23$  eV;

for the first time, using the microwave probe photoconductivity method (MW-PC), a significant intrinsic photoconductivity of CdTe thin films was discovered, and photoionization energies were determined, which are  $E_{b1} = 0.57$  eV (interstitial Te),  $E_{b2} = 0.94$  eV and  $E_{b5} = 1.42$  eV (Cd vacancies), the presence of volume traps of internal defects with  $E_{b4} = 1.13$  eV (Te vacancies) and  $E_{b3} = 1.05$  eV (complex of Cd and Te point defects);

for the first time, the dependence of the photosensitivity spectrum of film heterostructures CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al and CdTe-ZnSe on an external electric field was established, and with increasing voltage from 0 to 100 V, the maximum short-circuit current  $I_{SC}$  shifts to the short-wave region of the spectrum within 0.93 - 1.5 eV.

**Implementation of research results.** based on the obtained scientific results on the structural, electrophysical, photoelectric properties and mechanisms of current transfer of thin-film heterostructures based on CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al:

The development of a method for using the CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al heterostructure as a photodetector for recording X-rays was applied in the fundamental project OT-F2-71 “Investigation of the effect of light on the current-voltage characteristics of a deformed pn 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. (project leader: Doctor of Physical and Mathematical Sciences M.G. Dadamirzaev)

The developed semiconductor sensor from the ZnSe-CdTe heterostructure, obtained by growing thin CdTe films in a vacuum of  $10^{-6}$  mm Hg on a ZnSe surface with a condensation rate of 0.45 nm/s 1  $\mu\text{m}$  thick, has found application as signal light and electrical sensors in the development of smart traffic lights and welding

machines of the organization OOO "OLTARIK-INNOVATSIYA". The developed sensors based on CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al, CdTe-ZnSe heterostructures make it possible to create photodetectors and photodetectors with an operating range of 0.4 - 3.0 μm of electromagnetic radiation, which are a tool for quickly assessing the barrier parameters in detector structures radiation and when registering X-ray and ultraviolet radiation, can be used in various technical developments of OLTARIK-INNOVATION LLC (reference No. 25/01 dated October 29, 2021 of OLTARIK-INNOVATION LLC);

in JSC FOTON has found application, the possibility of complex measurement of transient processes in the CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al heterostructure using microwave probe methods and contact photoconductivity using laser excitation in the range of 300 - 2300 nm, which made it possible to determine the characteristic time of surface recombination  $\tau_R = 19$  ns. The possibility of creating photodetectors of electromagnetic radiation in the spectral region of 0.4 - 3.0 μm and non-stationary transient processes of photoconductivity of thin  $d \sim (0.5 - 0.8)$  μm polycrystalline CdTe films in CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al and CdTe-ZnSe heterostructures due to surface recombinations of photocarriers through deep traps with an activation energy of  $\sim 1.23$  eV, were used in the production of semiconductor electronic devices manufactured by FOTON JSC (Reference No. 04-3/2405 dated November 21, 2022 of the Joint-Stock Company "Uzeltekhsanoat"). The use of scientific results made it possible to manufacture electronic technical devices on experimental samples and improve their electrophysical parameters.

**The structure and volume of the dissertation.** The dissertation consists of an introduction, four chapters, conclusion, list of references and applications. The text of the dissertation consists of 112 pages, including 26 figures and 1 tables.

**ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ**  
**СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**  
**LIST OF PUBLISHED WORKS**

**I бўлим (I часть, part I)**

1. Абдулхамидов А., Отажонов С.М., Алимов Н.Э., Набиев М. Патент Полупроводниковый дозиметрический датчик. Патент №20140014, 13.01.2014 Официальный бюллетень. Агентство по интеллектуальной собственности РУз 2015. 7 (171).

2. Отажонов С.М., Алимов Н.Э., Жураев Н., Мовлонов П., Халилов М., Ботиров К. Элементы памяти с управляемым временем запоминания и спектральной фоточувствительности. Патент № IAP 20170249. 26 декабря 2017. Официальный бюллетень. Агентство по интеллектуальной собственности РУз 2018. 12(212).

3. Gaubas E., Šeponis T., Dobrovolskas D., Mickevičius J., Pavlov J., Rumbauskas V., Vaitkus J.V., Otajonov S., Alimov N. Study of polycrystalline CdTe films by contact and contactless pulsed photo-ionization spectroscopy // Thin Solid Films, 2018 -Pp. 231–235 (№3 Scopus, IF = 2.183)

4. Отажонов С.М., Алимов Н.Э., Ботиров К.А. «Создание преобразователя излучения на основе пленочной гетероструктуры p-CdTe-ZnSe»//ISSN 2308-4804. Science and World. 2020. № 11 (87). С.11-15. (№5 GIF, IF= 0,325)

5. Отажонов С.М., Алимов Н.Э., Мавлонов П. Управление фоточувствительности гетероструктуры CdTe-SiO-Si -Al с глубокими примесными уровнями под действием внешних факторов// ISSN 3375-2389. Danish scientific journal. Vol. 1, №34, 2020, С. 28-33 (№20 GIF)

6. Вайткус Ю.Ю., Отажонов С.М., Алимов Н.Э. Особенности физических свойств модифицированной поверхности пленочной гетероструктуры p – CdTe–ZnSe с глубокими примесными уровнями.// Scientific Bulletin. Physical and Mathematical Research, - , 2019. –Vol.1 Article2. -Pp.15-21. (01.00.00; №13)

7. Otajonov S.M., Alimov N.E., Movlonov P.I., Botirov K.A. CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al heterostructure photosensitivity control with deep impurity levels under external factors.// Euroasion Journal of Semiconductors Science and Engineering. 2020.- Pp.22-25. (01.00.00; №16)

8. Отажонов С.М., Алимов Н.Э., Абдулахамидов А., Акбаров К., Умарова М. Стимулирование аномального фотонапряжения под действием внешнего электрического поля в нанокристаллических структурах на основе CdTe-ZnSe с глубокими примесными уровнями.// «Физическая инженерия поверхности». Украина 2008 г. Т.6. № 1-2, С. 58-60 (2004-2014 годах включен список ВАК РУз)

9. Отажонов С.М., Алимов Н.Э., Акбаров К., Абдуллаев К., Дадажонова Х., Отажоннова Д., Рахмонкулов М. Оптическая спектральная память в пленочной гетероструктуре p-CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si// Физическая Инженерия Поверхности. 2009 том 7. №1-2. Украина. (2004-2014 годах включен список ВАК РУз)

## II бўлим (II часть; part II)

10. Отажонов С.М., Алимов Н.Э., Ботиров К.А. Оптическая спектральная память в пленочной ультракристаллической гетероструктуре p-CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si // Научно-Технический журнал ФерПИ. 2018. Том 22. №2. С. 113-116 (05.00.00; № 20)

11. Отажонов С.М., Алимов Н.Э. Изменение потенциальных барьеров нанокристаллических тонких пленок p-CdTe в условиях специфических внешних воздействий // FDU Ilmiy xabarlar. 2010. №4. С. 5-9.

12. Отажонов С.М., Алимов Н.Э. Investigation of polycrystalline silicon and cadmium telluride based structures properties // FDU Ilmiy xabarlar. 2015. №4. С. 47-6.

13. Отажонов С.М., Алимов Н.Э., Зайнолобиддинова С.М., Халилов М.М., Юсупова Д.А., Якубова Ш. Изменение потенциальных барьеров низкоразмерных тонких пленок p-CdTe в условиях внешних воздействий // Журнал физики и инженерии поверхности Украина 2016 том 1, № 1, С. 52–56;

14. Алимов Н.Э., Ботиров К.А., Мовлонов П., Отажонов С.М., Халилов М.М., Эргашев О., Якубова Ш. Изучение деформационных эффектов в нанокристаллических фоточувствительных активированных тонких пленках p-CdTe // Журнал физики и инженерии поверхности. Украина 2016 том 2, № 2, С.140 – 144;

15. Жураев Н., Халилов М., Отажонов С.М., Алимов Н.Э. Фоточувствительность и механизм протекания тока в гетероструктурах p - CdTe - SiO<sub>2</sub> - Si с глубокими примесными уровнями. // Журнал физики и инженерии поверхности Украина 2017 том 2, № 2, С. 29-32;

16. Алимов Н.Э., Косимова Г., Якубова Ш. Влияние глубоких примесных уровней на фотопроводимость и фото - ЭДС в пленочной гетероструктуре p – CdTe–ZnSe//Конденсацияланган мухитлар физикаси ва материалшуносликнинг долзарб масалалари”. – Фарғона, 14-15 май 2014. – С.134-136

17. Алимов Н.Э., Матусмонов Р.М., Хайитова Г.Б. Спектральная память в пленочной низкоразмерных соединениях p-CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al.//Международная конф. Фундаментальные и прикладные вопросы физики, – Ташкент, 6 - 7 ноябрь 2014. – С.66-67.

18. Alimov N.E., Otazhonov S.M., Ismoilova D. Role of deep impurity levels in film heterostructures p – CdTe–ZnSe.// IUPAC 11<sup>th</sup> International Conference on Novel Materials and Synthesis (NMS - XI) 24 International Symposium on Fine Chemistry and Functional Polymers (FCFP - XXIII), – Qinhuangdao, 11 – 16 oktober 2015. – pp. 16.

19. Вайткус Ю.Ю., Алимов Н.Э., Ботиров К.А., Отажонов С.М.// Изменение спектральные фоточувствительности нанокристаллических плёнок p-CdTe под действием технологических факторов.// Mikroelektronika, nanozarralar fizikasi va texnologiyalari Respublika ilmiy-amaliy anjumani materiallari. – Andijan, 4-5 dekabr 2015. – С. 161–163.

20. Отажонов С.М., Алимов Н.Э., Ахмаджонов Р., Абдуллаев Ш.Ш., Мовлонов П.И., Туланов О., Ш.Якубова. Элементы памяти на основе

гетероструктуры CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si активированных серебром и медью.// Конференция «Кремний-2016», – Новосибирск, 12 - 15 сентябрь 2016. – С.59

21. Алимов Н.Э., Ботиров К.А., Холдоров М.Б., Отажонов С.М. Стимулирование фотоэлектрических свойств тонких пленок CdTe гетероструктурах. // Сборник материалов республиканской научно-практической конференции «перспективы реформ, проводимых в системе высшего образования республики Узбекистан». – Ташкент, 15 март 2017. – С. 207–209.

22. Алимов Н.Э., Ботиров К.А., Отажонов С.М., Тургунова О., Холдоров М. Спектральная фоточувствительность ближе инфракрасной области спектра на основе гетероструктуры p-CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al.//“ Muqobil energiya turlari va ulardan foydalanish istiqbollari” Respublika ilmiy-texnikaviy anjumani materiallari. – Farg’ona, 12-may 2017. – С. 61–63.

23. Алимов Н.Э., Холдоров М., Муллаева М., Туланов О.,. Влияние внешних воздействие на управляющих свойств гетероструктуры на основе p-CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al.//“ Muqobil energiya turlari va ulardan foydalanish istiqbollari” Respublika ilmiy-texnikaviy anjumani materiallari. –Farg’ona, 12-may 2017. – С. 88 – 90.

24. Алимов Н.Э., Ботиров К.А., Маматов Д.Х., Мовлонов П., Отажонов С.М., Туланов О., Якубова Ш. О возможности усиления сцинтилляционного излучения ультракристаллических пленок CdTe полученных на селенида цинка.//материалы IV Международной конференции по Оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро- и наноструктурах, – Фергана, 25-26 мая 2018. – С. 93–96.

25. Alimov N., Otajonov S., Tolanov O. Temperature variations of time of life carriers in heterostructures p-CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si with deep impurity levels // XII Международная конференция КРЕМНИЙ-2018, – Черногловка, 22 - 26 октября, 2018. – С. 107.

26. Н.Э. Алимов, К.А.Ботиров, С.М.Отажонов. Фотопроводимость в ультракристаллических гетероструктурах CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si.//Российская конференция и школа молодых ученых по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники (с участием иностранных ученых) ФОТОНИКА - 2019, – Новосибирск, 27-31 мая, 2019. – С. 136.

27. Отажонов С.М., Алимов Н.Э., Ботиров К.А., Собиров С. Использование поликристаллических структур на основе кремния и теллурида кадмия в качестве записи информации.// Axborot-kommunikatsiya texnologiyalari va telekommunikatsiyalarning zamonaviy muammolari va echimlari Respublika ilmiy-texnik anjumani, – Farg’ona, 30- 31 may 2019. – С. 235–237.

28. Отажонов С.М., Ботиров К.А., Юнусов Н. Электронный перенос носителей заряда в гетероструктуре CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si-Al с глубокими примесными уровнями под действием внешних факторов.//Материалы V Международной конференции по Оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро- и наноструктурах. – Фергана, 13-14 ноября 2020. – С. 394–396.

29. Отажонов С.М., Алимов Н.Э., Ботиров К.А. Запоминающее устройство на основе гетероструктуры CdTe-SiO<sub>2</sub>-Si.// XIII Международная конференция КРЕМНИЙ-2020 по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния и приборов на их основе, – Ялта, 21-25 сентябрь 2020. – С. 361–364.





Avtoreferat “Til va adabiyot ta’limi” jurnali taxririya-tadqiqotida taxrirdan o‘tkazildi va o‘zbek, rus va ingliz tillaridagi matnlarini mosligi tekshirildi (21.06.2023).

Bichim 60x841/16. Raqamli bosma usuli. Times garniturasida.

Shartli bosma tabog‘i: 3,25. Adadi 60. Buyurtma № 46.

Guvohnoma reestr № 10-4434

Yarimo‘tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti  
bosmaxonasida chop etilgan.

Bosmaxona manzili: 100057, Toshkent sh., Yangi Olmazor ko‘chasi, 20-uy.

