

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

FARG‘ONA POLITEKNIKA INSTITUTI

NURMATOV OZODBEK RAVSHANBOY O‘G‘LI

**CdTe:Ag, Cu, Cdva Sb₂Se₃:Se ASOSIDAGI YUPQA POLIKRISTALL
PARDALARDA YANGI FOTOELEKTRET HODISALAR**

01.04.07 – Kondensirlangan holat fizikasi

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

Farg‘ona – 2025

**Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiya
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**

Nurmatov Ozodbek Ravshanboy o'g'li

CdTe:Ag, Cu, Cd va Sb₂Se₃:Se asosidagi yuqqa polikristall
pardalarda yangi fotoelektret hodisalar..... 3

Нурматов Озодбек Равшанбой угли

Новые фотоэлектрические явления в тонких
поликристаллических пленках CdTe:Ag, Cu, Cd и
Sb₂Se₃:Se..... 24

Nurmatov Ozodbek Ravshanboy ugli

New photoelectret phenomena in thin polycrystalline films of
CdTe:Ag, Cu, Cd and Sb₂Se₃:Se 46

E'lon qilingan ishlar ro'yxati

Список опубликованных работ
List of published works..... 49

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

FARG‘ONA POLITEXNIKA INSTITUTI

NURMATOV OZODBEK RAVSHANBOY O‘G‘LI

**CdTe:Ag, Cu, Cdva Sb₂Se₃:Se ASOSIDAGI YUPQA POLIKRISTALL
PARDALARDA YANGI FOTOELEKTRET HODISALAR**

01.04.07 – Kondensirlangan holat fizikasi

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

Farg‘ona – 2025

Falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O‘zbekiston Respublikasi Vazirlar Mahkamasi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2024.4.PhD/FM1200 raqam bilan ro‘yxatga olingan.

Dissertatsiya Farg‘ona poltexnika institutida bajarilgan.

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

Ilmiy rahbar:

Yuldashev Nosirjon Xaydarovich
fizika-matematika fanlari doktori, professori

Rasmiy opponentlar:

Mussayeva Malika Anvarovna
fizika-matematika fanlari doktori, professori

Abdukadirov Abduvaxit Gapirovich
fizika-matematika fanlari nomzodi, dotsent

Yetakchi tashkilot:

Namangan muhandislik-qurilish instituti

Dissertatsiyaning himoyasi Farg‘ona politexnika instituti huzuridagi falsafa doktori ilmiy darajasini beruvchi PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 raqamli Ilmiy kengashning 2025 yil «__»__ soat __ dagi majlisida bo‘lib o‘tadi. (Manzil: 150107, Farg‘ona sh. Farg‘ona k. 86 uy. Tel: (+998 73) 241-12-06, faks (+998 73) 241-12-06, e-mail: uzferfizika@mail.ru, kichik majlislar zali).

Dissertatsiya bilan Farg‘ona politexnika institutining axborot–resurs markazi ilmiy-uslubiy bo‘limida tanishish mumkin. (__ raqami bilan ro‘yxatga olingan). (Manzil: 150107, Farg‘ona sh. Farg‘ona k. 86 uy. Tel: (+998 91) 328-32-69).

Dissertatsiya avtoreferati 2025 yil «__» _____ kuni tarqatildi.

(2025 yil «__» _____ dagi _____ raqamli reestr bayonnomasi).

N.A. Sultanov

Falsafa doktori ilmiy darajasini beruvchi
Ilmiy Kengash raisining o‘rinbosari, f-m.f.d.,
professor

B.J. Axmadaliyev

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

S.M. Otajonov

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

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiya annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahonda mikroelektronika va fotoenergetika sohasida istiqbolli yo‘nalishlardan biri II-VI guruhlariga mansub, yangi fizik xususiyatlarga ega bo‘lgan binar yarim o‘tkazgich birikmalar asosidagi materiallarni yaratish hisoblanadi. Chunonchi, keng taqiqlangan zonali yarim o‘tkazgichlar CdS, CdSe, CdTe da fotoelektret effekt, ya’ni fotoelektret holatning shakllanishi kuzatiladi. Bu effekt fotogeneratsiyalangan erkin zaryad tashuvchilarning tashqi elektr maydon ta’sirida chuqur kirishma sathlarda notekis taqsimlanishi bilan bog‘liq bo‘lib, u uzoq vaqt davomida saqlanadi. Bugungi kunda tashqi qutblovchi maydonsiz fotoelektret holat kuzatiladigan yarim o‘tkazgich yupqa parda tuzilmalarni olish va o‘rganishga alohida e’tibor qaratilmoqda.

Jahonda ayni paytda kadmiy xalkogenidli yupqa parda tuzilmalarning elektrofizik, fotoelektrik va optik xususiyatlarini o‘rganish hamda ular asosida tabiiy sharoitlarda ishlaydigan fotorezistorlar, fotokalitlar va turli sensorlarni yaratishga katta ahamiyat berilmoqda. Yuqori fotoelektret holat parametrlariga ega bo‘lgan fotovoltaik yupqa pardalar asosida tashqi qutblovchi maydonsiz fotoelektretlar olish texnologiyasi va ularni tashqi ta’sirlar orqali maqsadli boshqarish masalalari yetarlicha o‘rganilmagan. Shu sababli, CdTe:Ag, Cu, Cdva Sb₂Se₃:Se yarim o‘tkazgich yupqa pardalarda tashqi qutblovchi maydonsiz anomal fotovoltaik effekt yordamida fotoelektret holatni o‘rganish va ularni olish texnologiyasini ishlab chiqish kondensirlangan holat fizikasi sohasidagi dolzarb vazifalardan hisoblanmoqda.

Respublikamizda yarim o‘tkazgich materiallarning elektrofizik xususiyatlarini o‘rganishga, jumladan, yarim o‘tkazgichlarda oraliq bosqichsiz quyosh energiyasidan elektr energiyasi olishning istiqbolli usullarini yaratishga qaratilgan kompleks tadbirlar amalga oshirilmoqda va ma’lum natijalarga erishilmoqda. 2022–2026 yillarda Yangi O‘zbekistonni rivojlantirish strategiyasida «... iqtisodiyotni elektr energiyasi bilan uzluksiz ta’minlash, hayotning barcha sohalariga “Yashil iqtisodiyot” texnologiyalarini faol joriy etish, energiya samaradorligini oshirish...» kabi aniq vazifalar belgilangan¹. Ushbu vazifalarni amalga oshirishda mavjud an’anaviy energiya manbalarini takomillashtirishning yangi usullarini ishlab chiqish, arzon, yuqori ishonchli, ekologik toza va xavfsiz muqobil energiya manbalarini yaratish muhim hisoblanadi.

O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-sonli “2022–2026-yillarda Yangi O‘zbekistonni rivojlantirish strategiyasi to‘g‘risida”gi farmonida, 2021-yil 19-martdagi “Fizika sohasida ta’lim sifatini oshirish va ilmiy tadqiqotlarni takomillashtirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi PQ-5032-sonli qarorida, shuningdek, Vazirlar Mahkamasining 2020-yil 23-iyuldagi 452-sonli “Qayta tiklanuvchi energiya manbalari qurilmalari va ular tomonidan ishlab chiqarilgan energiyani davlat hisobini yuritish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi qarorida va ushbu sohada qabul qilingan boshqa normativ-huquqiy hujjatlarda

¹ [Yangi O‘zbekistonni rivojlantirish strategiyasi \(2022–2026\)](#)

belgilangan vazifalarni hal etishga mazkur dissertatsiya tadqiqoti muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning O‘zbekiston Respublikasida fan va texnologiyani rivojlanishning ustuvor yo‘nalishlariga mosligi. Mazkur tadqiqot O‘zbekiston Respublikasida ilm-fan va texnologiyalarni rivojlantirishning ustuvor yo‘nalishlaridan biri bo‘lgan PPI-3 “Energetika, energiya va resurs tejamkorligi, transport, mashina va asbobsozlik, zamonaviy elektronika, mikroelektronika, fotonika va elektron asbobsozlikni rivojlantirish”ga muvofiq bajarilgan.

Muammoning o‘rganilganlik darajasi. Bir qator mashhur chet el ilmiy markazlarida CdS, CdSe, CdTe asosidagi yupqa parda tuzilmalarning tok o‘tkazish mexanizmlari, fotoo‘tkazuvchanlik, optik spektrlari va burchak ostida o‘stirilgan CdTe asosidagi yupqa pardalarning fotovoltaik xususiyatlari batafsil o‘rganilgan bo‘lib, ular optoelektronikada qo‘llanilmoqda. Bunday ilmiy markazlar qatoriga Lomonosov nomidagi Moskva Davlat Universiteti (Rossiya)¹, Ukraina Fanlar Akademiyasi Yarim o‘tkazgichlar Fizikasi Instituti², Meksikaning Gvadalaxara universiteti, AQShning Delaver universiteti³, Yaponiya Milliy Materialshunoslik Instituti, Lebedev nomidagi Fizika Instituti va Ioffe nomidagi Fizika-Texnika Instituti, shuningdek, Litva Vilnyus universiteti va boshqalar kiradi. Tadqiqotlarda ko‘rsatilganidek, kadmiy xalkogenidlari asosidagi polikristall yupqa parda elementlar yuqori fotosezgirlikka ega bo‘lib, bu ularning tayyorlash texnologiyasiga bog‘liq holda o‘ziga xos chuqur sathli hajmiy lokal markazlar va kristal don chegaralarining maxsus elektron xususiyatlari bilan izohlanadi.

O‘zbekistonning mashhur olimlari fotovoltaik yupqa pardalarni tayyorlash texnologiyasi va ularning asosiy fizik xususiyatlarini o‘rganish bo‘yicha faol ish olib borgan. Xususan, E.A. Adirovich va uning shogirdlari – T. Mirzamahmudov, Yu.M. Yuabov, shuningdek, Farg‘ona fiziklari E.I. Bilyalov, A.Ya. Afuzov, N.X. Yo‘ldashev hamda S.Z. Shamirzayev va K.M. Doshonovlar tomonidan xalkogenid yarim o‘tkazgichlar asosida yupqa parda texnologiyalari ishlab chiqilgan va ularda kuzatiladigan anomal fotovoltaik (AFV) va fotoelektret effektlar nazariy jihatdan ma‘lum darajada o‘rganilgan. M.S. Saidov, Sh.A. Mirsagatov, T.M. Razikov, M.A. Karimov, J. Ergashev va S.M. Otajonovlarning eksperimental ishlarida esa kadmiy xalkogenidlarining yupqa pardali tuzilmalarida fotoelektrik xususiyatlar hamda tok o‘tkazish mexanizmlari qarab chiqilgan. Biroq, fotovoltaik plenklar asosida tashqi maydonsiz fotoelektretlarni tayyorlash texnologiyasi mukammal yoritilgan ishlar

¹ **Saidjonov B.M.** Yo‘naltirilgan sintez va $CdSe_{1-x}S_x/CdS(ZnS)$ kolloidal ikki o‘lchovli nanostrukturalarining optik xususiyatlari – oq yorug‘lik lyuminoforlarining istiqbolli yo‘nalishlari // Kimyo fanlari nomzodi ilmiy darajasini olish uchun dissertatsiya. Moskva Davlat Universiteti, 2021. - 150 bet.

² **Kunets V.P., Kulish N.R., Lisitsa M.P., Briska V.P.** Geksagonal kvant nuqtalardagi CdS_xSe_{1-x} xos nuqsonlarning fotoqizdirish modeli // Yarim o‘tkazgichlar fizika va texnikasi – Sankt-Peterburg, 2004. - №(38) 4. - B. 465-468.

³ **Rivera L.P., García E., Cardona D., Pérez-Centeno A., Camps E., Santana-Aranda M.A., Gómez-Rosas G., de Moure-Flores F., Chávez-Chávez A., Quiñones-Galván J.G.** CdTe:Sn yupqa plenklar CdTe va Sn nishonlarining bir vaqtda lazer ablatsiyasi bilan yotqizilgan // Mater. Res. Express 7 (2020).

mavjud emas. Shuningdek, yupqa polikristal plenkali tuzilmalarda tashqi maydonsiz fotoelektret holatni eksperimental va nazariy o'rganishga bag'ishlangan ilmiy ishlar ham juda kam.

Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya oliy ta'lim muassasasidagi ilmiy-tadqiqot ishlarining rejalari bilan bog'liqligi. Dissertatsiya ishi Farg'ona politexnika institutida, xususan, institutning 2020–2025-yillardagi istiqbolli ilmiy rejasiga muvofiq «Xalkogenid birikmalarning yarim o'tkazgichli yupqa parda tuzilmalarida yangi fotoelektrik va fotovoltaik hodisalar hamda mikroelektron foto o'zgartirgichlarni yaratish» mavzusida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi CdTe:Ag, Cu, Cd va Sb₂Se₃:Se asosida uzoq vaqt relaksatsiyalanadigan yuqori fotoelektret kuchlanish generatsiyalovchi fotovoltaik yupqa pardalar olish texnologiyasining optimal rejimlarini o'rnatish hamda ularda yangi fotoelektret hodisalarini aniqlashdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

Ag, Cd, Cu va Se kirishmalar kiritilgan CdTe va Sb₂Se₃ asosidagi fotovoltaik yupqa pardalardan tashqi qutbllovchi maydonsiz fotoelektretlar olish.

CdTe:Ag,Cu,Cd va Sb₂Se₃:Se asosida olingan yupqa parda tuzilmalarda fotoelektret holatning shakllanish va yo'qolish kinetikasini tadqiq etish.

Ag bilan legirlangan CdTe polikristall yupqa pardalarda fotoelektret holatning shakllanish mexanizmlarini aniqlash maqsadida ulardagi yangi elektro-fizik va optik hodisalarini kompleks o'rganish.

Tadqiqotning obykti. Tadqiqot uchun oddiy shisha taglik sirtida termovakuimli bug'latish usuli bilan olingan CdTe:Ag, Cu,Cd va Sb₂Se₃:Se polikristall yupqa pardalar tanlandi.

Tadqiqotning predmeti CdTe:Ag,Cu,Cd va Sb₂Se₃:Se fotoelektret yupqa pardalar olishning texnologik jarayonlari hamda ulardagi elektrofizik, fotoelektrik va fotovoltaik hodisalardan iborat.

Tadqiqot usullari: qattiq jismlar fizikasi sohasida keng qo'llaniladigan vakuumli bug'latish, termik ishlov berish, rentgen nurlari difraksiyasi, zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasi va harakatchanligini o'lchash, volt-amper, lyuks-amper, lyuks-volt, spektral xarakteristikalarini tahlil qilish usullari.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quydagilardan iborat:

birinchi marta CdTe:Ag,Cu,Cd va Sb₂Se₃:Se asosidagi fotoelektret polikristall yupqa parda tuzilmalarini termik bug'latish usuli bilan olish texnologiyasi shisha taglik temperaturasi 250-350 °C, boshlang'ich materialning miqdori 40-50 mg, aralashmalar massasining nisbiy miqdori $\sim(2\div4,5)\cdot 10^{-3}$, $P\approx 10^{-1}-10^{-2}$ Pa vakuum sharoitida CdTe va Sb₂Se₃ bug'lanish temperaturasi mos holda $T_1\leq 933$ K va $T_2\leq 890$ K sharoitlardagi optimal rejimlari ishlab chiqilgan;

CdTe:Ag,Cu,Cd va Sb₂Se₃:Se polikristall yarim o'tkazgich yupqa pardalarning fotoelektret xususiyatlarini belgilovchi fizik omillar aniqlanib, bu hususiyatlarni tashqi ta'sirlar bilan boshqarish imkoniyatlari aniqlangan;

CdTe:Ag yupqa pardalarning V_{FEK} , fotoelektret holat, qarshiligi R_{yp} , termostimullashgan o'tkazuvchanliklarini temperaturaga bog'liqligi va fotoelektret holat relaksatsiya chiziqlari, shuningdek V_{AFK} va $I_{q,t}$ spektral xarakteristikalarini o'rganish yordamida fotoelektret holat va aralashmaviy fotoqo'zg'atishda

fotokuchlanish generatsiyasi uchun mas'ul bo'lgan chuqur sathlar faollashuv energiyalarining $E_1=1,04\pm 0,03$ eV, $E_2\approx 1,17$ eV va $E_3\approx 1,33\pm 0,05$ eV qiymatlari aniqlangan;

AFV xususiyatli CdTe:Ag, Cu, Cd va Sb₂Se₃:Se faollashtirilgan yupqa pardalarning aralashmaviy yutilish spektral sohasida fotoelektret kuchlanish generatsiyasi kuzatildi va bu aralashmalar sathining fotoqo'zg'alishi natijasida yuzaga kelishi bilan bog'liqligi V_{FEK} va I_{qt} spektral xarakteristikalarida tasdiqlangan;

ilk bor CdTe va Sb₂Se₃ asosiy materiallarning bug'lanish tezligi kamayishi bilan V_{FEK} va V_{AFK} bo'yicha fotosezgirlik spektrining maksimumlarini qisqa to'lqin sohasiga siljishi yupqa parda mikrostrukturasidagi o'zgarishlar bilan izohlanishi ko'rsatilgan;

CdTe:Ag, Cu, Cd va Sb₂Se₃:Se yupqa pardalarning fotoqutblanish jarayonida FEH tufayli yuzaga keladigan qoldiq fotoo'tkazuvchanlik aniqlangan.

Tadqiqotning amaliy natijalari:

CdTe:Ag, Cu, Cd va Sb₂Se₃:Se asosidagi fotoelektret polikristall yupqa parda tuzilmalarni termovakuumli purkash usuli bilan olishning texnologik rejimlari ishlab chiqilgan.

CdTe:Ag, Cu, Cd va Sb₂Se₃:Se asosidagi yupqa pardalarning fotoelektrik va fotovoltaik parametrlarini arzon va samarali fotokonvertorlar talablari darajasiga mos ravishda maqsadli o'zgartirish yo'llari aniqlangan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi zamonaviy qattiq jismlar fizikasi o'lchash va tahlil usullaridan foydalanish, olingan ilmiy natijalarning yetakchi jurnallarda chop etilgan boshqa mualliflarning ishlari bilan mos kelishi, eksperimental natijalar va nazariy ma'lumotlar o'rtasidagi muvofiqlik hamda ularning sinovdan o'tgan fizik modellar doirasida talqin qilinishi bilan ta'minlanadi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati CdTe:Ag, Cu, Cd va Sb₂Se₃:Se yupqa pardalarning tuzilishi, spektral va fotoelektrik xususiyatlari bilan ularning ishchi parametrlarining o'zaro bog'liqligi haqidagi bilimlar yarim o'tkazgich polikristall yupqa pardalarda kechadigan fizik jarayonlar haqidagi tasavvurlar kengaytirilganligi bilan shuningdek eksperimental tarzda aniqlangan «muvozanatli elektr o'tkazuvchanlikning temperatura va infraqizil nurlanish bilan so'nishi» va «ionlarning termoelektrik migratsiyasi orqali anomal fotokuchlanish xususiyatni rag'batlantirish» effektlari fotoelektrik hodisalar fizikasi haqidagi ilmiy tasavvurlar boyitilganligi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati CdTe:Ag, Cu, Cd va Sb₂Se₃:Se yupqa pardalar asosida arzon va samarali yupqa parda elementlar – foto qabul qilgichlar va foto kovertorlarni tayyorlash texnologiyalarini yaratishda qo'llanilishi mumkinligi hamda fotosezgir yupqa pardalar va shaffof kontaktlar olish uchun ishlab chiqilgan usullar optoelektron qurilmalarni, jumladan, vidikonlar, integral ko'p elementli foto qabul qilgichlar va foto kovertorlarni yaratishda foydalanish imkoniyati ko'rsatilganligi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. CdTe:Ag, Cu, Cdva Sb₂Se₃:Se asosida yupqa pardali polikristall tuzilmalarni olish texnologiyasini ishlab chiqish va fotoelektret xususiyatlarini tadqiq qilish natijalari asosida:

CdTe:Ag, Cu, Cdva Sb₂Se₃:Se polikristal yupqa pardalarda fotoelektret holatning hosil bo'lish mexanizmlarini, ulardagi yangi elektrofizik va optik hodisalarni har tomonlama o'rganish yo'li bilan olingan ilmiy natijalardan OT-F2-68 raqamli "Kristallarda kirishma-nuqson mikro va nano birikmalar shakllanishining mexanizmlari hamda ularning asosida keng funksional imkoniyatli ko'pqatlamli strukturalarni yaratish" nomli fundamental loyihani bajarishda qisman foydalanilgan (loyiha rahbari akademik S. Zaynabidinov, Bobur nomidagi Andijon davlat universiteti, 2024-yil 29-noyabrdagi 04-2671-son ma'lumotnomasi). Ushbu ilmiy natijalardan foydalanish fundamental loyihada o'rganilgan nanoo'lchamli yarim o'tkazgich materiallarning fizik parametrlariga temperatura, bosim va yorug'lik ta'sirlarini baholash bo'yicha olingan tajriba ma'lumotlarini nazariy va amaliy jihatdan tahlil qilish imkonini bergan;

CdTe:Ag, Cu, Cdva Sb₂Se₃:Se polikristall yarim o'tkazgich yupqa pardalarning fotoelektret xususiyatlarini belgilovchi fizik omillar va bu xususiyatlarni yorug'lik, elektr maydoni va temperatura kabi tashqi ta'sirlar bilan boshqarish imkoniyatlarini aniqlash natijalaridan Davlat ilmiy dasturlari doirasida 2022-2024 yillarda "Burgut" shifrlı (yopiq) amaliy loyihani bajarishda qisman foydalanilgan (O'zbekiston Respublikasi Mudofaa vazirligi Axborot-kommunikatsiya texnologiyalari va aloqa harbiy instituti, 2025-yil 9-yanvardagi 56-son ma'lumotnomasi). Bu esa uchuvchisiz uchish apparatlarida qo'llaniladigan yupqa parda tuzilmalarini tayyorlash usullarni yaratishga, shuningdek, yangi materialshunoslik va yarim o'tkazgichli tuzilmalarning optik spektroskopiyasi uchun zarur tadqiqotlarni olib borishga imkon bergan.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Dissertatsiyaning asosiy natijalari 11 ta xalqaro va respublika ilmiy-amaliy konferensiyalarida taqdim etilgan va muhokama qilingan.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi. Dissertatsiya mavzusi bo'yicha jami 16 ta ilmiy ish chop etilgan, shundan 5 tasi O'zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasi tomonidan dissertatsiyaning asosiy ilmiy natijalarini nashr etish uchun tavsiya etilgan jurnallarda e'lon qilingan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya kirish, 4 ta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro'yxatidan iborat. Dissertatsiyaning hajmi 44 ta rasm, 9 ta jadvalni o'z ichiga olgan holda 126 betni tashkil etadi.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Kirish qismida dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va ahamiyati qisqacha asoslangan, tadqiqotlarning O'zbekiston Respublikasida ilm-fan va texnologiyalar rivojlanishining ustuvor yo'nalishlari bilan bog'liqligi belgilangan. Dissertatsiya mavzusiga oid ilmiy ishlarning qisqacha sharhi va muammoning o'rganilganlik darajasi yoritilgan. Tadqiqotning maqsad va vazifalari shakllantirilgan, obykti, predmeti va usullari aniqlangan. Tadqiqotning ilmiy yangiligi bayon etilgan,

olingan natijalar ishonchliligi asoslangan, ularning nazariy va amaliy ahamiyati ochib berilgan, natijalarni joriy etish va ishni sinovdan o'tkazilganligi haqidagi ma'lumotlar keltirilgan.

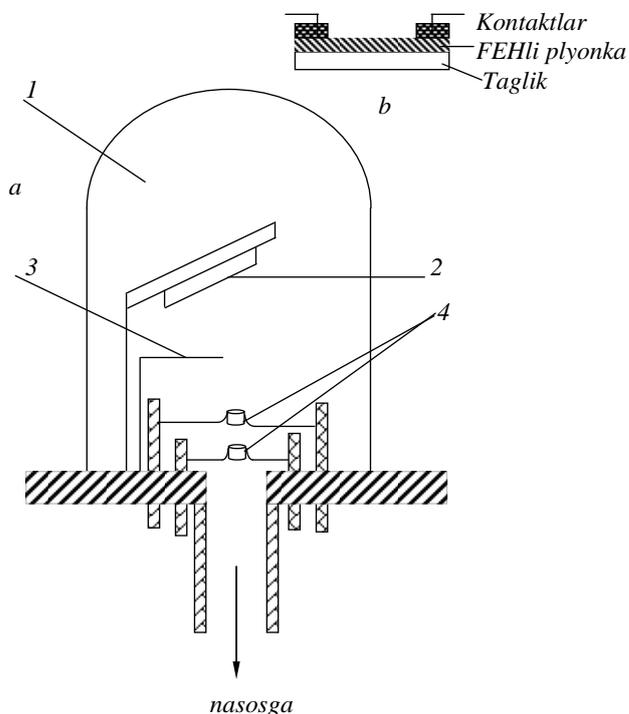
Dissertatsiyaning **“Yarim o'tkazgichlarda fotoelektret effektni o'rganishning hozirgi holati”** deb nomlangan birinchi bobida CdTe va Sb₂Se₃ asosidagi fotovoltaik yupqa pardalarni tayyorlash va o'rganish texnologiyasiga oid ishlarning qisqacha tahlili keltirildi. Ushbu materiallar asosida yaratilgan polikristall yupqa pardalarni olish texnologiyasi va ularning xususiyatlarini o'rganish bo'yicha mavjud adabiyotlar tahlil qilindi. Yupqa parda tuzilmalarning elektr o'tkazuvchanlik mexanizmlari va fotovoltaik xususiyatlarining o'ziga xos jihatlari ko'rib chiqildi. Ma'lum natijalarning tahliliga asoslanib, dissertatsiyaning maqsad va vazifalari shakllantirildi.

Dissertatsiyaning **“Tashqi qutblovchi maydonsiz fotoelektret holatdagi yupqa pardalarni olish texnologiyasi va ularni o'rganish usulini ishlab chiqish”** deb nomlangan ikkinchi bobida CdTe va Sb₂Se₃ asosidagi fotovoltaik yupqa pardala asosida tashqi qutblovchi maydonlarsiz fotoelektret olish texnologiyasi bayon etilgan. Ushbu texnologiya yupqa pardalarni Ag, Cu, Cd va Se kabi kirishmalar bilan legirlash orqali amalga oshiriladi, bu esa yarim o'tkazgichda chuqur sathlar hosil qilish uchun zaruriy shart hisoblanadi. Ag va Cu kirishmalar tanlanishining sababi, ushbu atomlarning CdTe kristallarda nisbatan past temperaturada ($t=300^{\circ}\text{C}$) diffuziyalanishidir. CdTe kristalidagi Ag va Cu atomlari uch xil zaryad holatiga ega bo'lishi mumkin: ulardan ikkitasi akseptor xususiyatiga ega bo'lib, faollashuv energiyalari $E_{A1}=E_v+0,15\text{ eV}$ va $E_{A2}=E_v+0,32\text{ eV}$, uchinchi esa sayoz sath – donor hisoblanadi. CdTe tarkibidagi ortiqcha Cd elementi ikkita chuqur donor sath, uning vakansiyasi esa ikki chuqur akseptor sathlar hosil qilishi mumkin. Sb₂Se₃ kristallaridagi Se kirishma atomlarining harakati o'rganilmagan. Biroq, ushbu ishda qo'llanilgan Se bilan legirlash usuli orqali Sb₂Se₃ qatlamda yaxshi FEH kuzatilgan, demak, bu materialdagi ortiqcha Se chuqur sath hosil qiladi. Fotoelektret yupqa pardalarni olish uchun vakuum qurilmasi ishlatilgan (**1-rasm**), uning ishchi hajmi kvartslar qopqog' bilan cheklangan, qoldiq gaz bosimi $10^{-1}-10^{-5}\text{ mm.sim.ust.}$ intervalda saqlangan. Yarim o'tkazgich va kirishmalarni bug'latish uchun tigellatish usullari ishlatiladi. Yupqa pardalarning qalinligi va legirlash darajasi taglik va bug'latgichlar o'rtasida joylashgan nikel to'siqch tomonidan nazorat qilindi. Tagliklar kalpakka o'rnatilgan pech yordamida isitiladi.

Ko'p sonli parametrlarga, masalan, materiallarning (yarim o'tkazgich va kirishma) boshlang'ich massasi, bug'lanish tezligi va vaqti, vakuum darajasi, taglik temperaturasi, bug'lanish burchagi va parda qalinligi fotoelektret pardalar tayyorlashning optimal texnologik rejimi berilgan.

Yarim o'tkazgich (CdTe yoki Sb₂Se₃) va kirishma (Ag, Cu, Cd yoki Se) materiallarning boshlang'ich massa nisbati $\sim(2\div4,5)\cdot 10^{-3}$ bo'lgan holda, termal bug'latish usuli bilan 10^{-4} mm.sim.ust. vakuumda shisha yoki kvars taglikka, 520÷570 K gacha qizdirilgan holda yotqizildi. Bunda bug'lanish burchagi 40° bo'lib, yupqa pardalar qalinligi CdTe uchun 1 mkm va Sb₂Se₃ uchun 1,5 mkmni tashkil etdi.

FEH yuzaga keluvchi AFK qatlamlarni legirlashning 3 usuli o'rganildi: a) taglikka qalinligi 1÷3 Å bo'lgan yupqa Ag yoki Cu qatlam yotqizilib, so'ngra ushbu yuzaga kondensatsiya tezligi $\vartheta=0,3$ nm/s bo'lgan CdTe AFK yupqa parda hosil qilindi. Agar ϑ kattaroq bo'lsa, CdTe namunalari faqat qo'shimcha termik ishlovdan so'ng yuqori sifatli FEH hosil qiladi. b) CdTe yoki Sb₂Se₃ qatlamlarni taglikka



1-rasm. Bug'latgich qurilmasi ishchi kamerasining ko'rinishi (a) va bir yupqa parda fotoelektret – FEH yupqa pardaning umumiy ko'rinishi (b); 1 – kalpak; 2 – taglik; 3 – ekran; 4 – bug'latgichlar.

kondensatsiya qilish jarayonida legirlash alohida tigeldan $\vartheta_{\text{bug}'}=1,3\div3\cdot 10^{-6}$ g/sm² tezlik bilan Ag, Cu, Cd yoki Se yotqizish orqali amalga oshirildi. FEH sifati yuqori bo'lgan yupqa pardalar CdTe va Sb₂Se₃ bug'lanish temperaturalarini mos ravishda $T_1\leq 933$ K va $T_2\leq 890$ K bo'lganda, kondensatsiya vaqtlari mos ravishda 100 va 60 min. davom etganda olinadi. Ag, Cu, Cd yoki Se kirishmalar yarim o'tkazgich birikmalar yotqizila boshlaganidan keyin, mos ravishda 30 va 20 minutdan kechiktirilmasligi kerak. c) Yarim o'tkazgich birikmalar (CdTe yoki Sb₂Se₃) va kirishmalar (Cd yoki Se) yuqorida ko'rsatilgan massa nisbatlarida kukun shaklida ehtiyotkorlik bilan aralastirilib, so'ngra vakuumda (10^{-4} mm.sim.ust.) taglik temperaturasi $T_{\text{tag}}=470$ K bo'lgan sharoitda bir soat davomida qizdiriladi. Hosil bo'lgan CdTe:Cu yoki Sb₂Se₃:Se aralashmalar mos ravishda 893 K va 873 K temperaturalarda qizdirilgan tagliklarga bug'latilib, bug' kondensatsiyasi orqali fotoelektret yupqa pardalar hosil qilindi (**1-2 jadvallar**).

1, a-jadval.

Fotoelektret yupqa parda	V_{AFK}, V	V_{FEK}, V	Relaksatsiya vaqti $V_{FEK}, min.$
CdTe:Ag	560	70	100
CdTe:Cd	545	65	130
CdTe:Cu	460	45	70

1, b-jadval.

Yupqa parda		t, °C								
		150°	180°	210°	230°	250°	275°	300°	325°	350°
CdTe:Ag	V_{AFK}, V	215	265	320	460	525	550	580	320	210
	V_{FEK}, V	15	28	43	52	62	69	78	36	14
CdTe:Cu	V_{AFK}, V	195	220	240	275	310	380	455	270	195
	V_{FEK}, V	10	17	22	28	35	39	45	14	8
CdTe:Cd	V_{AFK}, V	205	268	315	457	514	532	556	280	200
	V_{FEK}, V	12	17	21	31	44	51	62	21	11
CdTe	V_{AFK}, V	200	260	305	450	510	525	550	300	205

1, c-jadval.

Yupqa parda		$\vartheta, nm/s$								
		2,4	1,1	0,55	0,37	0,28	0,22	0,19	0,16	0,14
CdTe:Ag	V_{AFK}, V	205	250	290	245	380	440	510	580	580
CdTe:Cd	V_{FEK}, V	4	8	13	19	26	41	61	78	78
CdTe	V_{AFK}, V	200	235	280	340	360	425	500	550	550

2, a-jadval.

Yupqa parda		t, °C							
		150°	175°	200°	225°	250°	275°	300°	325°
Sb ₂ Se ₃ :Se	V_{AFK}, V	95	200	335	448	512	455	352	213
	V_{FEK}, V	5	12	27	41	58	43	22	8
Sb ₂ Se ₃	V_{AFK}, V	92	210	330	445	505	450	345	205

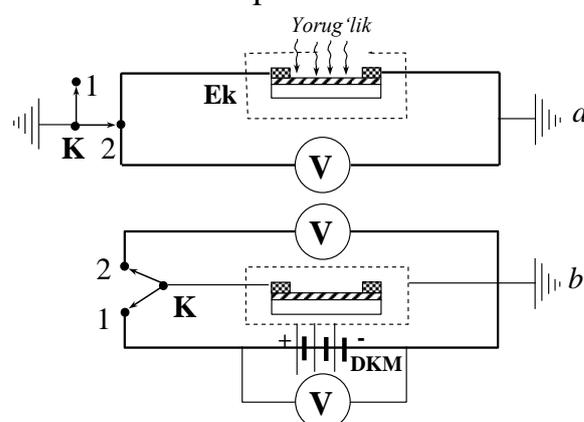
2, b-jadval.

Yupqa parda		$\vartheta, nm/s$						
		2,4	2	1,6	1,2	0,8	0,4	0,1
Sb ₂ Se ₃ :Se	V_{AFK}, V	115	202	280	348	420	515	515
	V_{FEK}, V	9	16	24	31	47	62	62
Sb ₂ Se ₃	V_{AFK}, V	111	200	278	345	415	505	505

Ko'plab namunalar ustida o'tkazilgan FEH olish tadqiqotlari uchun ikkinchi usul eng samaralidir. Ushbu usullar legirlangan kirishmalar konsentratsiyasini boshqarishga imkon beradi. Shu bilan birga, yupqa pardalar eng aniq va barqaror fotoelektret xususiyatlariga ega bo'ladi. Birinchi usul bir xil va nazoratga yaroqli namunalarni olish imkonini beradi, bu legirlovchi kirishmalar rolini aniqlash uchun zarurdir. Ikkinchi usul esa fotoelektret yupqa pardalarning ma'lum qismlarini faollashtirishga imkon beradi. Tajribalar shuni ko'rsatdiki, eng katta fotoelektret kuchlanishga ega bo'lgan yupqa pardalar taglikka qaragan quyi qatlamlarga mos legirlangan kirishmalar kiritilganda olinadi. Shu jarayonda qalinlik bo'ylab kirishma konsentratsiyasida to'liq o'zgarishlar hosil bo'ladi. Yupqa parda markaziy sohalarining kuchli legirlanishi natijasida hosil bo'ladigan anomal fotokuchlanishlar sezilarli darajada kamayadi, shuning uchun fotoelektret xususiyatlar kamayadi. Yangi tayyorlangan fovoltaik yupqa pardani legirlovchi kirishmalarning to'yingan bug'ida termik ishlov berish orqali fotoelektret hosil qilishga bo'lgan urinish muvaffaqiyatsiz bo'ldi. Fotoelektret CdTe:Ag, Cu, Cd va Sb₂Se₃:Se yupqa pardalarni tayyorlashning asosiy xususiyatlari batafsil tahlil qilindi. Xususan, FEH ning kondensatsiya tezligi va taglik temperaturasiga bog'liqligi o'rganildi.

Faollashtirilgan fovoltaik yupqa pardalarda FEH zaryadini o'lchash uchun fotoqutbsizlanish va termostimullangan qutbsizlanish toklarini kompensatsiya usuli qo'llanildi. Tashqi maydonsiz fotoelektretlar qutbsizlanishining asosiy xususiyatlari keltirilgan. V_{FEK} , V_{AFK} va qisqa tutashuv toki $I_{q.t.}$ elektr kuchaytirgichlar Y1-2, Y5-9, CK-2M va elektrostatik voltmetrlar C-50, C-90 yordamida o'lchangan (2-rasm). Sekin fotoqutblanish jarayonlarini o'rganishda sxema vaqti $\tau_{sx} = R_{sx} \cdot C_{sx}$ qiymati hisobga olingan, bu yerda R_{sx} va C_{sx} – sxemaning qarshiligi va sig'imi. Yorug'lik manbai sifatida OИ-24 tipidagi yoritgich ishlatilgan. Namuna sirtidagi yoritilish darajasi neytral yorug'lik filtrlari bilan yorug'lik oqimini susaytirish yoki yorug'lik manbai va yupqa parda orasidagi masofani o'zgartirish orqali o'lchangan. Yuqori yoritilish namuna sirtida lampa tolasini fokuslash yo'li bilan olingan. Maksimal yoritilish $3,5 \cdot 10^5$ lx gacha, minimal esa bir necha lx bo'lgan. Yupqa parda qizib ketishining oldini olish uchun termal filtr yoki distillangan suvdan foydalanilgan. Fotoelektret yupqa pardalar asosiy parametrlarining temperaturaga bog'liqligini aniqlash uchun kriostat ishlatilgan.

Dissertatsiyaning "Fovoltaik plenkalarda fotoelektret holatni yuzaga kelishi va uzoq muddatli relaksatsiyani vaqtli kinetikasini o'rganish" deb nomlangan uchinchi bobida fotosezgirlik ortish jarayonining kinetikasini o'rganish orqali qutblanish masalalari va FEH zaryadini o'lchash metodining xususiyatlari



2-rasm. Fotoelektret yupqa pardaning fotoqutblanish (a) va qorong'ulikdagi qutblanishining (b) sxematik diagrammasi. Ek – ekran, DKM – doimiy kuchlanish manbai, 1, 2 – kontaktlar, K – kalit.

ko'rib chiqildi. Faollashtirilgan yupqa pardalarda FEHning yuzaga kelish va yo'qolish mexanizmlari tashqi qutblovchi maydon ishtirokida va ishtirokisiz tahlil qilindi. CdTe:Ag, CdTe:Cu, Sb₂Se₃:Se va CdTe:Cd yupqa pardalarda fotoqutblanish va FEK relaksatsiya kinetikasi o'rganildi. Olingan strukturalarda qorong'ulikdagi elektret holat yuzaga kelishishining mexanizmi muhokama qilindi.

Tayyorlangan texnologiya asosida ishlab chiqilgan fotoelektretlar, mavjudlaridan farqli o'laroq, tashqi elektr maydonsiz ham qutblanadi. Ularning fotoqutblanishi elektrodning ochiq yoki yopiq holatida amalga oshirilishi mumkin. Birinchi holatda, fotoelektret yupqa parda elektr o'lchov asbobiga ulangan holda, yorug'lik manbai bilan $L=8 \cdot 10^4$ Vt/sm² intensivlikda bir necha minut davomida yoritiladi. Natijada, T=293 K temperaturada $V_{AFK}=500$ V hosil bo'ladi. Yoritish to'xtatilgach, yupqa parda elektrodlarini qisqa tutashtirish orqali V_{AFK} ni yo'qotish uchun bir necha sekund davomida tutashtiriladi, so'ngra yupqa parda yana o'lchov asbobiga ulanadi. O'lchov asbobi yupqa pardada FEH yuzaga kelishiga mos keluvchi qoldiq fotokuchlanish V_{FEK} ni qayd etadi. Vaqt o'tishi bilan V_{FEK} qiymati ortib boradi, masalan CdTe:Ag yupqa pardalarda $(1 \div 2) \cdot 10^2$ sekunda to'yinishga erishiladi. Dastlabki ekspozitsiyaga qarab, V_{FEK} qiymati 70–90 V gacha yetadi. Bunda V_{FEK} ishorasi doim V_{AFK} ishorasi bilan mos keladi. Agar fotoqutblanish yupqa parda kontaktlari qisqa tutashtirilgan sharoitda amalga oshirilsa, V_{FEK} ishorasi V_{AFK} ga teskari bo'ladi va V_{FEK} qiymati 50–60 V ni tashkil etadi.

Fotovoltaik yupqa pardalarning qutblanishi odatiy usulda, ya'ni tashqi qutblovchi maydon qo'yish va bir vaqtning o'zida yorug'lik ta'siri ostida amalga oshirildi. Agar $E_{tash.} \uparrow E_{AFK}$ bo'lsa, V_{AFK} va V_{FEK} qiymatlari ortadi. Tashqi maydonning qarama-qarshi qo'yilishida esa anomal kuchlanishlarning qiymatlari kamayadi. Hatto ayrim hollarda ularning ishorasida inversiya kuzatiladi. Tayyorlangan yupqa pardalardagi qorong'ulikdagi elektret kuchlanish V_{FEK} qiymatining 30–40% ini tashkil etdi va uning qutblanishi $E_{tash.}$ qutbi bilan mos keldi.

Fotoelektret kuchlanishning ortishi quyidagi munosabat bilan ifodalanadi:

$$V_{FEK}^{(1)} = V_{FEK}^{ST} (1 - \exp(-t / \tau_M)), \quad (1)$$

bu yerda $\tau_M = \epsilon \epsilon_0 / \sigma$ — Maksvell relaksatsiyasi vaqti, V_{FEK}^{ST} — fotoqutblanish chizig'ining to'yinish sohasidagi V_{FEK} qiymati, $V_{FEK}(t)$ — FEK ning oniy qiymati, (1) da namunaning t vaqtdagi fotoqutblanishini tavsiflaydi. CdTe:Ag, CdTe:Cd, CdTe:Cu va Sb₂Se₃:Se yupqa pardalarning qutblanish chiziqlari eksponensial xarakterga ega bo'lib, to'yinishga intiladi. Bunday holda, maksimal V_{FEK} qiymatlari va to'yinishga erishish vaqti turli kompozitsiyadagi yupqa pardalar uchun farq qiladi.

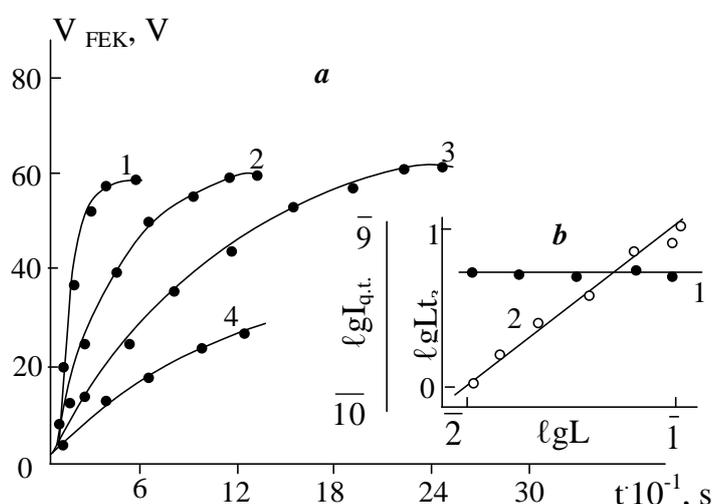
Shuni ta'kidlash kerakki, yupqa pardani yoritishda elektr o'tkazuvchanlik ham, shuningdek, namunada τ_M ham o'zgaradi. Shuning uchun FEKning relaksatsiyasi (1) ga muvofiq, lekin o'zgaruvchan τ_M qiymat bilan bo'ladi. Elektr o'tkazuvchanlik relaksatsiya vaqti $\tau_{rel.}$ bilan eksponensial ravishda o'zgarib turishini taxmin qilib, quyidagini olamiz.

$$\ln \frac{V_{FEK}^{ST}}{V_{FEK}^{ST} - V_{FEK}} = t \cdot \frac{1}{\tau_M} = t \cdot \frac{\sigma}{\varepsilon \varepsilon_0} \left(1 - \frac{\sigma^{ST} - \sigma}{\sigma^{ST}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{rel}}} \right). \quad (2)$$

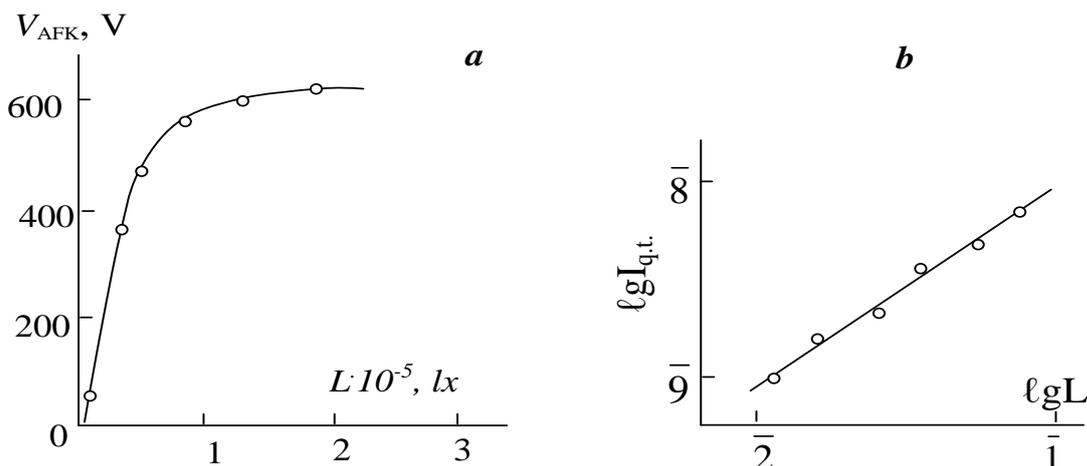
3-rasmdan ko‘rinib turibdiki, $Sb_2Se_3:Se$ (shuningdek, $CdTe:Ag,Cd,Cu$) yupqa pardalarning barcha fotoqutblanish chiziqlari tabiiy relaksatsiyalanib, (1) formulaga muvofiq to‘yinish sohasi mavjud. To‘yinish sohasidagi fotoelektret kuchlanishning qiymati statsionar fotoelektret kuchlanishga teng V_{FEK}^{ST} . Fotoqutblanish chizig‘idan kelib chiqadiki, yorug‘lik intensivligining turli qiymatlarida fotoelektret kuchlanishning statsionar qiymati turli xil qutblanish vaqtlari uchun o‘rnatiladi. Bundan tashqari, yorug‘lik kamayishi bilan fotoqutblanish vaqti ortadi, ya‘ni fotoelektret yupqa pardaning $V_{FEK}(t)$ qutblanish chiziqlari tashqi maydonga ega an‘anaviy fotoelektretlarning o‘xshash chiziqlari bilan sifat jihatidan bir xil. Yupqa pardalarning fotoqutblanish chiziqlari (2) dan kelib chiqadigan eksponensial bog‘liqlikdan biroz og‘ishini ko‘rsatadi.

Fotoelektret zaryadi hosil bo‘lishining muhim shartlaridan biri o‘zaro o‘rinlashtirish qonunining bajarilishidir. Bu qonun shuni bildiradiki, ma‘lum bir vaqt momentida fotoelektretning zaryad qiymati yorug‘lik intensivligi L va qutblanish vaqti t ga alohida-alohida emas, balki ularning ko‘paytmasi orqali aniqlanadi: $Z=L \cdot t$, ya‘ni ekspozitsiya orqali. Bu qonunning bajarilishi izopaak fotoqutblanish yordamida tekshiriladi. Izopaak — bu fotoelektret zaryadi doimiy bo‘lganda ekspozitsiya Z va yorug‘lik intensivligi L yoki ekspozitsiya vaqti t o‘rtasidagi bog‘lanishni ifodalovchi chiziqdir. Agar namunada lyuks-amper xarakteristika (LAX) chiziqli bo‘lsa, izopaaka gorizontaal chiziq shaklida ifodalanadi (3, b-rasm).

Shuni ta‘kidlash joizki, barcha o‘rganilgan yupqa pardalarda lyuks-volt xarakteristika $V_{AFK}(L)$ va lyuks-amper xarakteristika $I_{q.t.}(L)$ yorug‘lik intensivligi $L < 5 \cdot 10^4$ lx bo‘lgan sohada chiziqli ko‘rinishga ega. Biroq, yorug‘lik intensivligi $L = 5 \cdot 10^4 \div 3 \cdot 10^5$ lx oralig‘ida V_{AFK} va V_{FEK} deyarli to‘yinishga yetadi (4-rasm).



3-rasm. Intensivlikning $L=1-8 \cdot 10^{-2}$, $2-4 \cdot 10^{-2}$, $3-2 \cdot 10^{-2}$, $4-4 \cdot 10^{-2}$, $2-1.1 \cdot 10^{-2}$ Vt/sm^2 qiymatlarida, $T=293$ K temperaturada $Sb_2Se_3:Se$ fotoelektret yupqa pardaning fotoqutblanish grafigi (a), qutblanish izopaak grafigi (b, 1) va LAX (b, 2) va intensivligi.

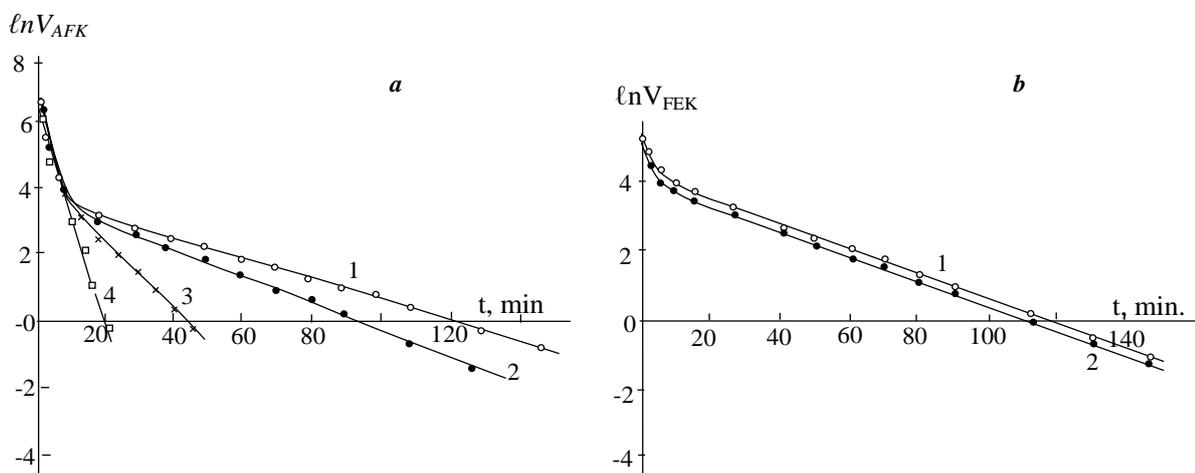


4-rasm. Tipik lyuks-volt (a) va lyuks-amper (b) xarakteristikalar: qisqa tutashuv toki $I_{q.t.}$ ning yorug‘lik intensivligi L ga bog‘liqligi — CdTe:Ag fotovoltaik yupqa parda.

Relaksatsiya chiziqlari ham eksponensial bog‘liqlik bilan tavsiflanadi

$$V_{FEK}^{(1)} = V_{FEK}^{ST} \exp\left\{-\frac{t}{\tau^*}\right\}, \quad (3)$$

bu yerda τ^* — chuqur kirishma sathlarda asosiy bo‘lmagan zaryad tashuvchilar uchun xarakterli yashash vaqti bo‘lib, uning qiymati chiziqlarning turli qatlamlar uchun turlicha bo‘ladi (**5-rasm**). Uzoq vaqtli relaksatsiya davrida $\tau^* = 1,2 \div 2,4 \cdot 10^3$ s ga teng bo‘ladi. Relaksatsiya chizig‘ining boshlang‘ich qismi $V_{FEK}(\tau = \tau^*)$ ning nisbatan tez pasayishini ko‘rsatadi va bu, ehtimol, Maksvell relaksatsiya vaqti



5-rasm. AFK yupqa pardalar uchun CdTe:Ag (1, 2, 3), CdTe (4) (a) va bir vaqtning o‘zida olingan ikkita CdTe:Ag yupqa pardalar uchun V_{FEK} qutbsizlanish chiziqlari uchun V_{AFK} relaksatsiya chiziqlari (b). $T=293$ K.

bilan bog‘liq. Shu bilan birga, bu yupqa pardada chuqur bo‘lmagan sathlar mavjudligini ko‘rsatishi mumkin. Ikkinchi qism esa fotokuchlanishning uzoq vaqtli relaksatsiyasi ($\tau = \tau^*$) bilan bog‘liq bo‘lib, bu yupqa pardadagi chuqur sathlarda zaryad tashuvchilarni tutilishi bilan bog‘liq.

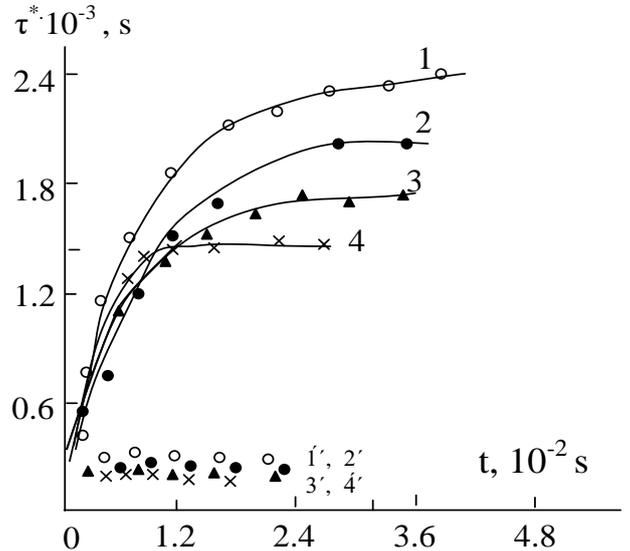
6-rasmda CdTe:Cd, CdTe:Ag va $Sb_2Se_3:Se$ yupqa pardalarning xona temperaturasida $L = 8 \cdot 10^{-2}$ Vt/sm² yorug‘lik intensivligi bilan qo‘zg‘atish vaqtida

$\tau_{\text{bosh.}}$ va τ^* ning fotoqutblanish vaqtiga bog'liqligi ko'rsatilgan, ular uchun τ^* mos ravishda 40-45, 30-35 va 20-25 minut qiymatlarga yetdi, $\tau_{\text{bosh.}}$ dastlab bir necha daqiqa edi. E'tiborli jihati, temperaturaning pasayishi bilan τ^* ning qiymati keskin oshdi va soatlarda o'lchandi va $\tau_{\text{bosh.}}$ qiymati temperaturaga kamroq bog'liq edi. τ^* ning eksperimental qiymati quyidagi ifodadan foydalanishga imkon beradi

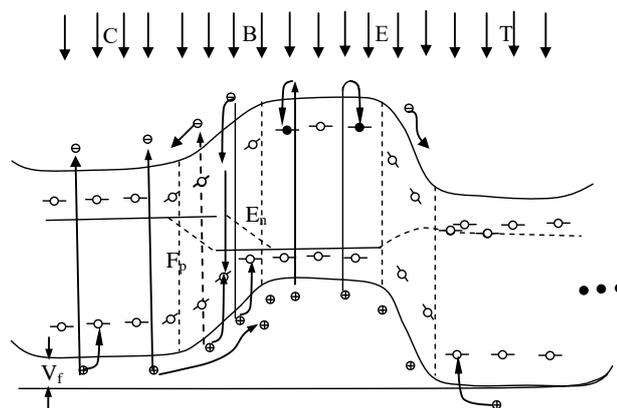
$$\tau^* = \frac{N_A}{N_v} \exp \frac{\varepsilon_A - \varepsilon_v}{kT} \cdot \tau' \quad (4)$$

O'rganilayotgan yupqa pardada FEH uchun mas'ul bo'lgan chuqur sathlarning faollashuv energiyasi aniqlandi. 5, b-rasmdagi $V_{\text{FEK}}(t)$ bog'liqlikning ikkinchi chiziqli kesimidan $\tau^*=35$ minutni topamiz. Agar FEK relaksatsiya chizig'ining ushbu asosiy bo'limi $N_A=5 \cdot 10^{17} \text{ sm}^{-3}$ va $\tau'=10^{-7}$ s konsentratsiyali chuqur kirishma sathida teshiklarni tutish bilan bog'liq deb hisoblasak, u holda uning chuqurligi $E_{12}=E_1+0,33$ eV qiymatni olamiz, bu CdTe kristallaridagi Ag sathning ma'lum qiymatiga mos keladi.

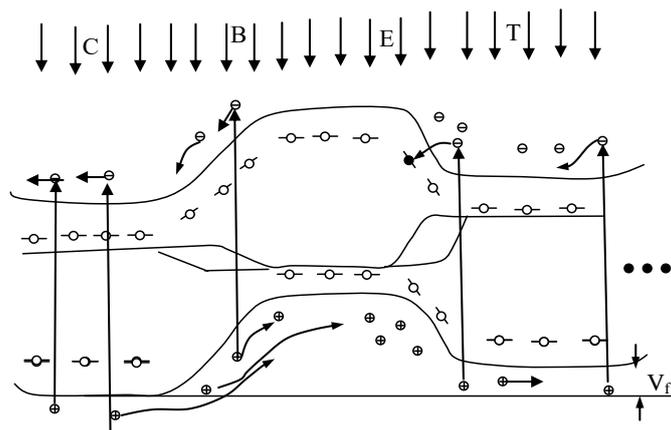
Eksperimental ravishda kuzatilgan foto va qorong'ulikdagi qutbsizlanish xususiyatlari hamda FEH va QEH ning uzoq vaqtli relaksatsiyasi, shuningdek, legirlangan yupqa pardalardagi FEH yuzaga kelish mexanizmi asosan yarim o'tkazgichlardagi FEH nazariyasi bilan, fotovoltaik yupqa pardaning mikropotensial to'siqlardan iborat davriy tuzilma sifatida model yordamida tavsiflanadi (7a, 7b, 7c-rasmlar).



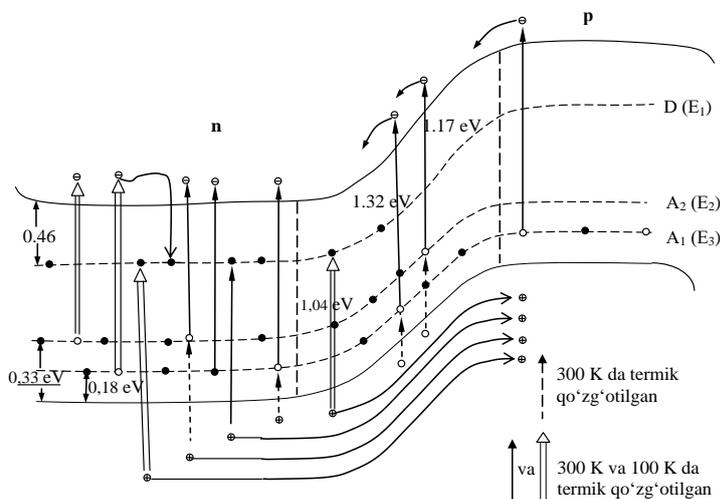
6-rasm. $\tau_{\text{bosh.}}$ va τ^* ning fotoqutblanish vaqti davomida o'zgarishi: CdTe: Cd (1, 1'), CdTe:Ag (2, 2'), Sb_2Se_3 :Se (3, 3') CdTe:Cu (4, 4').



7a-rasm. Elektrolari uzilgan holatda bo'lgan assimetrik potensial to'siqlari bo'lgan AFV yupqa pardalarning fotoqutblanish modeli.



7b-rasm. Assimetrik potentsial to‘siqlari bo‘lgan AFV yupqa pardalarning fotoqutblanish modeli, elektrodleri ulangan holatda.

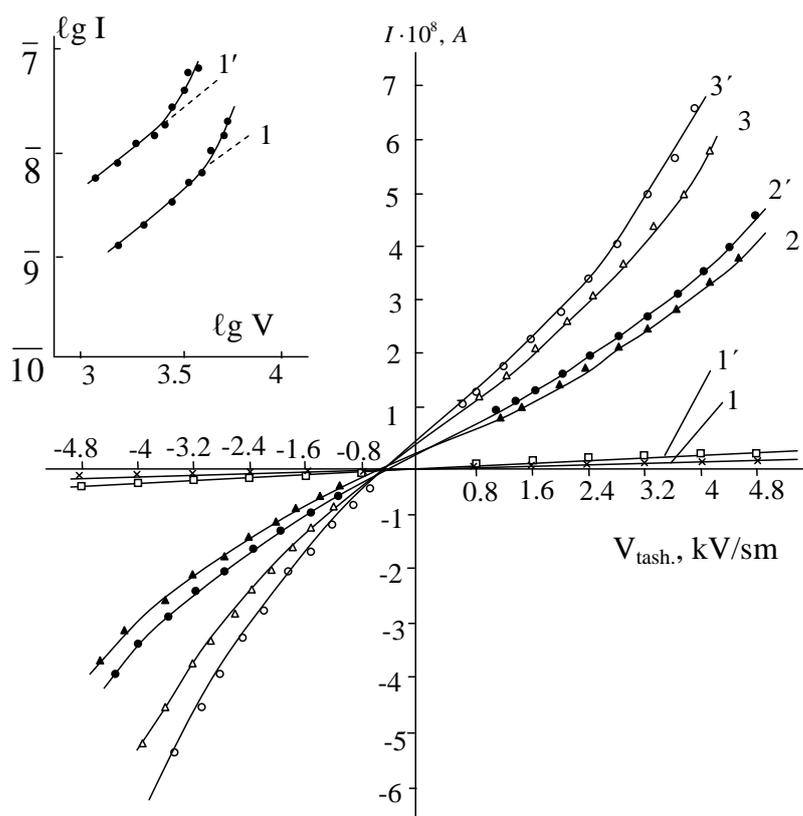


7c-rasm. AFV yupqa pardalarda AFV generatsiyasiga olib keluvchi chuqur kirishma markazlar ishtirokidagi yorug‘lik kvantlarini yutish jarayonlarining sxemasi.

3-bob natijalari asosida quyidagicha xulosa qilinadi: fotoelektret yupqa pardalarning FEH yoki QEH qutblanish va relaksatsiya mexanizmida asosiy rol ni hajmiy zaryad sohalaridagi (HZS) chuqur sath markazlarida tutilib qolgan nomuvozanatli zaryad tashuvchilar o‘ynaydi.

Dissertatsiyaning **“Faollashgan AFK plenkalarning elektro-fizik va optik xususiyatlari”** deb nomlangan to‘rtinchi bobida anomal fotokuchlanish hosil qiluvchi fotoelektret yupqa pardalarning elektrofizik, termik va optik tadqiqot natijalari keltirildi. CdTe:Ag namunalarning qorong‘ulikdagi volt-ampere xarakteristikalari (VAX) tashqi elektr maydon kuchlanganligi $3,5 \cdot 10^3$ V/sm gacha chiziqli bo‘lgan. Eksperimentlar shuni ko‘rsatdiki, faollashtirilgan yupqa pardalar VAX yoritilgan holda 10^5 lx va AFV maydon yo‘nalishi bo‘yicha tashqi elektr maydon kuchlanganligi $E_{tash.} = 1,4 \cdot 10^3$ V/sm dan boshlab supchiziqli xarakterga ega bo‘ladi. Teskari yo‘nalishda esa bu holat $E_{tash.} = 10^3$ V/sm da kuzatiladi (**8-rasm**).

Shunday qilib, yorug'lik ta'sirida yupqa pardalar VAXning natijaviy elektr maydon qutbiga nisbatan simmetriyasi buziladi. Shu kabi hodisalar CdTe asosidagi



8-rasm. CdTe (1, 2, 3) va CdTe:Ag (1', 2', 3') yupqa pardalarning qorong'ulikda (1, 1') va yorug'likda (2, 3; 2', 3') volt-amper xarakteristikalari. Bunda yorug'lik intensivligi $L=10^5$ lx (2, 2') va $L=2 \cdot 10^5$ lx (3, 3'). Kirishma grafigida qorong'ulikdagi VAX logarifmik o'lchovlarda keltirilgan.

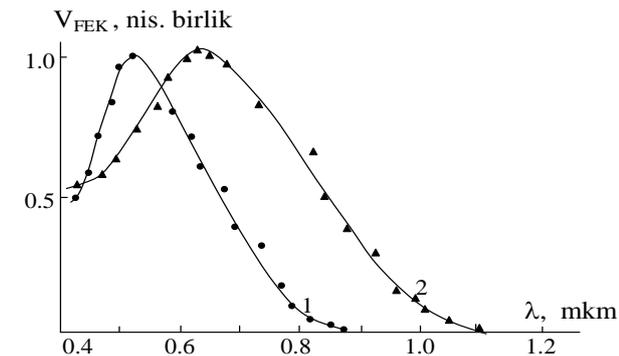
AFV yupqa pardalarda ham kuzatiladi. Bu assimetrik potensial to'siqlarga ega bo'lgan sohalarda sodir bo'ladigan fotoelektrik jarayonlarning ekvivalent emasligi bilan bog'liq.

Kontaktlar ulangan sharoitda fotoqutblangan CdTe:Ag yupqa pardalarda qo'shimcha fotoko'tkazuvchanlik kuzatiladi. Bu holat assimetrik sohalardagi kirishma markazlarda tutilgan fozaryad tashuvchilarning qayta taqsimlanish jarayonlari bilan bog'liq. Quyidagi jadvalda $T=293$ K temperaturada volt-amper xarakteristikalarda aniqlangan yupqa parda parametrlarining qiymatlari keltirilgan.

3-jadval.

Yupqa parda	$R_{qor.}, \text{Om}$	$R_{yor.}, \text{Om. } I=0.08$ Vt/sm^2	V_{AFK}, V	V_{FEK}, V
CdTe	$10^{11} \div 10^{12}$	10^{10}	500	-
CdTe:Ag	$10^{12} \div 10^{13}$	$10^9 \div 10^{10}$	600	100
CdTe:Cd	10^{13}	$5 \cdot 10^{10}$	500	80
CdTe:Cu	$10^{11} \div 10^{12}$	10^{10}	400	50
Sb_2Se_3	$10^{11} \div 10^{12}$	$10^{11} \div 10^{12}$	450	-
$Sb_2Se_3:Se$	$10^{11} \div 10^{12}$	10^{10}	450	60

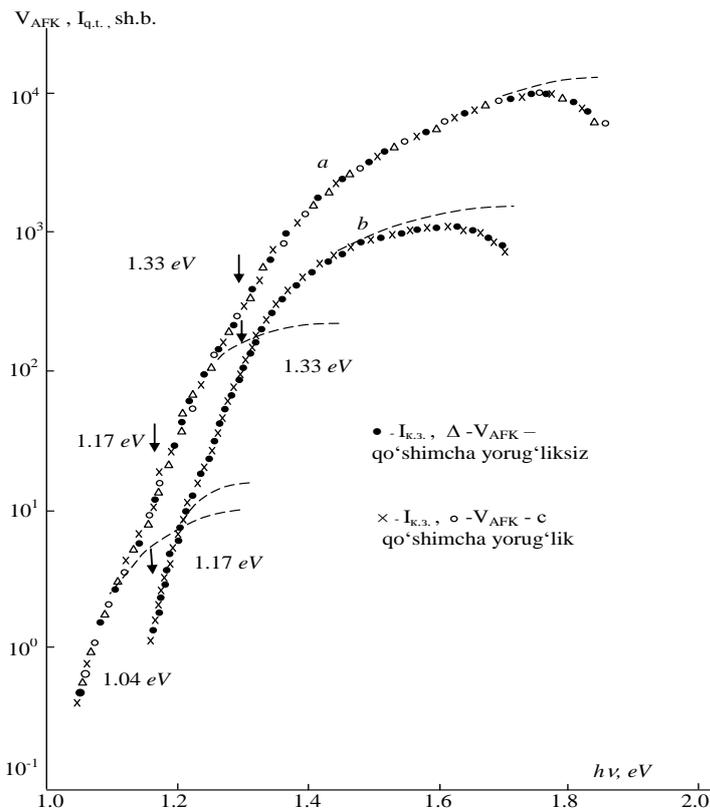
Tadqiqot natijalariga ko'ra, R_{pl} va V_{FEK} hamda FEHning termostimulyatsiya toki yordamida CdTe:Ag AFK yupqa pardada FEH uchun mas'ul bo'lgan kirishma markazlarning effektiv faollashuv energiyalari ($0,18 \pm 0,05$ eV va $0,32 \pm 0,05$ eV) va ularning konsentratsiyalari aniqlangan. Shuningdek, V_{AFK} , V_{FEK} va qisqa tutashuv toki $I_{q.t.}$ ning xususiy va kirishma sohalarda yutilish spektral bog'liqliklari o'rganilgan (9-rasm).



9-rasm. CdTe:Ag (1) va Sb₂Se₃:Se (2) fotoelektret yupqa pardalarning V_{FEK} va $I_{q.t.}$ spektrlari.

Tadqiqotlar shuni ko'rsatdiki, CdTe:Ag yupqa pardalar uchun V_{FEK} va V_{AFK} , shuningdek, CdTe yupqa pardalar uchun V_{FEK} spektral fotosezgirlik maksimumining xususiy yutilish sohada joylashuvi old tomondan qo'zg'atish sharoitida kondensatsiya tezligi kamayishi bilan 760 nm dan 460 nm gacha, ya'ni qisqa to'lqinlar tomon siljiydi. Bu hodisa effektiv assimetrik potensial to'siqlarning yupqa parda yuzasiga yaqinlashuvi bilan bog'liq. Shunga o'xshash hodisalar Sb₂Se₃:Se yupqa pardalarda ham kuzatilgan.

Turli kondensatsiya tezliklarida olingan V_{AFK} va $I_{q.t.}$ spektrlarini o'rganish shuni ko'rsatdiki, yupqa parda spektrlaridagi V_{AFK} va $I_{q.t.}$ ishorasining inversiyasi



10-rasm. CdTe:Ag AFV yupqa pardalar uchun V_{FEK} va $I_{q.t.}$ spektrlari (yotqizish tezligi 0,3 nm/s (a) va 0,55 nm/s (b)) old tomondan yoritish sharoitida. T=300 K. Punktir chiziqlar — Lukovskiy modeli asosidagi nazariy chiziqlar.

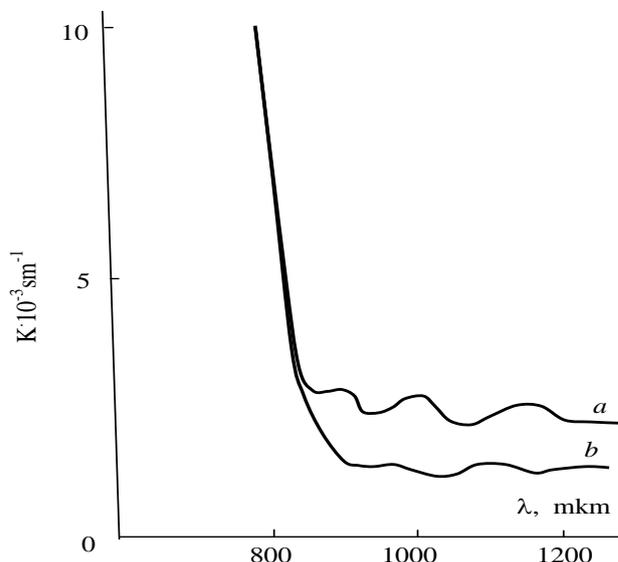
yupqa pardalar olish tezligiga hamda fotoqo'zg'olish usuliga (old tomondan yoki orqa tomondan) bog'liq. Bu hodisa, tushayotgan nurlanish to'liq uzunligiga bog'liq holda qarama-qarshi qutbdagi anomal fotokuchlanishni generatsiyalovchi turli chuqurlikda joylashgan assimetrik mikropotensial to'siqlar shakllanishi bilan izohlanadi.

Uzun to'liqinli chetki fotosezgirlik V_{AFK} ni o'rganish natijasida birinchi marta kirishmaviy yutilish sohasida AFK generatsiyasi aniqlangan (**10-rasm**).

Lukovskiy formulasi asosida hisoblangan chuqur sathlar uchun nazariy chiziqlar yordamida FEH va kirishma V_{FEK} va V_{AFK} hosil bo'lishiga javob beradigan chuqur sathlar faollashuv energiyasining qiymatlari aniqlangan:

$E_1=1,04\pm 0,05\text{eV}$, $E_2=1,17\pm 0,05\text{ eV}$ va $E_3=1,33\pm 0,05\text{ eV}$. E_2 va E_3 sathlar, shuningdek, V_{FEK} ning temperaturaga bog'liq o'zgarishlari, FEH TST, R_{pl} va τ^* ni kuzatish, Ag

yoki Ag ni o'z ichiga olgan kompleks bilan bog'liq, E_1 esa ortiqcha Cd anglatadi. CdTe:Ag va CdTe yupqa pardalarning yutilish koeffitsienti spektrlarini taqqoslash (**11-rasm**) legirlangan AFV yupqa pardalarda chuqur kirishma markazlar mavjudligini tasdiqladi.



11-rasm. CdTe:Ag (a) va CdTe (b) AFV yupqa pardalarning yutilish spektrlari (T=293 K).

X U L O S A

CdTe:Ag, Cu, Cd va Sb₂Se₃:Se yupqa pardali polikristal tuzilmalar olish texnologiyasini ishlab chiqish va ularda yangi fotoelektret xodisalarini tadqiq qilish natijalari asosida quyidagi **asosiy xulosalarga** kelish mumkin:

1. CdTe va Sb₂Se₃ning AFV yupqa pardalar asosida tashqi qutbllovchi maydonsiz fotoelektretlar boshqariladigan konsentratsiyali Ag, Cu yoki ortiqcha Cd aralashmalarini CdTe ga va ortiqcha Se aralashmasini Sb₂Se₃ ga bug'latib o'tqazish vaqtida kiritilganda shakllanishi ko'rsatilgan. Barqaror xarakteristikali yupqa pardalar uchun asosiy material massasi 40-50 mg, aralashma nisbiy massasi $2\div 4,5 \cdot 10^{-3}$, CdTe qatlamning o'sish tezligi 0,15 nm/s va Sb₂Se₃ uchun esa 0,4 nm/s, ishchi vakuum $\sim 10^{-4}$ mm.sim.ust. va taglik temperaturasi 523÷573 K optimal qiymatlar aniqlandi.

2. CdTe:Ag, Cu, Cd va Sb₂Se₃:Se fotoelektret yupqa pardalarning fotoqutblanish kinetikasi to'yinishga chiqib boruvchi eksponensial xarakterga egaligi o'rnatildi: izopaaka qonuni ($L \cdot t = const$) bajariladi; 293 K temperaturada maksimal fotoelektret kuchlanish $V_{FEK} = 100$ V gacha yetadi, uning ishorasi elektrodlar ochiq holatida fotoqutblanishda AFK ishorasiga mos keladi, qisqa tutashuvda esa qarama-qarshi bo'ladi, qaysiki mikro potentsial to'siqlar sohalaridagi foto zaryad tashuvchilarining taqsimlanish xarakteri bilan bog'liq.

3. Aniqlanishicha, legirlangan AFV CdTe va Sb₂Se₃ yupqa pardalarda FEH ning yuzaga kelishi fotozaryad tashuvchilarning kristall donlar orasidagi asimmetrik ichki maydonlarda ajralishi va chuqur sathlarda fazoviy notekis lokallashuvi tufayli sodir bo'ladi. Ushbu yupqa pardalarda tashqi elektr maydon ta'sirida kuzatilgan qorong'ulikdagi elektret holat muvozonatli zaryad tashuvchilar in'ektsiyasi va chuqur sathga lokallashuvi sababli mikro potentsial to'siqlar balandligining asimmetrik pasayishi natijasida hosil bo'ladi.

4. Anomal fotoelektret kuchlanishning relaksatsiya $V_{FEK}(t)$ chiziqlari xarakterli τ_{bosh} vaqtli nisbatan tez va uzoq τ^* vaqtli sekin so'nadigan ikki oraliqdan iboratligi, bunda τ_{bosh} . Maksvell relaksatsiya vaqti va sayoz kirishma sathlarning ta'siriga, τ^* esa mikro potentsial to'siqlar sohasidagi chuqur sathlardan zaryad tashuvchilarning sekin termo generatsiyasiga bog'liqligi o'rnatildi. Turli qatlamlar uchun T=293 K da τ^* ning qiymatlari $\sim 10^3$ s ga, τ_{bosh} uchun esa $\sim 10^2$ s ga yetadi. τ_{bosh} va τ^* qiymatlar yordamida kirishma markazlarning faollashuv energiyasi topildi.

5. CdTe:Ag, Cu, Cd va Sb₂Se₃ yupqa pardalarning qorong'ulikdagi VAXlari tashqi kuchlanishning (0-5·10³) V qiymatlar oralig'ida chiziqli bog'lanishga egaligi va qoldiq fotoo'tkazuvchanlik kuzatilishi aniqlandi. Yorug'lik ta'siridagi VAX koordinatalar boshiga nisbatan asimmetrik va nochiqli xarakterga ega bo'ladi, bu esa V_{AFK} generatsiyasi va mikropotentsial to'siqlar modulyatsiyasi bilan tushuntiriladi.

6. CdTe:Ag fotoelektret yupqa pardalarning V_{AFK} va $I_{q.t.}$ spektrlarida kuzatiladigan ishora almashinuvi ularning kondensatsiyalanish tezligiga va fotoqo'zg'alish usuliga (qatlam sirtining old va orqa tomonidan) hamda yupqa

parda sirtidan turli masofalardagi asimmetrik mikropotensial to'rsiqlarning xarakteriga bog'liq bo'lishi bilan izohlanadi.

7. CdTe:Ag yupqa pardalarning kondensatsiya tezligi 0,5 dan 0,15 nm/s gacha kamaytirilganda V_{FEK} spektrining maksimumi old tomondan fotoqo'zg'alishda 780 dan 500 nm gacha qisqa to'lqinlar tomon siljishi ko'rsatilgan, bu kristal donlar o'chamining o'zgarishi bilan tushuntiriladi.

8. V_{FEK} , R_{yp} , τ^* va TST FEH larning temperaturaviy bog'lanishidan foydalanib chuqur sathlar energiyasining effektiv qiymatlari $E_2=0,17\pm0,05$ eV (1,33 eV) va $E_3=0,33\pm0,05$ eV (1,17 eV) aniqlandi, qaysiki V_{AFK} va $I_{q.t.}$ lar spektral bog'lanishlarning uzun to'lqin sohasini tadqiqot natijalari bilan tasdiqlanadi hamda $E_1=1,04\pm0,03$ eV energiyali o'shimcha kirishma sath aniqlandi. E_2 va E_3 sathlar Ag bilan, E_1 esa ortiqcha Cd bilan bog'liq. Ular CdTe:Ag yupqa pardalarda FEH va aralashmaviy AFK hosil bo'lishi uchun javobgardir.

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

ФЕРГАНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

НУРМАТОВ ОЗОДБЕК РАВШАНБОЙ УГЛИ

**НОВЫЕ ФОТОЭЛЕКТРЕТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ТОНКИХ
ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНКАХ $CdTe:Ag$, Cu , Cdu $Sb_2Se_3:Se$**

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

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

Фергана-2025

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за номером B2024.4.PhD/FM1200.

Диссертация выполнена в Ферганском Политехническом институте.

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

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

Официальные оппоненты: **Муссаева Малика Анваровна**
доктор физико-математических наук
Абдукадыров Абдувахит Гапирович
кандидат физико-математических наук, доцент

Ведущая организация: **Наманганский строительно-инженерный институт**

Защита диссертации состоится «__»_____2025 года в ____ часов на заседании Научного совета PhD.03/27.02.2020.ФМ.106.01 при Ферганском политехническом институте (Адрес: 150107, г. Фергана, ул. Ферганская, дом 86. Тел: (+998 73) 241-12-06, факс (+998 73) 241-12-06, e-mail: uzferfizika@mail.ru, малый зал заседания).

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

Автореферат диссертации разослан «__»_____2025 года.
(реестр протокола рассылки №_____ от «__»_____2025 г.)

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

Б.Ж. Ахмадалиев
Ученый секретарь Научного совета по присуждению ученой степени доктора философии, PhD ф.-м.н., доцент

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

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии)

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мире одним из перспективных направлений в области микроэлектроники и фотоэнергетики является получение новых материалов с бинарными полупроводниковыми соединениями II-VI, принципиально отличающимися новыми физическими свойствами. Так, в широкозонных полупроводниках *CdS*, *CdSe*, *CdTe* наблюдается фотоэлектрический эффект-образование фотоэлектрического состояния, обусловленного фотогенерацией свободных носителей заряда, неоднородно локализуемых под влиянием внешнего электрического поля на глубоких уровнях примесей и сохраняющегося достаточно длительное время. Большой интерес представляют разработка и изучение полупроводниковых пленочных структур, в которых фотоэлектрическое состояние наблюдается без внешнего поляризующего поля.

В мировых научных центрах в настоящее время большое значение придается исследованиям электрофизических, фотоэлектрических и оптических свойств тонкопленочных структур халькогенидов кадмия и разработке на их основе фоторезисторов, фотопереключателей и различных датчиков, работающих в полевых условиях. Из широкого класса известных фотовольтаических пленок наиболее перспективными считаются полупроводниковые структуры, полученные из *CdTe* и *Sb₂Se₃* по стабильности характеристик, эффективности взаимодействия с падающим излучением. Вопросы технологии получения фотоэлектрических без внешнего поляризующего поля на основе фотовольтаических пленок с высокими значениями параметров фотоэлектрического состояния и возможности целенаправленного управления его внешними воздействиями недостаточно изучены. Практически не рассмотрены особенности легирования тонких пленок и механизмы формирования аномально большого фотоэлектрического напряжения. В связи с этим, исследование фотоэлектрического состояния без внешнего поляризующего поля в полупроводниковых пленках *CdTe:Ag*, *Cu*, *Cd* и *Sb₂Se₃:Se* с аномальным фотовольтаическим эффектом и разработка технологии их получения относятся к актуальным задачам физики конденсированного состояния.

В нашей республике реализуются комплексные мероприятия, направленные на изучение электрофизических свойств полупроводниковых материалов, включая создание перспективных способов получения электроэнергии из солнечной энергии в полупроводниках без промежуточных стадий и достигаются определенные результаты. В стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы поставлены конкретные задачи по «... бесперебойное обеспечение экономики электроэнергией, активное внедрение технологий «Зелёной экономики» во все сферы жизни, увеличение энергоэффективности...»¹. В реализации этих задач важна разработка новых методов совершенствования существующих

¹ [Yangi O'zbekistonni rivojlantirish strategiyasi \(2022–2026\)](#)

традиционных источников энергии, создание дешевых, высоконадежных, экологически чистых и безопасных альтернатив.

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

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

Степень изученности проблемы. Во многих зарубежных научных центрах детально исследованы механизмы переноса тока, фотопроводимость, оптические спектры пленочных структур на основе CdS, CdSe, CdTe и фотовольтаические свойства косонапыленных пленок CdTe, которые нашли практические применения в оптоэлектронике. К числу таких научных центров можно отнести МГУ им. Ломоносова (Россия)¹, Институт Физики полупроводников НАН Украины², Мексиканский университет Гуадалахары³, Делавэрский университет США, National Institute for Materials Science (Japan), Физический институт им. Лебедева и Физико-технический институт им. Иоффе РАН, Вильнюсский университет им. В. Капсукаса и другие. Показано, что поликристаллические пленочные элементы из халькогенидов кадмия отличаются высокой фоточувствительностью, обусловленной наличием специфических объемных локальных центров с глубокими уровнями и особыми электронными свойствами зернограничной поверхности, существенно зависящими от технологии их изготовления.

Разработкой технологии получения фотовольтаических пленок и исследованием их фундаментальных физических свойств интенсивно работали известные ученые Узбекистана. В результате оригинальных работ

¹Саиджонов Б.М. Направленный синтез и оптические свойства коллоидных двумерных наноструктур CdSe_{1-x}S_x/CdS(ZnS) – перспективных люминофоров белого света // Диссертация на соискание ученой степени кандидата химических наук. МГУ-2021. -150 с.

²Кунец В.П., Кулиш Н.Р., Лисица М.П., Брыска В.П. Модель фотоотжига собственных дефектов гексагональных квантовых точек CdS_xSe_{1-x} // Физика и техника полупроводников-Санкт - Петербург. 2004. -№(38) 4. - С. 465- 468.

³Rivera L.P., García E., Cardona D., Pérez-Centeno A., Camps E., Santana-Aranda M.A., Gómez-Rosas G., de Moure-Flores F., Chávez-Chávez A. and Quiñones-Galván J.G.. CdTe:Sn thin films deposited by the simultaneous laser ablation of CdTe and Sn targets // Mater. Res. Express 7 (2020).

Э.А. Адировича и его учеников, как Т. Мирзамахмудов, Ю.М. Юабов, и ферганских физиков Э.И. Билялова, А.Я. Афuzова, Н.Х. Юлдашева, а также С.З. Шамирзаева, К.М. Доцанова разработаны технологии тонких пленок на основе халькогенидных полупроводников и теоретически описаны особенности аномальных фотовольтаических и фотоэлектретных эффектов в них. В экспериментальных работах М.С. Саидова, Ш.А. Мирсагатова, Т.М. Разикова, М.А. Каримова, Ж. Эргашева и С.М. Отажонова исследованы фотоэлектрические свойства и механизмы токопрохождения в тонкопленочных структурах халькогенидов кадмия.

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

Целью исследования является установление оптимальных режимов технологии получения и определение новых фотоэлектретных явлений в тонких фотовольтаических пленках $CdTe:Ag$, Cu , Cd и $Sb_2Se_3:Se$, генерирующих большие фотоэлектретные напряжения с долговременной релаксацией.

Задачи исследования:

Получение фотоэлектретов без внешнего поляризующего поля на основе фотовольтаических пленок $CdTe$ и Sb_2Se_3 с примесями Ag , Cd , Cu , и Se ;

Исследование кинетику образования и разрушения ФЭС в пленочных структурах, полученных из $CdTe:Ag$, Cu , Cd и $Sb_2Se_3:Se$.

Определение механизмов формирования фотоэлектретного состояния в поликристаллических пленках $CdTe$, легированных Ag , путем комплексного изучения новых электрофизических и оптических явлений в них.

Объектом исследования выбраны поликристаллические пленки $CdTe:Ag$, Cu , Cd и $Sb_2Se_3:Se$, полученные на поверхности штатного стекла методом термовакуумного испарения.

Предметом исследования являются технологические процессы получения фотоэлектретных пленок $CdTe:Ag$, Cu , Cd и $Sb_2Se_3:Se$, а также электрофизические, фотоэлектрические и фотовольтаические явления в них.

Методы исследований: вакуумное испарение, термическая обработка, дифракция рентгеновского излучения, холловское измерение концентрации и подвижности носителей заряда, методы анализа вольт-амперных, люкс-амперных, люкс-вольтовых, спектральных характеристик, широко применяемых области физики твердого тела.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

Впервые разработаны оптимальные режимы технологии получения фотоэлектретных поликристаллических тонкопленочных структур на основе

CdTe:Ag, Cu, Cd и $Sb_2Se_3:Se$ методом термического испарения. Оптимальные параметры включают температуру подложки 250–350°C, начальное количество материала 40–50 мг, относительное содержание примесей $\sim(2\div 4,5)\times 10^{-3}$, а также вакуумное давление $P\approx 10^{-1}-10^{-2}$ Па. В данных условиях температуры испарения CdTe и Sb_2Se_3 составляют соответственно $T_1\leq 933$ К и $T_2\leq 890$ К.

выявлены физические факторы (глубокие уровни и их компенсации, встроенные электростатические поля, термическая обработка), обуславливающие аномальные фотоэлектрические свойства поликристаллических полупроводниковых пленок CdTe:Ag, Cu, Cd и $Sb_2Se_3:Se$ и установлены возможности управления этими свойствами внешними воздействиями: освещением, электрическим полем и температурой;

установлено энергия активации глубоких примесных центров, ответственных за возникновение ФЭС и генерацию фотонапряжений при примесном фотовозбуждении $E_1=1,04\pm 0,03$ эВ, $E_2\approx 1,17$ эВ и $E_3\approx 1,33\pm 0,05$ эВ с помощью изучения температурных зависимостей $V_{ФЭН}$, ФЭС, сопротивления $R_{пл}$, термостимулированной проводимости и релаксационных кривых ФЭС пленок CdTe:Ag, а также спектральных характеристик $V_{АФН}$ и $I_{кз}$;

обнаружена генерация фотоэлектрического напряжения в примесной области поглощения в активированных АФВ пленках CdTe:Ag, Cu, Cd и $Sb_2Se_3:Se$, возникающая в результате фотовозбуждения примесных уровней, что подтверждается спектральными характеристиками $V_{ФЭН}$ и $I_{кз}$.

показано, что смещение максимумов спектра fotocувствительности $V_{ФЭН}$ и $V_{АФН}$ в коротковолновую область спектра при уменьшении скорости испарения исходных материалов CdTe и Sb_2Se_3 объясняется изменением микроструктуры слоя.

В процессе фото поляризации тонкопленочных структур CdTe:Ag, Cu, Cd и $Sb_2Se_3:Se$ было выявлено остаточное фото проводимость, обусловленное ФЭС.

Практические результаты исследования:

разработаны технологические режимы получения фотоэлектрических $CdTe:Ag$, Cu , Cd и $Sb_2Se_3:Se$ поликристаллических пленочных структур методом термовакуумного напыления;

определено целенаправленное изменение фотоэлектрических и фотовольтаических параметров тонких пленок $CdTe:Ag$, Cu , Cd и $Sb_2Se_3:Se$, отвечающих требованиям к параметрам дешевых и эффективных фотопреобразователей.

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

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследования объясняется тем, что знание закономерностей взаимосвязи структуры, спектральных и фотоэлектрических свойств пленок $CdTe:Ag$, Cu , Cd и $Sb_2Se_3:Se$ с их рабочими параметрами способствуют расширению представлений о физических процессах в полупроводниковых поликристаллических тонких пленках. Впервые экспериментально обнаруженные эффекты «температурное и инфракрасное гашения равновесной проводимости» и «стимулирование АФВ свойства за счет термополевой миграции ионов» расширяют научные представления физики фотоэлектрических явлений.

Практическая значимость результатов исследования объясняется тем, что результаты диссертации могут быть использованы при разработке технологий изготовления дешевых и эффективных пленочных элементов-фотоприемников и фотопреобразователей на основе пленок $CdTe:Ag$, Cu , Cd и $Sb_2Se_3:Se$. Разработанные способы получения фоточувствительных пленок и прозрачных контактов могут быть использованы при создании оптоэлектронных устройств, в частности видиконов, интегральных многоэлементных фотоприемников и фотопреобразователей.

Внедрение результатов исследования.

На основе результатов разработки технологии и исследования фотоэлектрических свойств пленочных поликристаллических $CdTe:Ag$, Cu , Cd и $Sb_2Se_3:Se$ структур:

результаты исследования механизмов формирования фотоэлектрического состояния в поликристаллических пленках $CdTe:Ag$, Cu , Cd и $Sb_2Se_3:Se$ путем комплексного изучения новых электрофизических и оптических явлений в них использованы при выполнении Проекта ОТ-F2-68 «Механизмы формирования микро- и нанобразований на основе дефектов и включений в кристаллах, а также создание многофункциональных многослойных структур на их основе» (руководитель проекта — академик С. Зайнабидинов, Справка Андижанского государственного университета имени Бабура №04-2671 от 29.11.2024 г.). Использование научных результатов позволило теоретически и практически проанализировать полученные экспериментальные данные по оценке влияния температуры, давления и света на физические параметры наноразмерных полупроводниковых материалов, изучаемых в фундаментальном проекте;

Результаты определения физических факторов, определяющих фотоэлектрические свойства поликристаллических тонкопленочных полупроводников $CdTe:Ag$, Cu , Cd и $Sb_2Se_3:Se$, а также возможности управления этими свойствами с помощью внешних воздействий, таких как свет, электрическое поле и температура, были частично использованы при выполнении практического проекта с шифром «Бургут» (закрытый) в рамках Государственных научных программ в 2022–2024 годах (справка №56 от 9 января 2025 года Информационно-коммуникационного технологического и военного института связи Министерства обороны Республики Узбекистан). Это позволило разработать методы создания тонкопленочных структур для беспилотных летательных аппаратов, а также проводить необходимые

исследования для новой материаловедческой и полупроводниковой оптической спектроскопии.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на 11 международных и республиканских научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов. По теме диссертации опубликовано всего 16 научных трудов, из них 5 научных статей в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертации.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы. Объём диссертации составляет 142 страниц, в том числе 44 рисунка и 9 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

В первой главе «Современное состояние изучения фотоэлектрического эффекта в полупроводниках» приводятся краткий обзор работ по технологии изготовления и исследования фотовольтаических пленок из CdTe и Sb_2Se_3 результаты анализа текущей литературы по вопросам технологии получения, исследования свойств тонких поликристаллических пленок на их основе. Рассмотрены известные механизмы электропроводности, характерные особенности фотовольтаических свойств пленочных структур. На основе критического анализа известных результатов сформулированы цели и задачи диссертации.

Во второй главе «Разработка технологии получения и методики исследования пленок с фотоэлектрическим состоянием без внешнего поляризующего поля» описана технология изготовления фотоэлектрических пленок без внешнего поляризующего поля на основе фотовольтаических пленок CdTe и Sb_2Se_3 путем легирования их примесями Ag, Cu, Cd и Se, создающими глубокие уровни, что является необходимым условием образования ФЭС в полупроводнике. Выбор Ag и Cu в качестве примесей обусловлен тем, что диффузия этих атомов в CdTe происходит при сравнительно низких температурах ($t=300^\circ C$). Атомы Ag, Cu в кристалле CdTe могут находиться в трех зарядовых состояниях, два из которых являются акцепторными с энергиями активации $E_{A1}=E_v+0,15$ эВ и $E_{A2}=E_v+0,32$ эВ, а третий, мелкий — донорным. Избыток Cd в CdTe может создавать два глубоких донорных

уровня, а его вакансии может образовывать два глубоких акцепторных уровня. Поведение примесных атомов Se в кристаллах Sb_2Se_3 не изучено. Однако при проведенном в данной работе способе легирования Se, слой Sb_2Se_3 обладал хорошим ФЭС, следовательно избыток Se в этом материале дает глубокий уровень.

Для получения фотоэлектрических пленок использована вакуумная установка (рис. 1), в рабочем объеме которой, ограниченном кварцевым колпаком, давление остаточных газов поддерживалось в пределах 10^{-1} – 10^{-5} мм рт. ст. Для испарения полупроводника и примесей применены нагреватели тигля. Толщина пленок и степень ее легирования управлялись никелевой створкой, расположенной между подложкой и испарителями. Подогрев подложек производился с помощью печи, надетой на колпак.

Приведен оптимальный технологический режим получения пленочных фотоэлектрических, зависящий от большого числа параметров, таких как исходные массы материалов (полупроводник и примесь), скорости и времени их испарения, степень вакуума, температура подложки, угол напыления, толщина пленки.

Полупроводниковый ($CdTe$ или Sb_2Se_3) и примесный (Ag , Cu , Cd или Se) материалы с соотношением исходных масс $\sim(2\div4,5)\cdot 10^{-3}$ наносились методом термического испарения в вакууме 10^{-4} мм.рт.ст. на стеклянную или кварцевую подложку, прогретую до $520\div570$ К. Угол напыления составлял 40° , а толщина пленок 1 мкм для $CdTe$ и 1,5 мкм — Sb_2Se_3 .

Исследовано 3 способа легирования АФН слоев, приводящих к образованию ФЭС: а) на подложку напыляется тонкий слой примеси Ag или Cu с эффективной толщиной $1\div3$ Å, а затем на этой поверхности получается АФН пленка $CdTe$ со скоростью конденсации $\vartheta=0,3$ нм/с. При больших ϑ образец $CdTe$ генерирует достаточно высокое ФЭС лишь после дополнительной термической обработки; б) в процессе конденсации слоев $CdTe$ или Sb_2Se_3 на подложку легирование производилось путем напыления Ag , Cu , Cd или Se в течение $(4\div10)$ с из отдельного тигля со скоростью испарения $\vartheta_{исп}=1,3\div3\cdot 10^{-6}$ г/см². Пленки с хорошим ФЭС получаются при температурах испарения $CdTe$ и Sb_2Se_3 , $T_1\leq 933$ К и $T_2\leq 890$

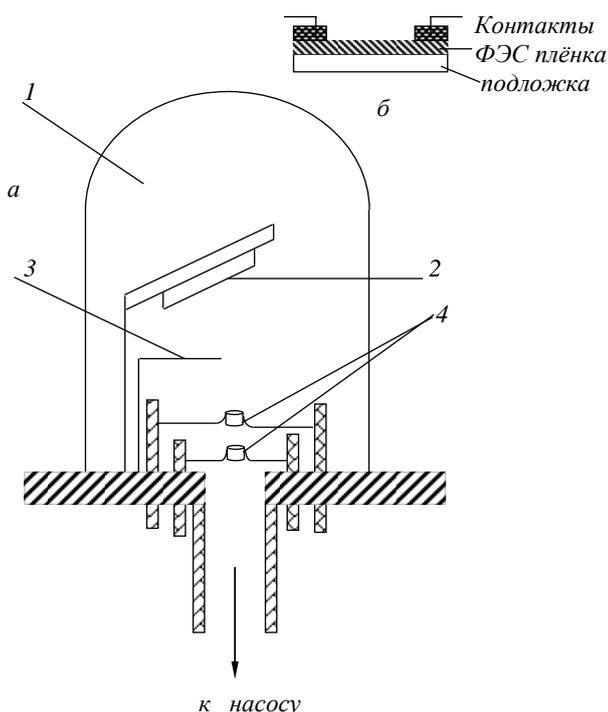


Рис. 1. Рабочая камера испарительной установки (а) и общий вид одного пленочного фотоэлектрического – ФЭС пленки (б) 1-колпак; 2-подложка; 3-экран; 4-испарители.

К, соответственно временам конденсации 100 и 60 мин. Примеси Ag, Cu, Cd или Se напыляются не позднее, чем через 30 и 20 мин после начального момента осаждения полупроводниковых соединений; в) полупроводниковые соединения $CdTe$ или Sb_2Se_3 и примесь Cd или Se в виде порошков с указанными выше соотношениями масс тщательно перемешивались с последующим отжигом шихты в течение часа в вакууме 10^{-4} мм.рт.ст. при температуре подложки $T=470$ К. Полученные смеси $CdTe: Cd$ или $Sb_2Se_3: Se$ испарялись при температурах 893 К и 873 К на нагретые подложки, осаждением паров формировались фотоэлектретные пленки (см. таблицы 1-2).

Таблица 1.а

Фотоэлектретная пленка	$V_{АФН}, В$	$V_{ФЭН}, В$	Время релаксации $V_{ФЭН}$, мин.
$CdTe : Ag$	560	70	100
$CdTe : Cd$	545	65	130
$CdTe : Cu$	460	45	70

Таблица 1.б

пленки \ t, °C		150°	180°	210°	230°	250°	275°	300°	325°	350°
		$CdTe : Ag$	$V_{АФН}, В$	215	265	320	460	525	550	580
	$V_{ФЭН}, В$	15	28	43	52	62	69	78	36	14
$CdTe : Cu$	$V_{АФН}, В$	195	220	240	275	310	380	455	270	195
	$V_{ФЭН}, В$	10	17	22	28	35	39	45	14	8
$CdTe : Cd$	$V_{АФН}, В$	205	268	315	457	514	532	556	280	200
	$V_{ФЭН}, В$	12	17	21	31	44	51	62	21	11
$CdTe$	$V_{АФН}, В$	200	260	305	450	510	525	550	300	205

Таблица 1.в

пленки \ v, нм/с		2,4	1,1	0,55	0,37	0,28	0,22	0,19	0,16	0,14
		$CdTe : Ag$	$V_{АФН}, В$	205	250	290	245	380	440	510
$CdTe : Ag$	$V_{ФЭН}, В$	4	8	13	19	26	41	61	78	78
$CdTe$	$V_{АФН}, В$	200	235	280	340	360	425	500	550	550

Таблица 2.а

пленки \ t, °C		150°	175°	200°	225°	250°	275°	300°	325°
		$Sb_2Se_3 : Se$	$V_{АФН}, В$	95	200	335	448	512	455
	$V_{ФЭН}, В$	5	12	27	41	58	43	22	8
Sb_2Se_3	$V_{АФН}, В$	92	210	330	445	505	450	345	205

Таблица 2.6

пленки		g, нм/с	2,4	2	1,6	1,2	0,8	0,4	0,1
		$Sb_2Se_3 : Se$	$V_{АФН}, В$	115	202	280	348	420	515
$V_{ФЭН}, В$	9		16	24	31	47	62	62	
Sb_2Se_3	$V_{АФН}, В$	111	200	278	345	415	505	505	

Два метода наиболее эффективны для исследований по сбору данных ФЭС, выполняемых на больших выборках. Они позволяют управлять концентрациями вводимых примесей. При этом пленки обладали наиболее выраженными и стабильными фотоэлектретными свойствами. Первый метод позволяет получать однородные и контрольные образцы, что необходимо для выяснения роли легирующих примесей, а второй – активировать определенные участки фотоэлектретных пленок. Экспериментально установлено, что пленки с наибольшими фотоэлектретными напряжениями получаются в результате легирования соответствующими примесями нижних, обращенных к подложке слоев структуры, причем волнообразно создается резкий градиент концентрации примесей по толщине. Сильное легирование центральных областей пленки приводит к существенному снижению генерируемых аномальных фотонапряжений, и, следовательно, фотоэлектретных свойств. Попытка получить фотоэлектреты путем термической обработки свежеприготовленной фотовольтаической пленки в насыщенном паре легирующих примесей не удалась. Подробно анализированы основные особенности изготовления пленок $CdTe:Ag$, $CdTe:Cu$, $CdTe:Cd$ и $Sb_2Se_3:Se$ с ФЭС, в частности, зависимость ФЭС от скорости их осаждения и температуры подложки.

Для измерения заряда ФЭС в активированных фотовольтаических пленках использованы компенсационный метод фотодеполяризации и термостимулированная деполяризация токов ФЭС. Описаны основные особенности деполяризации ФЭС фотоэлектретов без внешнего поля. $V_{ФЭН}$, $V_{АФН}$ и сила тока короткого замыкания $I_{кз}$ измерялись с помощью электроусилителей У1-2, У5-9, СК-2М и электростатических вольтметров С-50, С-90 (рис. 2).

В исследованиях медленных фотополяризационных процессов учитывалось значение времени

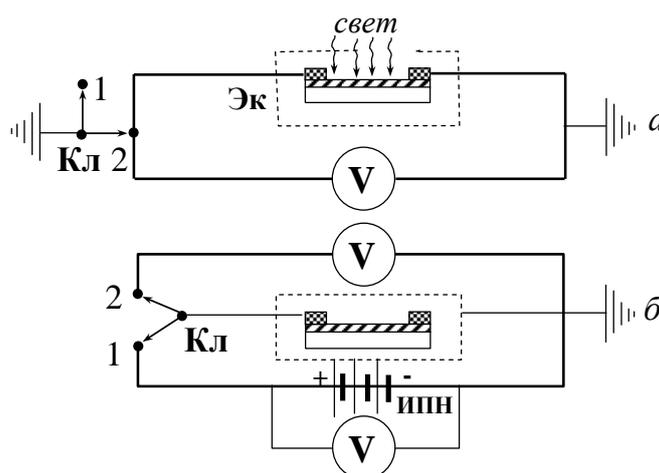


Рис. 2. Принципиальная схема фотополяризации (а) и темновой поляризации (б) плёночного фотоэлектрета. Эк-экран. ИПН-источник постоянного напряжения. 1 и 2 -контакты. Кл-ключ.

$\tau_{cx} = R_{cx} \cdot C_{cx}$, где R_{cx} и C_{cx} — сопротивление и емкость схемы. В качестве источника света использовался осветитель типа ОИ-24. Освещенность на поверхности образца измерялась путем ослабления светового потока нейтральными светофильтрами или с изменением расстояния между источником света и пленкой. Большие освещенности получены путем фокусировки нити лампы на поверхности образца. Максимальная освещенность достигала до $3,5 \cdot 10^5$ лк, а минимальная – несколько люкс. Во избежание нагрева пленки при освещенностях использовались тепловой фильтр или дистиллированная вода. Для снятия температурных зависимостей основных параметров фотоэлектрических пленок был использован криостат.

В третьей главе «Исследование временной кинетики образования и долговременной релаксации фотоэлектрического состояния в фотовольтаических пленках» с помощью исследования кинетики процесса фоточувствительности фотопроводимости рассмотрены вопросы поляризации и особенности методики измерения заряда ФЭС активированных пленок, анализируются механизмы образования и разрушения ФЭС как с внешним поляризующим полем, так и без него. Исследуется кинетика фотополяризации и релаксации ФЭН пленок $CdTe:Ag$, $CdTe:Cu$, $Sb_2Se_3:Se$ и $CdTe:Cd$. Обсуждается механизм образования темнового электронного состояния (ТЭС) в полученных структурах.

Фотоэлектрические, изготовленные по разработанной технологии, в отличие от известных поляризуются при отсутствии внешних электрических полей. Их фотополяризацию можно осуществлять как при разомкнутом, так и при замкнутом положении электродов. В первом случае фотоэлектрическая пленка, подключенная к электроизмерительному прибору, освещалась источником света интенсивностью $L = 8 \cdot 10^4$ Вт/см² в течение несколько минут, в результате чего генерировалось $V_{AFH} = 500$ В/см при $T = 293$ К. После прекращения освещения электроды пленки закорачивались на несколько секунд для исключения V_{AFH} , затем пленка снова подключалась к измерительному прибору. Последний фиксировал остаточное фотонапряжение V_{AFH} , соответствующее образованию ФЭС пленки. Значения $V_{ФЭН}$ увеличивались со временем, например, для пленок $CdTe:Ag$ через $(1 \div 2) \cdot 10^2$ с наступало насыщение. В зависимости от первоначальной экспозиции величина $V_{ФЭН}$ достигала значений 70–90 В. При этом знак $V_{ФЭН}$ всегда совпадал со знаком V_{AFH} . А при фотополяризации в условиях короткозамкнутых контактов пленки, знак $V_{ФЭН}$ противоположен знаку V_{AFH} и значение $V_{ФЭН}$ было 50–60 В.

Поляризация фотовольтаических пленок производилась обычным способом, т.е. приложением внешнего поляризующего поля при одновременном воздействии света, причем если $E_{внеш} \parallel E_{AFH}$, значения V_{AFH} и $V_{ФЭН}$ увеличиваются. При обратной полярности $E_{внеш}$ значения аномальных напряжений уменьшаются, даже в отдельных случаях наблюдается инверсия их знака. Значение темнового электрического напряжения (ТЭН) в изготовленных пленках составляло 30–40% от значения $V_{ФЭН}$, а его полярность совпадала с полярностью $E_{внеш}$.

Наращение фотоэлектрического напряжения описывается зависимостью:

$$V_{\PhiЭН}^{(1)}(t) = V_{\PhiЭН}^{CT} (1 - \exp(-t / \tau_M)), \quad (1)$$

где $\tau_M = \epsilon\epsilon_0 / \sigma$ – максвелловское время релаксации, $V_{\PhiЭН}^{CT}$ – значение $V_{\PhiЭН}$ на участке насыщения фотополяризационной кривой, $V_{\PhiЭН}(t)$ мгновенное значение $\PhiЭН$, которое в (1) характеризует фотополяризацию образца в течение времени t . Поляризационные кривые пленок $CdTe:Ag$, $CdTe:Cd$, $CdTe:Cu$ и $Sb_2Se_3:Se$ имеют экспоненциальный характер и тенденцию к насыщению. При этом значения максимального $V_{\PhiЭН}$ и времени выхода на насыщение у различных по составу пленок различны.

Следует отметить, что при освещении пленки меняются также и электропроводность, тем самым, и τ_M образца. Поэтому релаксация $\PhiЭН$ будет происходить согласно (1), но с переменным значением τ_M . Предполагая, что электропроводность меняется экспоненциально со временем релаксации $\tau_{рэл.}$, получим:

$$\ln \frac{V_{\PhiЭН}^{CT}}{V_{\PhiЭН}^{CT} - V_{\PhiЭН}} = t \cdot \frac{1}{\tau_M} = t \cdot \frac{\sigma}{\epsilon\epsilon_0} \left(1 - \frac{\sigma^{CT} - \sigma}{\sigma^{CT}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{рэл.}}} \right). \quad (2)$$

Как видно из (рис. 3), все кривые фотополяризации $Sb_2Se_3:Se$ (также, как и $CdTe:Ag$, $CdTe:Cd$, $CdTe:Cu$) пленок носят релаксационный характер и наблюдается тенденция к насыщению в соответствии с формулой (1). Значение фотоэлектрического напряжения на участке насыщения равно стационарному фотоэлектрическому напряжению $V_{\PhiЭН}^{CT}$. Из кривых фотополяризации следует, что при различных значениях интенсивности света стационарное значение $\PhiЭН$ устанавливается за разное время поляризации. Причем, с уменьшением освещенности время фотополяризации увеличивается, т.е. поляризационные кривые $V_{\PhiЭН}(t)$ фотоэлектрической пленки качественно сходятся с аналогичными кривыми обычных фотоэлектрических с внешним полем.

На кривых фотополяризации $Sb_2Se_3:Se$ пленок наблюдается небольшое отклонение от экспоненциальной зависимости, которое и следует из (2).

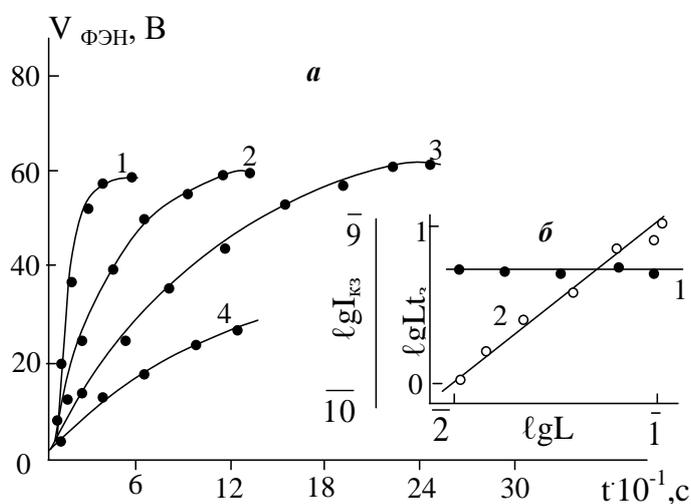


Рис. 3. Кривые фотополяризации (а), изопака поляризации (б,1) и ЛАХ (б,2) фотоэлектрической пленки $Sb_2Se_3:Se$ при $T=293$ К и интенсивностях L : 1- $8 \cdot 10^{-2}$, 2- $4 \cdot 10^{-2}$, 3- $2 \cdot 10^{-2}$, 4- $4 \cdot 10^{-2}$, 2-1, $1 \cdot 10^{-2}$ Вт/см².

Одним из важных условий возникновения ФЭС является выполнение закона взаимозаместимости, выражающееся в том, что в данный момент времени величина заряда фотоэлектрета определяется интенсивностью света и временем поляризации не в отдельности, а только их произведением $Z=L \cdot t$, т.е. экспозицией. Отметим, что выполнение этого закона проверяется с помощью изоопака фотополяризации, которая представляет собой зависимость между экспозицией Z и интенсивностью света L или временем экспозиции t при постоянном заряде фотоэлектрета. При линейной люкс-амперной характеристике (ЛАХ) образца изоопака представляет собой горизонтальную линию (см. рис. 3, б).

Заметим, что люкс-вольтовая характеристика (ЛВХ) $V_{\text{АФН}}(L)$ и люкс-амперная характеристика $I_{\text{к.з.}}(L)$ всех исследованных пленок в области интенсивности света $L < 5 \cdot 10^4$ лк близки к линейной, а в области $L = 5 \cdot 10^4 \div 3 \cdot 10^5$ лк $V_{\text{АФН}}$, а также $V_{\text{ФЭН}}$ практически насыщаются (рис. 4).

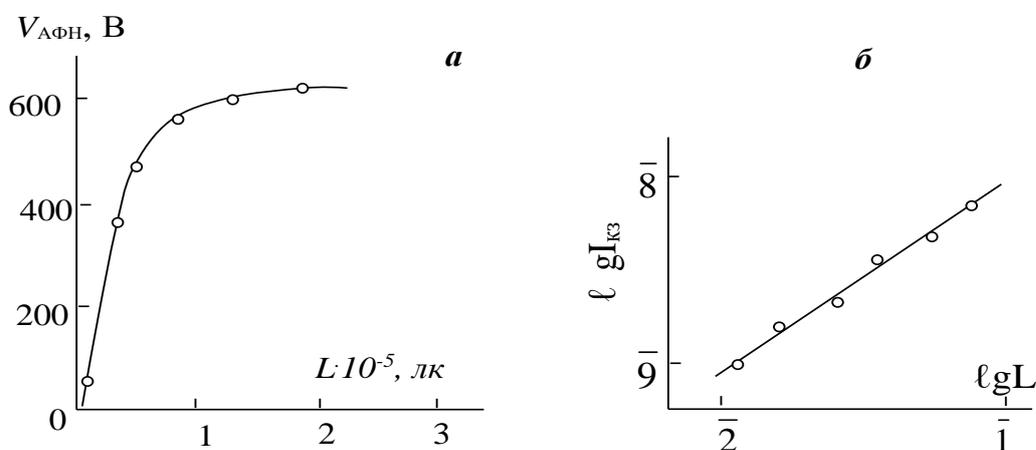


Рис. 4. Типичные люкс-вольтовая (а) и люкс-амперная (б-зависимость сила тока короткого замыкания $I_{\text{к.з.}}$ от интенсивности освещения L) характеристики фотовольтаической пленки CdTe:Ag.

Релаксационные кривые также описываются экспоненциальной зависимостью

$$V_{\text{ФЭН}}^{(1)}(t) = V_{\text{ФЭН}}^{(\text{ст})} \cdot \exp(-t / \tau^*), \quad (3)$$

где τ^* – характеристическое время жизни неосновных носителей заряда на глубоких примесных уровнях, значение которого различно для участка кривых с различными наклонами (рис. 5). За долговременной участок релаксации получим $\tau^* = 1,2 \div 2,4 \cdot 10^3$ с. Начальный участок релаксационных кривых соответствует сравнительно быстрому спаду $V_{\text{ФЭН}}(\tau = \tau^*)$ и видимо связан с максвелловским временем релаксации, в тоже время также может проявляться наличие в пленках неглубоких уровней, а второй участок с долговременной релаксацией фотонапряжения ($\tau = \tau^*$) обусловлен более глубоким уровнем прилипания.

На рис. 6 приведены зависимости $\tau_{\text{нач.}}$ и τ^* от времени фотополяризации при

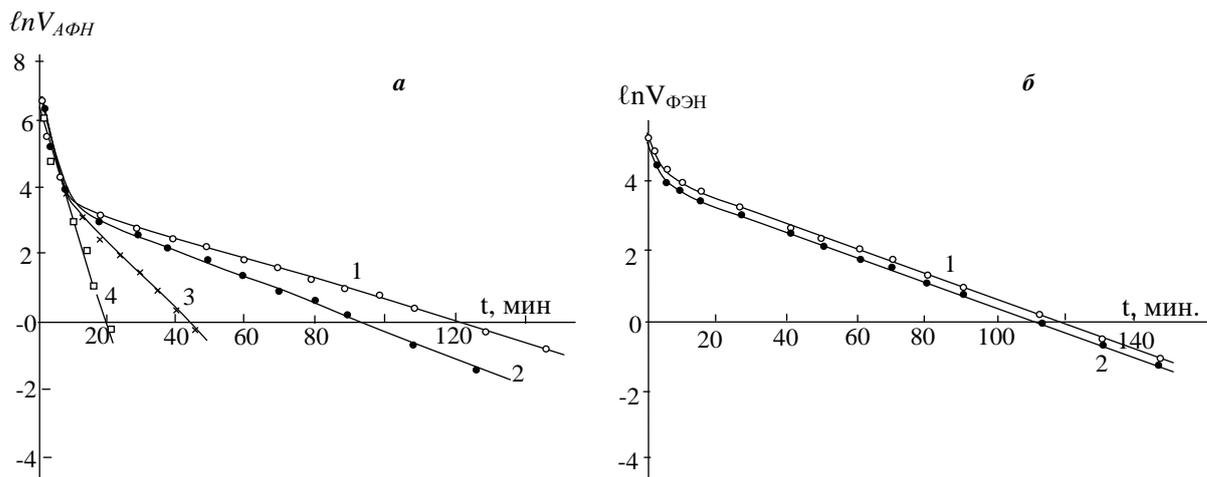


Рис. 5. Кривые релаксации $V_{AФН}$ для АФН пленок CdTe:Ag (1, 2, 3), CdTe (4) (a) и кривые деполяризации $V_{ФЭН}$ для двух пленок CdTe:Ag, полученных одновременно (б). $T=293$ К.

возбуждения светом интенсивности $L=8 \cdot 10^{-2}$ Вт/см² пленок CdTe:Ag и Sb₂Se₃:Se при комнатной температуре, для которых τ^* доходило соответственно до значений 40-45, 30-35 и 20-25 мин, тогда как $\tau_{нач.}$ было несколько минут. Отметим, что с понижением температуры значение τ^* резко возросло и измерялось часами, а значение $\tau_{нач.}$ мало зависело от температуры.

Экспериментальное значение τ^* позволяет с помощью выражения

$$\tau^* = \frac{N_A}{N_v} \exp \frac{\epsilon_A - \epsilon_v}{kT} \cdot \tau' \quad (4)$$

определить энергию активации глубоких уровней прилипания, ответственных за ФЭС в исследуемой пленке. Из второго линейного участка зависимости $V_{ФЭН}(t)$ на рис. 5, б находим $\tau^* = 35$ мин. Если считать, что этот основной участок релаксационной кривой ФЭН связан с захватом дырок на глубокий примесный уровень с концентрацией $N_A = 5 \cdot 10^{17}$ см⁻³ и $\tau' = 10^{-7}$ с, то получим значение её глубины залегания $\epsilon_{л2} = \epsilon_{л1} + 0,33$ eV, что хорошо совпадает с известным значением уровня Ag в кристаллах CdTe.

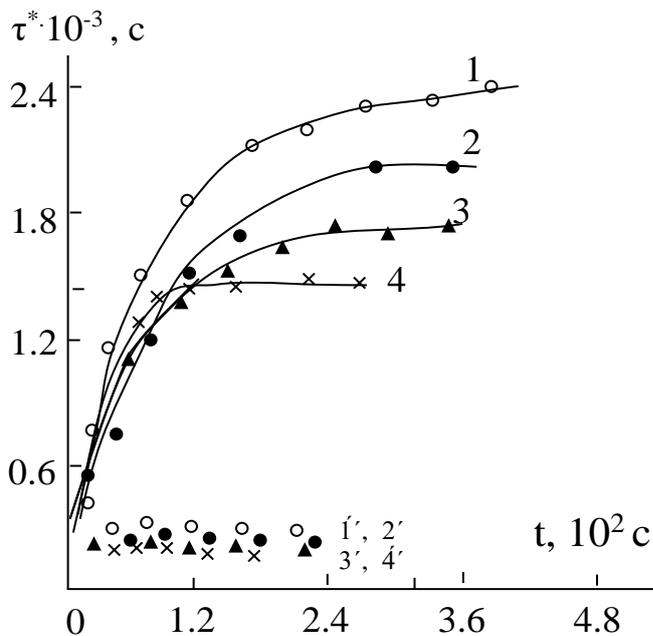


Рис.6. Зависимости $\tau_{нач.}$ и (1-4) и τ^* от времени фотополяризации для плёнок CdTe:Ag (1, 1'), CdTe:Cu (2, 2'), Sb₂Se₃:Se (3, 3') CdTe:Cu (4, 4').

Экспериментально наблюдаемые особенности фото- и темновой деполяризации и ход долговременной релаксации $\PhiЭН$ и $ТЭН$, а также механизм образования $\PhiЭС$ в легированных пленках в основном описываются теорией $\PhiЭС$ в полупроводниках с привлечением модели фотовольтаической пленки в виде периодической структуры из асимметричных микропотенциальных барьеров (рисунки 7а, 7б, 7в).

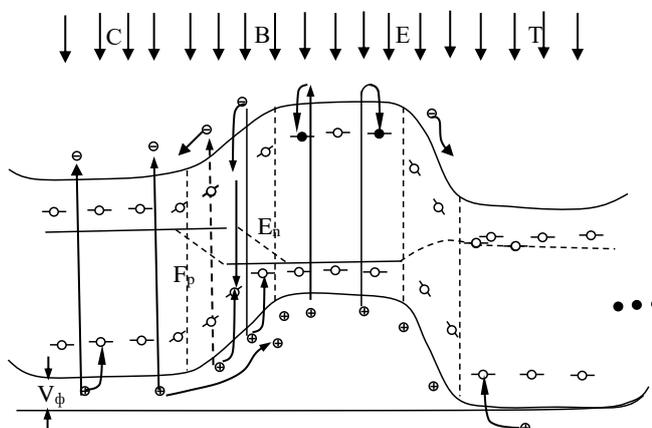


Рис. 7а. Модель фотополаризации АФВ плёнки с асимметричными барьерами при разомкнутом положении электродов.

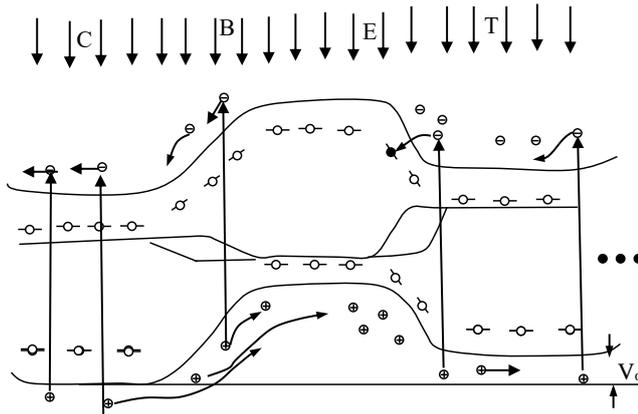


Рис. 7б. Модель фотополаризации АФВ плёнки с асимметричными барьерами при замкнутом положении электродов.

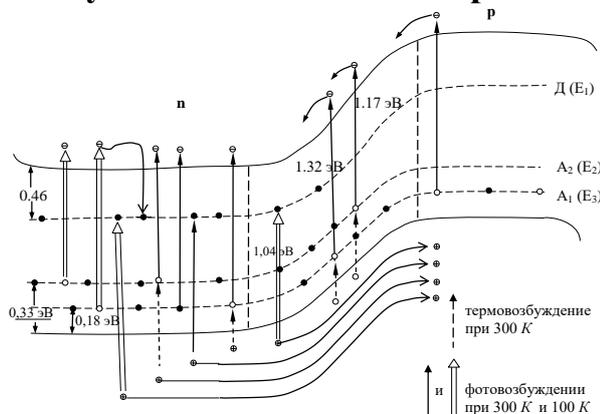


Рис. 7в. Схема процессов поглощения квантов с участием глубоких примесных центров, приводящих к генерации АФВ в плёнках АФВ.

На основе полученных результатов 3-главы делается вывод: в механизме поляризации и релаксации $\PhiЭС$ или $ТЭС$ пленочных фотоэлектретов

основную роль играют неравновесные носители заряда, захваченные глубокими центрами прилипания в областях объемного заряда (ООЗ).

В четвертой главе «Электрофизические и оптические свойства активированных АФН пленок» диссертации изложены результаты электрофизических, температурных и оптических исследований фотоэлектрических пленок, генерирующих аномальные фотонапряжения.

Темновые вольтамперные характеристики (ВАХ) образцов CdTe:Ag линейны до значений напряженности внешнего электрического поля $3,5 \cdot 10^3$ В/см. Эксперименты показали, что ВАХ активированных пленок в прямом смещении (т.е. вдоль АФВ поля) при освещении 10^5 лк, начиная со значения $E_{\text{внеш}} = 1,4 \cdot 10^3$ В/см становятся сверхлинейными, а в обратном направлении — при $E_{\text{внеш}} = 10^3$ В/см (рис. 8). Таким образом, симметричность ВАХ пленок по

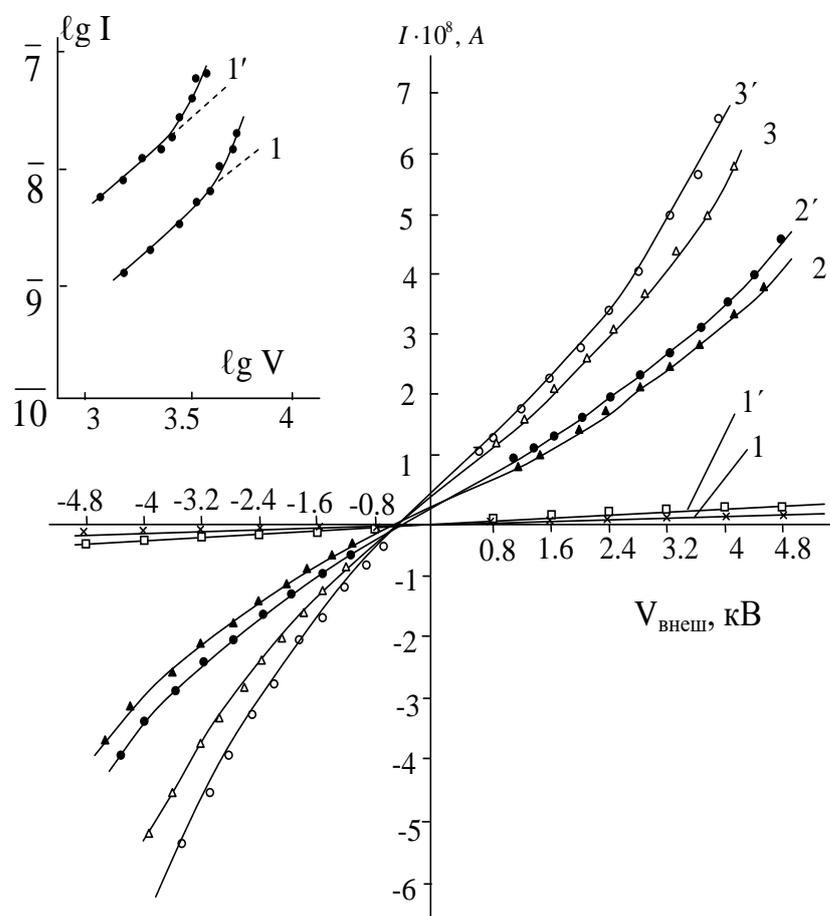


Рис. 8. Темновые (1, 1') и световые (2, 3; 2', 3') ВАХ пленок CdTe (1, 2, 3) и CdTe:Ag (1', 2', 3'). $L=10^5$ лк (2, 2') и $L=2 \cdot 10^5$ лк (3, 3'). На вставке представлены темновые ВАХ в логарифмических масштабах.

отношению полярности результирующего электрического поля под действием освещения нарушается. Аналогичное явление наблюдается и в АФВ пленках CdTe. Это, повидимому, связано с неэквивалентностью фотоэлектрических процессов, происходящих в областях с асимметричными барьерами.

В пленках CdTe:Ag, фотополяризованных при замкнутом положении контактов, наблюдается остаточная фотопроводимость, которая связана с процессами перераспределения фотоносителей, захваченных на примесных центрах в асимметричных областях. В таблице приведены значения параметров пленок, определенные из вольт-амперных характеристик при T=293 К.

Таблица 3

Пленки	$R_{\text{тем}}, \text{Ом}$	$R_{\text{св}}, \text{Ом. } I = 0,08 \text{ Вт/см}^2$	$V_{\text{АФН}}, \text{С}$	$V_{\text{ФЭН}}, \text{С}$
CdTe	$10^{11} \div 10^{12}$	10^{10}	500	-
CdTe:Ag	$10^{12} \div 10^{13}$	$10^9 \div 10^{10}$	600	100
CdTe:Сd	10^{13}	$5 \cdot 10^{10}$	500	80
CdTe:Cu	$10^{11} \div 10^{12}$	10^{10}	400	50
Sb_2Se_3	$10^{11} \div 10^{12}$	$10^{10} \div 10^{11}$	450	-
$\text{Sb}_2\text{Se}_3:\text{Se}$	$10^{11} \div 10^{12}$	10^{10}	450	60

По результатам температурных исследований $R_{\text{пл}}$ и $V_{\text{ФЭН}}$, а также термостимулированного тока ФЭС определены эффективные энергии активации примесных центров ($0,18 \pm 0,05$ эВ и $0,32 \pm 0,05$ эВ) и их концентрации ответственные за ФЭС в АФН пленке CdTe:Ag. Изучались спектральные зависимости $V_{\text{АФН}}$, $V_{\text{ФЭН}}$ и тока короткого замыкания $I_{\text{кз}}$ в собственной и примесной областях поглощения (рис. 9).

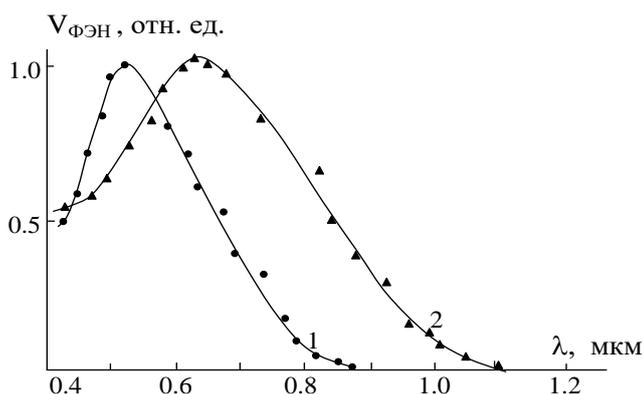


Рис. 9. Спектр $V_{\text{ФЭН}}$ фотоэлектрических пленок CdTe:Ag (1) и $\text{Sb}_2\text{Se}_3:\text{Se}$ (2).

Исследования показали, что в области собственного поглощения положение спектрального максимума фоточувствительности $V_{\text{ФЭН}}$ и $V_{\text{АФН}}$ пленок CdTe:Ag и $V_{\text{ФЭН}}$ пленок CdTe при фронтальном возбуждении смещается от 760 до 460 нм, т.е. в сторону более коротких волн с уменьшением скорости конденсации пленок, что связано со смещением эффективных асимметричных барьеров к поверхности пленки. Аналогичные явления наблюдались и в пленках $\text{Sb}_2\text{Se}_3:\text{Se}$. Изучение спектров $V_{\text{АФН}}$ и $I_{\text{кз}}$, полученных с различными скоростями конденсации, показало, что наличие инверсии знака $V_{\text{АФН}}$ и $I_{\text{кз}}$ в спектрах пленок зависит от скорости их получения и от способа фотовозбуждения (фронтальной; тыловой). Это объясняется формированием асимметричных микропотенциальных барьеров, расположенных на разной глубине, которые в зависимости от длины волны падающего излучения генерируют аномальные фотонапряжения противоположной полярности.

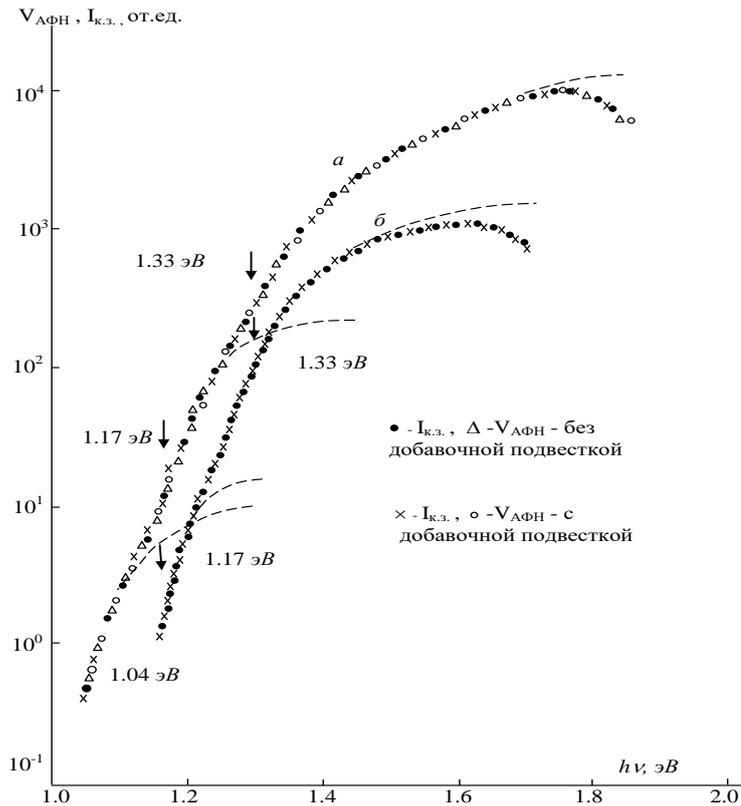


Рис.10. Спектры $V_{ФЭН}$ и $I_{к.з.}$ АФН пленок CdTe:Ag (со скоростью напыления 0,3 нм/с (а) и 0,55 нм/с (б)) при фронтальном освещении. $T=300$ К. Пунктир - теоретические кривые по модели Луковского.

В результате исследования длинноволнового края фоточувствительности $V_{АФН}$ впервые обнаружена АФВ генерация в примесной области поглощения (рис. 10).

С помощью теоретических кривых, рассчитанных для глубоких уровней согласно формуле Луковского, определены значения энергии активации глубоких уровней $E_1=1,04\pm 0,05$ эВ, $E_2=1,17\pm 0,05$ эВ и $E_3=1,33\pm 0,05$ эВ, ответственных за образование ФЭС и примесного $V_{ФЭН}$ и $V_{АФН}$. Уровни E_2 и E_3 , наблюдаемые и в температурных зависимостях $V_{ФЭН}$, ТСТ ФЭС, $R_{пл}$ и τ^* , обусловлены Ag или комплексом, в который входит Ag, а E_1 обусловлен избытком Cd. Сопоставление спектров коэффициента поглощения пленок CdTe:Ag и CdTe (рис. 11) подтвердило наличие глубоких примесных центров в легированных АФВ пленках.

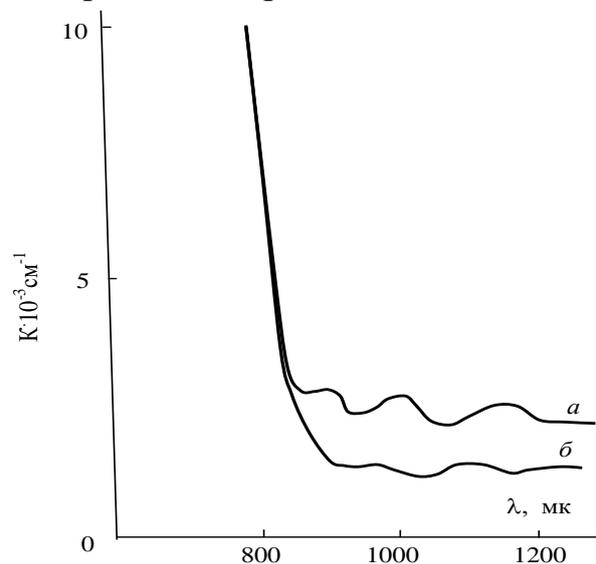


Рис. 11. Спектры поглощения АФВ пленок CdTe:Ag (а) и CdTe (б) ($T=293$ К).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам разработки технологии получения и исследования новых фотоэлектрических явлений в пленочных поликристаллических структурах $CdTe:Ag$, Cu , Cd и $Sb_2Se_3:Se$ можно сделать следующие **основные выводы**:

1. Показано, что фотоэлектрические пленки без внешнего поляризующего поля на основе АФВ пленок теллурида кадмия и трехселенистой сурьмы формируются, когда во время напыления вводят примесь серебра, меди или избыточный кадмий для $CdTe$ и селен для Sb_2Se_3 с контролируемой концентрацией. Пленки со стабильными характеристиками получатся с массой 40-50 мг исходных материалов и относительной массой примеси $2 \div 4,5 \cdot 10^{-3}$. Оптимальная скорость роста пленок для $CdTe$: 0,15 нм/с и Sb_2Se_3 : 0,4 нм/с, рабочий вакуум $\sim 10^{-4}$ мм.рт.ст. и температура подложки $523 \div 573$ К.

2. Установлено, что кинетика фотополяризации фотоэлектрических пленок $CdTe:Ag$, Cu , Cd и $Sb_2Se_3:Se$ носит экспоненциальный характер с выходом к насыщению, выполняется закон изопоака ($L \cdot t = const$), максимальное значение $V_{ФЭН}$ при $T=293$ К достигает порядка 100 В, причем знаки $V_{ФЭН}$ и $V_{АФН}$ совпадают в случае фотополяризации в разомкнутом положении электродов, а в замкнутом - противоположены, что связано с характером распределения фотоносителей в области микропотенциальных барьеров.

3. Выявлено, что образование ФЭС в легированных АФВ пленках $CdTe$ и Sb_2Se_3 обусловлено разделением фотоносителей внутренними полями асимметричных межкристаллитных барьеров и неоднородной локализацией их на глубоких уровнях. Темновое электрическое состояние, наблюдаемое в этих пленках при воздействии лишь внешнего электрического поля, создается за счет асимметричного понижения высоты барьеров вследствие инжекции носителей с последующей локализацией их на глубокие уровни.

4. Установлено, что релаксационные кривые $V_{ФЭН}(t)$ состоят из двух участков - сравнительно быстрый с характерным временем $\tau_{нач}$ и долговременной с τ^* , причем $\tau_{нач}$ связано с максвелловским временем релаксации и влиянием мелких уровней прилипания, а τ^* — медленной тепловой генерацией носителей заряда с глубоких уровней в областях микропотенциальных барьеров. Для разных пленок τ^* достигает значения $\sim 10^3$ с, а $\tau_{нач} \sim 10^2$ с при $T=293$ К. По величинам $\tau_{нач}$ и τ^* определены значения энергии активации примесных центров.

5. Темновые ВАХ пленки $CdTe:Ag$, Cu , Cd и Sb_2Se_3 до и после фотополяризации линейны в интервале $(0-5 \cdot 10^3)$ В внешнего напряжения и наблюдается остаточная фотопроводимость. Световые ВАХ асимметричны по отношению начала координат и приобретают сверхлинейный характер, что вызывается генерацией аномально большого фотонапряжения и модуляцией микропотенциальных барьеров.

6. Выяснено, что наблюдаемая инверсия знака $V_{АФН}$ и $I_{кз}$ в спектрах фотоэлектрических пленок $CdTe:Ag$ зависит от скорости их конденсации и способа фотовозбуждения (фронтальной, тыловой), и объясняется

характером формирования асимметричных микропотенциальных барьеров на различных расстояниях от поверхности пленки.

7. Установлено, что положение спектрального максимума $V_{\text{ФЭН}}$ пленок CdTe:Ag при фронтальном фотовозбуждении смещается в сторону коротких волн от 780 до 500 нм с уменьшением скорости их конденсации от 0,5 до 0,15 нм/с, что связано с изменением размеров кристаллических зерен.

8. С помощью температурной зависимости $V_{\text{ФЭН}}$, $R_{\text{пл}}$, τ^* и ТСТ ФЭС определены эффективные значения энергии глубоких уровней $E_2=0,17\pm0,05$ эВ (1,33 эВ) и $E_3=0,33\pm0,05$ эВ (1,17 эВ), которые подтверждены исследованиями длинноволнового края спектральной зависимости $V_{\text{ФЭН}}$ и $I_{\text{кз}}$, а также обнаружен дополнительный уровень $E_1=1,04\pm0,05$ эВ. Уровни E_2 и E_3 связаны с примесями Ag, а E_1 обусловлен избытком Cd. Они ответственны за образование ФЭС и примесного ФЭН в пленках CdTe:Ag .

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

FERGANA POLYTECHNIC INSTITUTE

NURMATOV OZODBEK RAVSHANBOY UGLI

**NEW PHOTOELECTRET PHENOMENA IN THIN POLYCRYSTALLINE
FILMS OF CDTE:AG, CU, CDAND $Sb_2Se_3:Se$**

04.01.07 – Condensed matter physics

ABSTRACT

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

Fergana-2025

The subject of doctoral dissertation (PhD) was registered by the Supreme Attestation Commission at the Ministry of Higher education, science and innovations of the Republic of Uzbekistan under number B2024.4.PhD/FM1200.

The Dissertation was implemented at the Ferghana Polytechnic Institute.

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

Scientific supervisor:

Yuldashev Nosirjon Khaydarovich
doctor of Physical and Mathematical, professor

Official opponents:

Mussayeva Malika Anvarovna
doctor of Physical and Mathematical, professor

Abdukaqirov Abduvaxit Gapirovich
Candidate of Physical and Mathematical, dotsent

Leading organization

Namangan engineering-construction intitute

The defense of the doctoral dissertation will be held on "___" _____2025 at ___ hours at a meeting of the Scientific Council PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 at the Ferghana Polytechnic Institute (Address: 150107, Ferghana, Ferghana St., house 86. Tel: (+998 73) 241-12-06, fax (+998 73) 241-12-06, e-mail: uzferfizika@mail.ru, small meeting room).

The dissertation can be found in the library of the institute. (registered under No. _____) (Address: 150107, Fergana, st. Fergana, house 86. Tel: (+998 73) 241-12-06).

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

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

N.A. Sultanov

Deputy chairman of the Scientific Council on award of PhD scientific degree, PhD in physics and mathematics, docent

B.J. Axmadaliyev

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

S.M. Otajonov

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

INTRODUCTION (abstract of PhD dissertation)

The aim of the research work is to determine the optimal technological conditions for obtaining CdTe:Ag, Cu, Cd, and Sb₂Se₃:Se semiconductor films with an anomalous photoelectret effect by refining production methods and studying their electrophysical, photoelectric, and optical properties.

The objects of the research work polycrystalline films of CdTe:Ag, Cu, Cd and Sb₂Se₃:Se obtained on the surface of standard glass by the method of thermal vacuum evaporation were selected.

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

a technology has been developed for obtaining photoelectret CdTe:Ag, Cu, Cd and Sb₂Se₃:Se polycrystalline film structures on a glass substrate with T=250-350 K by thermal evaporation of the initial material 40-50 mg and impurity samples with a relative mass of $\sim(2\div 4.5)\cdot 10^{-3}$ in a vacuum $P\approx 10^{-1}-10^{-2}$ Pa at evaporation temperatures of CdTe and Sb₂Se₃ $T_1\leq 933$ K and $T_2\leq 890$ K;

physical factors determining photoelectret properties of doped semiconductor films CdTe:Ag, Cu, Cd and Sb₂Se₃:Se were identified and the limits of control of these properties by external influences: illumination, electric field and temperature were established;

the activation energies of deep impurity centers responsible for the occurrence of PES and the generation of anomalous photovoltages during impurity photoexcitation were established $E_1=1.04\pm 0.03$ eV, $E_2\approx 1.17$ eV and $E_3\approx 1.33\pm 0.05$ eV by studying the temperature dependences of V_{PEV} , TSC, PES, resistance (R_{fl}) and relaxation curves of the photoelectret state of CdTe:Ag films, as well as the spectral characteristics of V_{APV} and $I_{sh.c.}$;

it was shown that the shift of the photosensitivity maxima V_{PEV} and V_{APV} during frontal excitation to the short-wave region of the spectrum is explained by a change in the layer microstructure with a decrease in the evaporation rate of the initial materials CdTe and Sb₂Se₃.

it was found that during photopolarization of photoelectret films based on CdTe:Ag with a short-circuited position of the electrodes, residual photoconductivity is observed.

Implementation of research results. Based on the results of technology development and research of photo-electret properties of film polycrystalline CdTe:Ag, Cu, Cd and Sb₂Se₃:Se:

the results of the study on the mechanisms of photoelectret state formation in polycrystalline CdTe:Ag, Cu, Cd and Sb₂Se₃:Se films, through a comprehensive investigation of new electrophysical and optical phenomena in these materials, were utilized in the implementation of Project OT-F2-68, titled "Mechanisms of the formation of micro- and nanostructures based on defects and inclusions in crystals, as well as the creation of multifunctional multilayer structures based on them" (project leader — Academician S. Zaynabidinov, Certificate of Andijan

State University named after Babur No. 04-2671 dated November 29, 2024). The use of scientific results made it possible to theoretically and practically analyze the experimental data obtained for assessing the influence of temperature, pressure, and light on the physical parameters of nanoscale semiconductor materials studied within the framework of the fundamental project.

the results of determining the physical factors that define the photoelectret properties of polycrystalline thin-film semiconductors CdTe:Ag, Cu, Cd, and Sb₂Se₃:Se, as well as the possibilities of controlling these properties using external influences such as light, electric fields, and temperature, were partially utilized in the implementation of the practical project with the code name "Burgut" (classified) within the framework of State Scientific Programs during 2022–2024 (reference No. 56 dated January 9, 2025, from the Information and Communication Technology and Military Communication Institute of the Ministry of Defense of the Republic of Uzbekistan). This facilitated the development of methods for creating thin-film structures used in unmanned aerial vehicles and enabled necessary research for advanced materials science and optical spectroscopy of semiconductor structures.

Approbation of results of a research. The main results of the dissertation were presented and discussed at 11 international and national scientific and practical conferences.

Publication of results. A total of 16 scientific papers have been published on the topic of the dissertation, including 5 scientific articles in journals recommended by the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for the publication of the main scientific results of the dissertation.

The structure and scope of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion, and a list of references. The volume of the dissertation is 142 pages, including 44 figures and 9 tables.

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

I bo'lim (1 часть; part 1)

1. Yuldashev N.K., Nurmatov O.R., Mamadieva D.T. Photoelectric State with Long-Term Relaxation in CdTe:(Ag, Cu, Cd) and Sb₂Se₃:Se Photovoltaic Films // Journal of Applied Mathematics and Physics. 2024. Vol.12 №1, – P. 43–51. (№40 Research Gate, IF: 1.79).
2. Нурматов О.Р., Абдуллаев Ш.Ш., Юлдашев Н.Х. Временная релаксация фотоэлектретного состояния в фотовольтаических пленках CdTe:Ag,Cd,Cu и Sb₂Se₃:Se // Central Asian Journal of Theoretical & Applied Sciences. 2021. Т.2. №12. – С. 315–322. (№12 Index Copernicus, IF: 6.927).
3. Юлдашев Н.Х., Ахмаджонов М.Ф., Мирзаев В.Т., Нурматов О.Р. Фотоэлектретные пленки CdTe:Ag и Sb₂Se₃ при собственном и примесном поглощении света // Евразийский союз ученых (ЕСУ, ежемесячный научный журнал), 2019. №3 (60)/ 4 часть. – С. 72–78. (№5 Global Impact Factor, IF: 0.388, GIF: >0.5).
4. Нурматов О.Р., Юлдашев Н.Х. Влияние скорости конденсации пленок CdTe:Ag с фотоэлектретным состоянием без внешнего поляризующего поля на их спектры фотопроводимости и тока короткого замыкания // Namangan davlat universiteti ilmiy axborotnomasi. 2024. №10, – С. 97–100. (01.00.00; №14).
5. Ахмаджонов М.Ф., Маматов О.М., Нурматов О.Р., Рахмонов Т.И., Юлдашев Н.Х. Спектральные характеристики фотоэлектретных пленок CdTe:Ag в областях собственного и примесного поглощения // Scientific technical journal(STJ) FerPI,-Ferghana, 2019.-V.1. №2.-P.9-17. Uzbekistan Research Online. <https://uzjournals.edu.uz/ferpi/vol2/iss3/1>

II bo'lim (2 часть; part 2)

1. Nurmatov O.R. Physical properties of polycrystalline photoelectret films // V International Scientific and Practical Conference “Progressive science and achievements”. 16-18 Dec. 2024, Dallas, TX, USA. P. 202-208.
2. Нурматов О.Р., Юлдашев Н.Х. Исследование новых фотоэлектретных состояний фотовольтаических пленок CdTe:(Ag, Cu, Cd) и Sb₂Se₃:Se с долговременной релаксацией // Международной научной конференции по теме «Современные тенденции развития физики полупроводников: достижения, проблемы и перспективы». Ташкент, 2024 г., 26–27 сентябрь, – С. 192–198.
3. Нурматов О.Р. Изучение ФЭС- как метод исследования параметров примесных центров в пленочных структурах // Международной научно-практической конференции на тему «Фундаментальные и прикладные

- проблемы физики полупроводников: решения и перспективы». Наманган, 2024 г., 4–5 октября, – С. 186–190.
4. Нурматов О.Р., Рахмонов Т.И., Юлдашев Н.Х. Спектры фотопроводимости и тока короткого замыкания пленок с фотоэлектретным состоянием без внешнего поляризующего поля // Международная научно-практическая конференция «Физика полупроводников, фундаментальные и практические проблемы современной электроники и энергетики». Наманган, 2024 г., 18–19 сентябрь, – С. 311–315.
 5. Нурматов О.Р., Рахимжонов Ж.С., Толабоев Д.Х., Турсунов И.М. и Юлдашев Н.Х. Долговременная релаксация фотоэлектретного состояния фотовольтаических пленок CdTe:(Ag, Cu, Cd) и Sb₂Se₃:Se // Международной научной конференции по теме «Тенденции развития физики конденсированных сред». Фергана, 2023г., 30–31 октября, – С. 145–148.
 6. Нурматов О.Р., Юлдашев Н.Х. Спектральные характеристики фотоэлектретных пленок CdTe:Ag в областях собственного и примесного поглощения // ФарПИ ИТЖ 2023, Т.27, №3. – С. 23–27. (05.00.00, №20)
 7. Nurmatov O.R. CdTe:Ag AFK plenkalarda termal stimulyatsiya qilingan tok // “Ishlab chiqarishning texnik, muhandislik va texnologik muammolarining innovatsion yechimlari” mavzusidagi xalqaro konferensiya. Jizzax, 2022 y., 28–29 oktyabr, 682–684-b.
 8. Нурматов О.Р., Мирзаев В.Т., Юлдашев Н.Х. Легирланган CdTe юпка поликристалл пленкада аномал фотоэлектрик кутбланиш // Международной конференции по тенденции развития физики конденсированных сред. Фергана, 2021 г., 25 май, – С. 159 –162.
 9. Нурматов О.Р., Юлдашев Н.Х. Кинетика релаксации фотоэлектретного состояния в тонких фотовольтаических пленках // “Zamonaviy mikroelektronikaning rivojlanishida fan, ta’lim va innovatsiya integratsiyasi” mavzusidagi xalqaro konferensiya. Andijon, 2020 y., 24–25 dekabr, 72–75-b.
 10. Нурматов О.Р., Мирзаев В.Т., Юлдашев Н.Х. Особенности релаксации фотоэлектретного состояния в фотовольтаических пленках // Международная конференция по Оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро– и наноструктурах. Фергана, 2020 г., 13–14 ноября, – С. 225–231.
 11. Нурматов О.Р., Рахмонов Т.И., Эргашев Ж., Юлдашев Н.Х. Спектральные характеристики фотоэлектретных состояний пленок CdTe:Ag // Международная конференция по Оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро– и наноструктурах. Фергана, 2018 г., 25–26 мая, – С. 114–120.

Avtoreferatning o‘zbek, rus va ingliz tillaridagi nusxalari Farg‘ona politexnika instituti muassisligidagi **“Sceintific technical journal”** jurnali tahririyatida tahrirdan o‘tkazildi.
(10.03.2025 y.)

Bosishga ruxsat etildi: 2025 y. Nashriyot bosma tabog‘i–3,5.
raqamli bosma usuli. Times garniturası.
Shartli bosma tabog‘i–1,75. Bichimi 64x108 1/16. Adadi 100.

“Poligraf Super Servis” MChJ
150100. Farg‘ona shahar, Aviasozlar ko‘chasi 2-uy