

**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

RAXMONOV TOXIRBEK IMOMALIYEVICH

**YUPQA QATLAMLI $\text{CdTe}_x\text{Se}_y\text{S}_{1-(x+y)}$ POLIKRISTALL
STRUKTURALARNING TEXNOLOGIYASI VA FOTO-
TENZOELEKTRIK XOSSALARI**

01.04.07 – Kondensirlangan holat fizikasi

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

Farg‘ona – 2023

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

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

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

Raxmonov Toxirbek Imomaliyevich

Yupqa qatlamli $CdTe_xSe_yS_{1-(x+y)}$ polikristall strukturalarning texnologiyasi va foto-tenzoelektrik xossalari3

Рахмонов Тохирбек Имомалиевич

Технология и фото-тензoeлектрические свойства пленочных поликристаллических структур $CdTe_xSe_yS_{1-(x+y)}$27

Rakhmonov Tokhirbek Imomaliyevich

Technology and photo-tenzoelectric properties of film polycrystalline structures $CdTe_xSe_yS_{1-(x+y)}$ 52

E'lon qilingan ishlar ro'yxati

Список опубликованных работ
List of published works.....56

**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

RAXMONOV TOXIRBEK IMOMALIYEVICH

**YUPQA QATLAMLI $CdTe_xSe_yS_{1-(x+y)}$ POLIKRISTALL
STRUKTURALARNING TEXNOLOGIYASI VA FOTO-
TENZOELEKTRIK XOSSALARI**

01.04.07 – Kondensirlangan holat fizikasi

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

Farg‘ona – 2023 yil

Falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2021.4.PhD/FM658 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya Farg'ona politexnika institutida bajarilgan.

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

Ilmiy rahbar:

Yuldashev Nosirjon Xaydarovich
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Rasmiy opponentlar:

Nuritdimov Izzatillo
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Gulyamov Gafur
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Yetakchi tashkilot:

Mirzo Ulug'bek nomidagi O'zbekiston Milliy universitet huzuridagi Yarimo'tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti

Dissertatsiyaning himoyasi Farg'ona politexnika instituti huzuridagi falsafa doktori ilmiy darajasini beruvchi PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 raqamli Ilmiy kengashning 2023 yil «03» soat 10⁰⁰ dagi majlisida bo'lib o'tadi. (Manzil: 150107, Farg'ona sh. Farg'ona k. 86 uy. Tel: (+99873) 241-12-06, faks (+99873) 241-12-06, e-mail: uzferfizika@mail.ru, kichik majlislar zali).

Dissertatsiya bilan Farg'ona politexnika institutning axborot-resurs markazi ilmiy-uslubiy bo'limida tanishish mumkin. (192 raqami bilan ro'yxatga olingan). (Manzil: 150107, Farg'ona sh. Farg'ona k. 86 uy. Tel: (+99891) 328-32-69).

Dissertatsiya avtoreferati 2023 yil «04» 03 kuni tarqatildi.

(2023 yil «04» 03 dagi 14

raqamli reestr bayonnomasi).



V.R Rasulov

falsafa doktori ilmiy darajasini beruvchi Ilmiy Kengash raisi
f-m.f PhD, dotsent.

B.J. Axmadaliyev

falsafa doktori ilmiy darajasini beruvchi Ilmiy Kengash ilmiy kotibi, f-

S.M Otajonov

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

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasining annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zaruriyati. Jaxonda qattiq jismlar fizikasi va quyosh energetikasi sohasida keng taqiqlangan zonali $A^{II}B^{VI}$ yarimoʻtkazgichlar asosidagi mikro- va nanomateriallarning original texnologiyalarini ishlab chiqish hamda ularning yangi fizik xossalarini tadqiq etish boʻyicha fundamental ilmiy-tadqiqot ishlari yetakchi oʻrinlardan birini egallamoqda. Shu jihatdan, kadmiy xalkogenidlarning qattiq eritmaları va geterostrukturalaridan zaruriy optik va fotoelektrik xossalarga ega arzon yorugʻlik nurlatgichlar, fotopriyomniklar, fotosensorlar yaratish muhim ahamiyatga ega hisoblanadi. Shu sababli soha mutaxassislarida CdS, CdSe, CdTe asosidagi quyosh elementlari va fotooʻzgartirgichlarning samaradorligini yanada oshirish alohida qiziqish uygʻotmoqda. Bu jihatdan, CdSe_xS_{1-x} va CdTe:Sn qattiq eritmalar yuqqa qatlamli strukturalarining yangi texnologiyalarini yaratish va ularda foto-tenzoelektrik hodisalarni oʻrganish kondensirlangan holat fizikasining dolzarb muammosi hisoblanadi.

Jahonning yetakchi ilmiy markazlarida yarimoʻtkazgichli polikristal yuqqa qatlamlarni oʻstirish sharoitlariga kuchli bogʻliq boʻlgan yangi strukturaviy sezgir va foto-tenzoelektrik xossalarini oʻrganishga yoʻnaltirilgan ilmiy-tadqiqot ishlari olib borilmoqda. Bu borada vakuumda portsiyaviy bugʻlatish yoʻli bilan CdTe, CdSe, CdS asosidagi anomal fotovoltaik xususiyatli yuqqa polikristall qatlamlar olish texnologiyasini ishlab chiqish va ularning foto-tenzoelektrik xossalarini oʻrganish; kirishmali CdTe:Sn yuqqa qatlamlar olish texnologiyasini ishlab chiqish va ularning fotosezgirlik spektrlariga mexanik deformatsiyaning taʼsirini oʻrganish; qattiq qorishma CdSe_xS_{1-x} asosida fotorezistiv yuqqa polikristal qatlamli strukturalar olish va ularning foto-tenzoelektrik xossalarini oʻrganish mikroelektronikaning dolzarb masalalaridir.

Soʻngi yillarda Oʻzbekiston Respublikasida yarimoʻtkazgichli materiallarini tadqiq qilish, xususan, ularning yangi texnologiyalarini ishlab chiqish va fundamental fizik xossalarini tavsiflashning usullarini ishlab chiqish boʻyicha keng koʻlamli ishlar amalga oshirilmoqda. 2022-2026-yillarda Yangi Oʻzbekistonni rivojlantirish strategiyasida "... iqtisodiyotni elektr energiyasi bilan uzluksiz taʼminlash, hayotning barcha sohalariga "Yashil iqtisodiyot" texnologiyalarini faol tatbiq etish, energiya samaradorligini oshirish..."¹ kabi dolzarb vazifalar qoʻyilgan. Belgilangan vazifalarni bajarish uchun quyosh energiyasiga asoslangan yangi ishlab chiqarish quvvatlarini qurish, shuningdek, yangi optoelektron qurilmalarni yaratish uchun zarur boʻlgan noyob elektrofizik xususiyatlarga ega kadmiy xalkogenidlarining qattiq eritmaları asosidagi yarimoʻtkazgich materiallarni yaratish katta ilmiy ahamiyatga ega.

Mazkur dissertatsiya ishi Oʻzbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil

¹Oʻzbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi "2022-2026-yillarda yangi Oʻzbekistonni rivojlantirish strategiyasi toʻgʻrisida"gi PF-60-son Farmoni ».

28-yanvardagi “2022-2026-yillarda Yangi O‘zbekistonni rivojlantirish strategiyasi to‘g‘risida”gi PF-60-son Farmoni, O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining “Fizika sohasida ta’lim sifatini oshirish va ilmiy tadqiqotlarni takomillashtirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi 2021-yil 19-martdagi PQ-5032-son Qarori va O‘zbekiston Respublikasi Vazirlar Mahkamasining 2020-yil 23-iyuldagi “Qayta tiklanuvchi energiya manbalarining qurilmalarini va ular ishlab chiqaradigan energiyaning davlat hisobini yuritish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi 452-son qarori hamda ushbu sohada qabul qilingan shunga o‘xshash huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni hal etishga ma’lum darajada xizmat qiladi.

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

Muammoning o‘rganilganlik darajasi. Ko‘pgina xorijiy ilmiy markazlarda CdS, CdSe, CdTe asosidagi yupqa qatlamli strukturalarning tok o‘tkazish mexanizmlari, fotoo‘tkazuvchanligi, optik spektrlari hamda burchak ostida o‘stirilgan CdTe plyonkalarining fotovoltaik xossalari atroflicha o‘rganilgan va ular optoelektronikada amaliy qo‘llanilmoqda. Bunday tadqiqot markazlari qatoriga Lomonosov nomidagi Moskva davlat universiteti¹ (Rossiya), Ukraina Milliy Fanlar Akademiyasining Yarimo‘tkazgichlar fizikasi instituti², Meksika Guadalajara universiteti³, AQShning Delaver universiteti, Materialshunoslik milliy instituti (Yaponiya), RFAning Lebedev nomidagi Fizika instituti, Ioffe nomidagi fizika-texnika instituti, V. Kapsukas nomidagi Vilnyus universiteti va boshqalarni kiritish mumkin. Xususan, kadmiy xalkogenidlarining polikristall yupqa qatlamli elementlari tayyorlash texnologiyaschiga sezilarli darajada bog‘liq bo‘lgan kristall donlar chegaraviy sirtining maxsus elektron xususiyatlari va chuqur sathli o‘ziga xos xajmiy lokal markazlarning mavjudligi sababli yuqori foto va deformatsiya sezgirligi bilan ajralib turishi aniqlangan.

O‘zbekistonning taniqli fizik olimlari fotovoltaik yupqa qatlamlar olish texnologiyasini yaratish va ularning fundamental fizik xossalarini o‘rganish ustida qizg‘in ish olib borganlar. Chunonchi, akademik E.A. Adirovich va uning shogirdlari T. Mirzamaxmudov, Yu.M. Yuabov, farg‘onalik fiziklar E.I. Bilyalov, A.Ya. Afuzov, N.X. Yuldashev, shuningdek, S.X. Shamirzayev, K.M.

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).

Doshanovlar xalkogenidli yarim o'tkazgichlar asosidagi plyonkalarining original texnologiyalarini ishlab chiqishdi va ularda kechadigan anomal fotoelektrik effektlarning o'ziga xos tomonlarini nazariy jihatdan tavsiflab berishdi. Saidov M.S., Mirsagatov Sh.A., Razikov T.M. va M.A. Karimovlarning eksperimental ishlarida kadmiy xalkogenidli yupqa qatlamli strukturalarning fotoelektrik xossalari va tok oqishining mexanizmlari tadqiq etilgan.

Biroq, shu vaqtgacha CdTe, CdSe, CdS fotovoltaik yupqa qatlamlarni vakuumda portsiyalab bug'latish yo'li bilan, legirlangan CdTe:Sn plyonkalarini, CdSe_xS_{1-x} qattiq eritmasi asosidagi fotorezistiv polikristal yupqa qatlamli strukturalarni olish texnologiyalarini ishlab chiqish va ularning foto-tenzoelektrik xususiyatlarini o'rganish muammolari etarlicha hal etilmagan.

Dissertatsiya mavzusining dissertatsiya bajarilgan ilmiy tadqiqot muassasasi ilmiy tadqiqot ishlari bilan bog'liqligi. Dissertatsiya ishi Farg'ona politexnika institutida, xususan, fundamental ilmiy loyiha: O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Fundamental tadqiqotlarni qo'llab-quvvatlash jamg'armasining 80-06-sonli granti va institutning 2017-2022 yillarga mo'ljallangan "Kadmiy xalkogenidlarining yarim o'tkazgich plyonkali strukturalarida foto-tenzoelektrik hodisalar" mavzudagi istiqbolli ilmiy rejasi doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi vakuumda termik bug'latish usulini takomillashtirish orqali turli tarkibdagi CdTe_xSe_yS_{1-(x+y)} yupqa qatlamli strukturalarni olishning optimal texnologik rejimlarini aniqlash va ularning foto-tenzoelektrik xossalarini o'rnatishdan iborat.

Tadqiqot vazifalari:

vakuumda portsiyaviy bug'latish yo'li bilan CdTe, CdSe, CdS asosidagi anomal fotovoltaik xususiyatli yupqa polikristall qatlamlar olish texnologiyasini ishlab chiqish va ularning foto-tenzoelektrik xossalarini o'rganish;

kirishmali CdTe:Sn yupqa qatlamlar olish texnologiyasini ishlab chiqish va ularning fotosezgirlik spektrlariga mexanik deformatsiyaning ta'sirini o'rganish;

qattiq qorishma CdSe_xS_{1-x} asosida fotorezistiv yupqa polikristal qatlamli strukturalar olish va ularning foto-tenzoelektrik xossalarini o'rganish.

Tadqiqot ob'ekti sifatida termik vakuumli bug'latish usuli bilan shisha taglik yuzasida olingan polikristalli CdTe, CdSe, CdS, CdTe:Sn va CdSe_xS_{1-x}, yupqa qatlamlari tanlangan.

Tadqiqot predmeti CdTe, CdSe, CdS, CdTe:Sn va CdSe_xS_{1-x}, plyonkalarini olishning texnologik jarayonlari hamda elektrofizik, fotoelektrik va tenzoelektrik hodisalardan iborat.

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

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

ilk bor $P \approx 10^{-1} - 10^{-2} Pa$ vakuumda 40-50 mg boshlang'ich materialni portsiyalab bug'latish orqali $T_p = 250 - 350 K$ temperaturali shisha taglikda $CdTe$, $CdSe$, CdS fotovoltaiik yupqa qatlamlar olish texnologiyasi ishlab chiqilgan hamda fotokuchlanish, qisqa tutashuv fototoki spektrlarining deformatsiya, haroratga bog'lanishini tahlil qilish asosida anomal fotovoltaiik effekt assimetrik potentsial to'siqlarning zanjirlari tufayli yuzaga kelishi aniqlangan.

ikki qo'shni kristall donlar chegarasidagi sirtoldi sohalarning assimetrik fotovoltaiik xususiyatlarini va burchak ostida o'tqizilgan yupqa qatlam o'sishining real strukturasi hisobga olgan holda anomal foto-EYuK shakllanishining fenomenologik nazariyasi rivojlantirilgan va u eksperimental olingan spektral, lyuksvltaiik xususiyatlarga sifat jihatidan qoniqarli mos kelishi ko'rsatilgan.

ilk bor qalinligi $d \approx 0,8 - 1,0 mkm$ bo'lgan yuqori qarshilikli $CdTe:Sn$ yupqa qatlamlar uchun Sn miqdori 0 dan 5 atom.% gacha ortganda fotokuchlanish qiymati 400 dan 4200 V gacha o'sishi, so'ngra Sn 8 atom.% gacha ko'payganda sekin-asta 2000 V ga tushishi, ularning deformatsiya xarakteristikasi chiziqli va barqaror tenzo sezgirlikka ega bo'lishi aniqlangan.

qalinligi $d \sim 10,0 - 15,0 mkm$ $CdSe_{0,8}S_{0,2}$ yupqa qatlamlar faollanish energiyasi $E_c - 0,6 \pm 0,02 eV$ bo'lgan ortiqcha kadmiy tufayli elektron o'tkazuvchanlikka ega bo'lishi ko'rsatilgan. $CdCl_2$ bug'ida 4 min termik ishlov berilganda, kadmiy vakansiyasi va xlor atomining kompleksi- $E_v + (0,42 \pm 0,02) eV$, tez rekombinatsiya markazi- $E_v + (0,92 \pm 0,02) eV$, shuningdek selen va kadmiy vakansiyasining kompleksi- $E_c - (0,19 \pm 0,02) eV$ hosil bo'lishi aniqlangan.

fotorezistiv $CdSe_{0,8}CdS_{0,2}$ yupqa qatlamlar etarli darajada yuqori $K \approx 2 \cdot 10^2$ nis.b. tenzosezgirlikka ega bo'lib, yoritish intensivligi L ortishi bilan kamayishi va $L \geq 10^4 lk$ qiymatlarda yuqori fotoo'tkazuvchanlik ostida deyarli yo'qolib ketishi aniqlangan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagidan iborat:

vakuumda termik bug'latish yo'li bilan turli tarkibdagi kadmiy xalkogenidlarining fotovoltaiik va fotorezistiv yupqa qatlamli polikristal strukturalar olishning texnologik rejimlari ishlab chiqilgan;

$CdTe_xSe_yS_{1-(x+y)}$ yupqa plyonkalarining fotoelektrik va deformatsiya kattaliklarining o'zgarishi, arzon va samarali foto va tenzodatchiklar yaratish mumkinligi aniqlangan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi qattiq jismlar fizikasini zamonaviy o'lchash usullaridan foydalanilganligi va olingan ilmiy natijalarni nufuzli nashrlarda chop etilgan ishlarning natijalariga mos kelishi, yuqori sezgir texnologiyalar asosida olingan ilmiy natijalarning nazariy ma'lumotlarga mos kelishi, olingan natijalarning sinalgan fizik modellar doirasida izohlab berilishi bilan asoslangan.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.

Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati shundan iboratki, $CdTe_xSe_yS_{1-(x+y)}$ plyonkalarining tuzilishi, spektral va foto-tenzoelektrik xossalari hamda ularning ishchi parametrlari orasidagi bogʻlanish qonuniyatlarini bilish yarimoʻtkazgichli polikristall yupqa qatlamlardagi fizikaviy jarayonlar haqidagi tasavvurlarni kengaytirishga yordam beradi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati dissertatsiya natijalaridan arzon va samarali quyosh batareyalari, fotodetektorlar va $CdTe_xSe_yS_{1-(x+y)}$ asosida foto-tenzoelektrik datchiklar tayyorlash texnologiyalarini ishlab chiqishda foydalanish mumkinligi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Yupqa qatlamli polikristall $CdTe_xSe_yS_{1-(x+y)}$ strukturalarning texnologiyasini ishlab chiqish va foto-tenzoelektrik xossalarni oʻrganish boʻyicha olingan ilmiy natijalar asosida:

kadmiy xalkogenidlarining polikristall yupqa pardalaridagi deformatsiya hodisalarini tahlil qilishning nazariy va eksperimental usullari ishlab chiqilgan, bu vakuumda termik bugʻlatish usuli bilan yarimoʻtkazgichli foto-tenzodatchiklar olish texnologiyasini takomillashtirish imkonini berdi va u «Uzeltexsanoat» AK «FOTON» AJ (“Uzeltexsanoat” AK ning 06.04.2023 y. dagi № 04-3/339 sonli maʼlumotnomasi)” korxonasida yarimoʻtkazgichli elektron qurilmalar tayyorlashda foydalanilgan. Ushbu ilmiy yangilikni qoʻllash, shubhasiz, yarimoʻtkazgich yupqa pardali foto va tenzodatchiklar tayyorlash usulini modernizatsiya qilishga olib kelgan;

polikristal $CdTe$, $CdSe$, CdS , $CdTe:Sn$ va $CdSe_xS_{1-x}$ yupqa qatlamlarining foto-tenzoelektrik xossalarni tadqiqot natijalari va kristall donlarning chiziqli davriy assimetrik strukturalarida yuqori kuchlanishli foto-EYuKni hisoblash usuli OT-F2-70 «Kuchli elektromagnit maydondagi nanooʻlchamli yarimoʻtkazgich parametrlariga harorat, deformatsiya va yorugʻlikning taʼsiri» ilmiy loyihani bajarishda qoʻllanilgan (loyiha rahbari prof. G.Gulyamov, Namangan muhandislik-qurilish institutining 2023-yil 25-martdagi 06/10-09/276-sonli maʼlumotnomasi). Ilmiy natijalardan foydalanish yorugʻlikning xususiy va kirishmali yutilishida kuchli legirlangan yarimoʻtkazgichli strukturalarda elektron kinetik hodisalarning fizik mexanizmlarini tahlil qilish imkonini bergan.

Tadqiqot natijalari aprobatsiyasi. Dissertatsiyaning asosiy natijalari 6 ta xalqaro va 3 ta respublika ilmiy-amaliy anjumanlarida maʼruza qilindi va muhokama qilindi.

Tadqiqot natijalarining eʼlon qilinganligi. Dissertatsiya mavzusi boʻyicha jami 18 ta ilmiy ish, shu jumladan 6 ta ilmiy maqola Oʻzbekiston Respublikasi oliy attestatsiya komissiyasi tomonidan dissertatsiya ishlarining ilmiy natijalarini eʼlon qilish uchun tavsiya etilgan jurnallarda chop etilgan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya kirish, uchta bob, xulosa, 126 ta foydalanilgan adabiyotlar roʻyxati iborat. Dissertatsiyaning hajmi 136 betni tashkil etadi.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Kirish qismida dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zaruriyati qisqacha asoslab berilgan, O'zbekiston Respublikasi fan va texnologiyasini rivojlantirishning asosiy ustuvor yo'nalishlari bilan tadqiqot o'rtasidagi bog'lanish aniqlangan, dissertatsiya mavzusi bo'yicha ilmiy ishlar va muammoning o'rganilganlik darajasi qisqacha tahlil qilingan, maqsad va vazifalar shakllantirilgan, tadqiqot ob'ektlari, sub'ektlari va usullari belgilangan, tadqiqotning ilmiy yangiligi taqdim etilgan, olingan natijalarning ishonchligi asoslangan, ularning nazariy va amaliy ahamiyati ochib berilgan, natijalarni amalga oshirish va ishlarning aprobatsiyasi haqida ma'lumot keltirilgan.

“Kadmiy xalkogenidlarining yupqa pardali strukturalarida foto- va tenzoelektrik hodisalarni o'rganishning hozirgi holati” nomli birinchi bobida CdS, CdSe, CdTe kristallarining asosiy parametrlari va texnologiyasi bo'yicha joriy adabiyotlarni tahlil qilish natijalari haqida qisqacha ma'lumot berilgan. Ular asosida yupqa polikristall qatlamlar olish, elektr o'tkazuvchanligining ma'lum mexanizmlari, fotoo'tkazuvchanlikning xarakterli xususiyatlari, fotovoltaik va tenzorezistiv xususiyatlari ko'rib chiqilgan. Ma'lum natijalarni tanqidiy tahlil qilish asosida dissertatsiyaning maqsad va vazifalari shakllantirilgan.

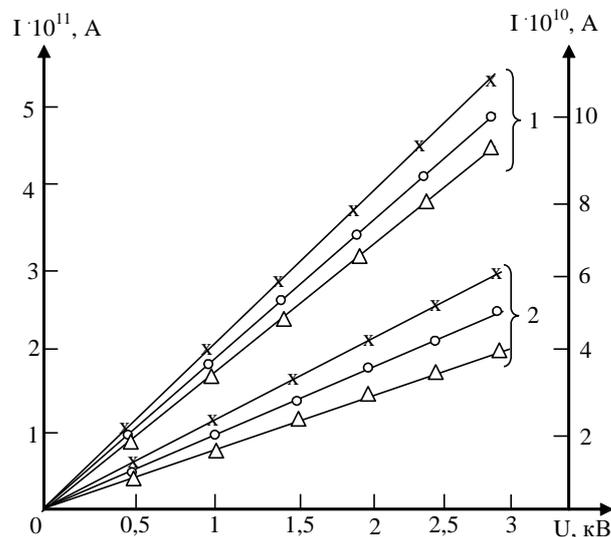
“Vakuumba portsiyalab bug'latish yo'li bilan tayyorlangan CdTe, CdSe, CdS, fotovoltaik yupqa polikristall qatlamlarning foto-tenzoelektrik xossalari” nomli ikkinchi bobda shaffof dielektrik taglikda kadmiy xalkogenidlaridan vakuumda alohida portsiyalab termik bug'latish usuli bilan anomal fotovoltaik xossalari ega bo'lgan yupqa qatlamli ($d \approx 1.0$ mkm) elementlarni olish texnologiyasini takomillash-tirishning ayrim masalalari ko'rib chiqilgan. CdTe, CdSe, CdS polikristal yupqa qatlamlarining volt-amper, lyuks-amper, lyuks-volt va deformatsiya xarakteristikalarini tekshirishning eksperimental natijalari tahlil qilingan. Olingan namunalarda chiziqli VAX, LAX, temperaturaviy ($T \approx 120-320$ K) va deformatsiyaviy ($\epsilon \approx 3 \cdot 10^{-5} - 3 \cdot 10^{-3}$ nis.b.) xarakteristikalariga ega ekanligi ko'rsatilgan. Shuning uchun ular nurlanish spektrining ko'rinadigan va infraqizil nurga yaqin sohalarida mexanik deformatsiyaga sezgir bo'lgan istiqbolli fotopriEmniklar sifatida xizmat qilishi mumkin. Shuningdek burchak ostida bug'latib o'stirilgan yupqa polikristall plyonkalarda xususiy va aralashmali fotoqo'zg'alish ostida anomal yuqori fotokuchlanish hosil bo'lishining yangi nazariyasi ishlab chiqilgan, uning asosida dissertatsiyada olingan va hozirgi adabiyotlardan ma'lum bo'lgan eksperimental natijalar tahlil qilingan.

Yupqa qatlamli strukturalarni olish uchun CdTe, CdSe, CdS ning "o'ta toza" belgisi bo'lgan mayda dispersiyali kukunlari, shuningdek ushbu qo'shaloq birikmalarni alohida komponentlarining mexanik aralashmalari ishlatilgan. Tabiiyki, dastlabki materialning tarkibiga, uning bug'lanish xususiyatlari va sharoitlariga bog'liq bo'lgan bug' fazasining tarkibi yupqa fotovoltaik qatlamlarning tuzilishi va xususiyatlariga sezilarli darajada ta'sir qiladi. Shuning

uchun ushbu texnologik omillarni hisobga olgan holda biz quyidagi komponentlardan yupqa qatlamli strukturalarni oldik: 1. Ma'lum miqdordagi stexiometrik tarkibli CdTe, CdSe va CdS mexanik aralashmalardan. 2. Bug'latilayotgan materialning ma'lum portsiyalaridan. 3. CdTe va CdS kukunlarining 20 mass % gacha ortiqcha Cd bilan mexanik aralashmalaridan. 4. CdSe kukunlarining 15 mass. % gacha ortiqcha Cd bilan mexanik aralashmasidan.

Tadqiqotlar shuni ko'rsatdiki, birinchi portsiyaning 5% dan 30% gacha o'sishi bilan normal sharoitda yupqa qatlamli element tomonidan yorug'lik ostida 1 sm uzunlikda hosil bo'lgan maksimal fotokuchlanish kadmiy tellurid uchun 2500 V gacha va kadmiy sulfidda esa 1200 V gacha oshadi, shundan keyin (30% dan yuqori) asta-sekin tushadi. Bug'lanmagan qism (uchinchi portsiya) miqdori 0 dan 10% gacha ko'tarilishi bilan fotokuchlanishning maksimal qiymati oshadi, keyin esa (10% dan yuqori) pasaya boshlaydi. Eng yuqori fotokuchlanish qiymati quyidagi sharoitlarda olingan: I qism ~30%, II qism ~60%, III qism ~10%. Eng past fotokuchlanish butun boshlang'ich materialdan olingan yupqa qatlamlari tomonidan yaratilgan. Eng yuqori fotokuchlanish ~5 kV 1-portsiyalaridan olingan CdSe plyonkalari tomonidan yaratilgan (boshlang'ich materialning 25%). Dastlabki materialning eng kichik optimal massalari aniqlandi. Ular: CdTe-40 mg, CdSe va CdS-50 mg edi. Dastlabki material portsiyalarining hosil qilinadigan fotokuchlanish qiymatiga bunday ta'siri bug'lanish jarayonida namunaning molekulyar tarkibi o'zgarishi bilan bog'liq va bu hosil bo'lgan qatlamlarning fazaviy tarkibi va tuzilishining o'zgarishiga olib keladi.

Optimal texnologik sharoitlarda olingan qalinligi $d \approx 1$ mkm va yuzasi 5×20 mm² bo'lgan CdTe, CdSe yupqa qatlamli elementlarning elektr xossalari o'rganildi, ularning volt-amper xarakteristikalari -3 kV/sm dan +3 kV/sm gacha bo'lgan elektr maydon kuchlanganligi oralig'ida qorong'ulikda va $5 \cdot 10^4$ lyuks tabiiy yoritilganlikda olindi. Ma'lum bo'lishicha, ushbu yupqa qatlamlarning VAX boshqa adabiyotlardagi kabi qorong'ulikda va yorug'lik ostida chiziqli bo'ladi, ammo ularning qorong'ulikdagi elektr qarshiligi boshqa usullar bilan olingan shunga o'xshash elementlarning qarshiligidan bir tartibda yuqoriroqdir $R \approx 10^{12} \div 10^{13}$ Om. Buning sababi shundaki, portsiyalab bug'latish



1-rasm. CdTe (1) va CdS (2 chap shkala) yupqa qatlamlar VAXga mexanik deformatsiya ta'siri: $\epsilon=0$ (o), $2,0 \cdot 10^{-3}$ (Δ -cho'zilish), $-2,0 \cdot 10^{-3}$ nis.b. (x-siqilish). $T=300$ K.

bilan olingan shunga o'xshash elementlarning qarshiligidan bir tartibda yuqoriroqdir $R \approx 10^{12} \div 10^{13}$ Om. Buning sababi shundaki, portsiyalab bug'latish

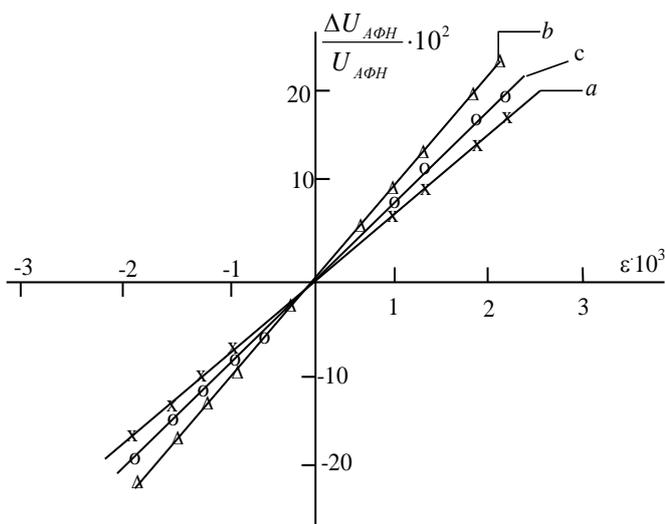
usuli bilan tayyorlangan fotovoltaik plyonkalarda ko'proq faol mikro fotoelementlar (mikro-geteroo'tishlar) yuzaga keladi va faol bo'lmaganlar (shuntlovchi qatlamlar) soni kamayadi, kristall donlar hajmida donor va aktseptor aralashmalarining kuchli kompensatsiyalashuvi sodir bo'ladi.

1-rasmda *CdTe*, *CdS* yupqa qatlamlarning qorong'ulikdagi VAX ga tashqi elastik deforma-tsiyaning ta'siri keltirilgan. VAX chiziqlaridan ko'rinadiki, deformatsiya natijasida VAX ning chiziqli xarakteri o'zgaraydi. Bir tomonlama siqilish deformatsiyasida yupqa qatlamning elektr o'tkazuvchanligi sezilarli darajada oshadi, cho'zilish ostida esa pasayadi. Bu deformatsiya ta'sirida kristall donlar chegaralaridagi potentsial to'siqlar parametrlarining o'zgarishi bilan bog'liq. Tabiiyki, to'siqning balandligi va kengligi siqilishda kamayib boradi va cho'zilishda ortadi.

Yupqa qatlamli namunalarning tenzosezgirlik koeffitsienti K $U=const$ doimiy kuchlanishda

$$K = \Delta I / I_0 \varepsilon, \quad (1)$$

formula bo'yicha hisoblab chiqilgan. Bu erda $\Delta I = I - I_0$ - tok kuchining mutloq o'zgarishi, I va I_0 - deformatsiyaning mavjudligi va yo'qligida namuna orqali o'tadigan tok kuchi, ε - nisbiy deformatsiya. Hisob-kitoblar shuni ko'rsatdiki, K ning qiymati o'rganilayotgan plenkalar uchun 60 dan 100 n.b. gacha tashkil etadi.



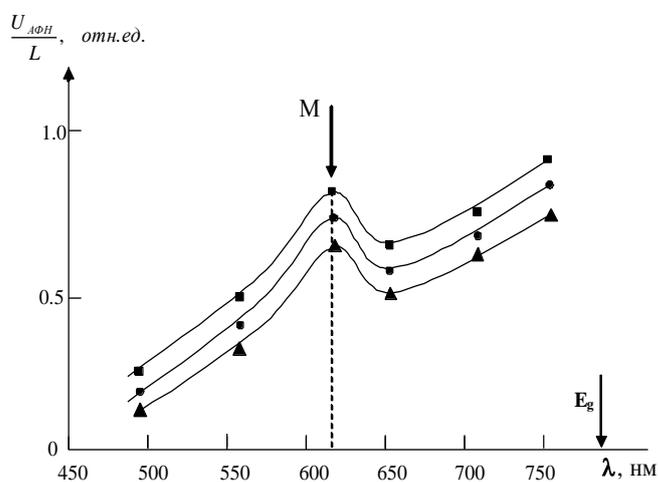
2-rasm. CdTe (a), CdS (b) va CdSe (c) yupqa pardalarning cho'g'lanma lampa nurlanish $L=2 \cdot 10^4$ lk intensivligida U_{AFN} bo'yicha deformatsiya xarakteri-stikasi. $T=300$ K.

ravishda ortadi. Rasmdan yana shuni ko'rish mumkinki, U_{AFN} bo'yicha tenzosezgirliги *CdS* plyonkalari uchun eng yuqori: $K \approx 10^2$. Deformatsiya paytida fototok va fotokuchlanishning o'zgarishi, shubhasiz, yupqa qatlamlarning kristall strukturasi-dagi mikropotentsial to'siqlar parametrlarining o'zgarishi bilan bog'liq bo'lib, ular birinchi navbatda kristall donlarining interfeyslaridagi assimetrik getero-o'tishlar tufayli hosil bo'ladi. Xona haroratida deformatsiya ta'sir ettirilgan va deformatsiyasiz *CdTe* va *CdS* yupqa pardalarning lyuks-amper xarakteristikalari yorug'lik intensivligining 0 dan $5 \cdot 10^4$ lyuksgacha oraliq'ida o'rganildi va ular 3-

rasmda keltirilgan. Ko‘rinib turibdiki, LAXlar deformatsiya mavjud bo‘lganda ham, yo‘qligida ham chiziqli bo‘ladi.

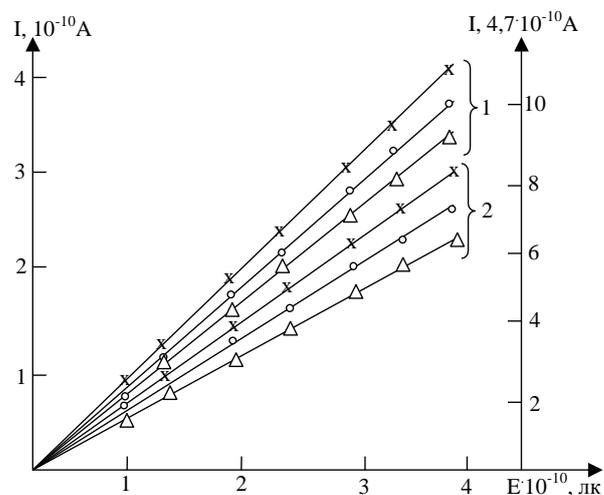
Deformatsiya ta‘sirida LAX ning sifat ko‘rinishi o‘zgarmaydi, faqat cho‘zilishda ordinata bo‘ylab pastga va siqilish paytida yuqoriga siljiydi, ya‘ni fototok siqilishda ortadi va cho‘zilishda esa kamayadi. Biz bunday o‘zgarishlar kadmiy xalkogenidlarining fotovoltaik yupqa pardalarida mavjud assimetrik mikropotensial to‘siqlarning deformatsiya ta‘sirida o‘zgarishi bilan bog‘liq va bu o‘z navbatida ushbu plyonkalarining sezilarli foto va tenzosezgirlikiga olib keladi deb hisoblaymiz.

Portsiyal bug‘latish usuli bilan olingan CdTe, CdSe plyonkalari uchun spektral xarakteristikalar $U_{AFN}(\lambda)$ mexanik deformatsiya mavjud va mavjud bo‘lmagan hollarda qayd etilgan. Ushbu plyonkalar uchun tipik $U_{AFN}(\lambda)$ egri chiziqlar sifat jihatidan bir xil shaklga ega. Shuning uchun 4-rasmda faqat CdTe: Cd plyonkasi uchun $\hbar\omega > E_g$ qisqa to‘lqin uzunlik sohasidagi spektrlarning



4-rasm. CdTe: Cd plyonkaning $U_{AFN}(\lambda)$ spektriga mexanik deformatsiyaning ta‘siri. Nuqtali chiziqlar uchun $\bullet - \epsilon = 0$; $\blacksquare - \epsilon = 2,0 \cdot 10^{-3}$ nis.b. (cho‘zish) va $\blacktriangle - \epsilon = -2,0 \cdot 10^{-3}$ nis.b. (siqilish), $T = 300$ K.

darajada rivojlangan assimetrik mikropotensial to‘siqlari bo‘lgan fotovoltaik plyonkalar hosil bo‘lishini anglatadi. Bizning fikrimizcha, M-chizig‘i CdTe-CdO-CdTe... tipidagi mikro-geteroo‘tishli struktura tomonidan qo‘shimcha fotokuchlanish hosil qilinishi bilan bog‘liq. Xona haroratida CdTe va CdO ning

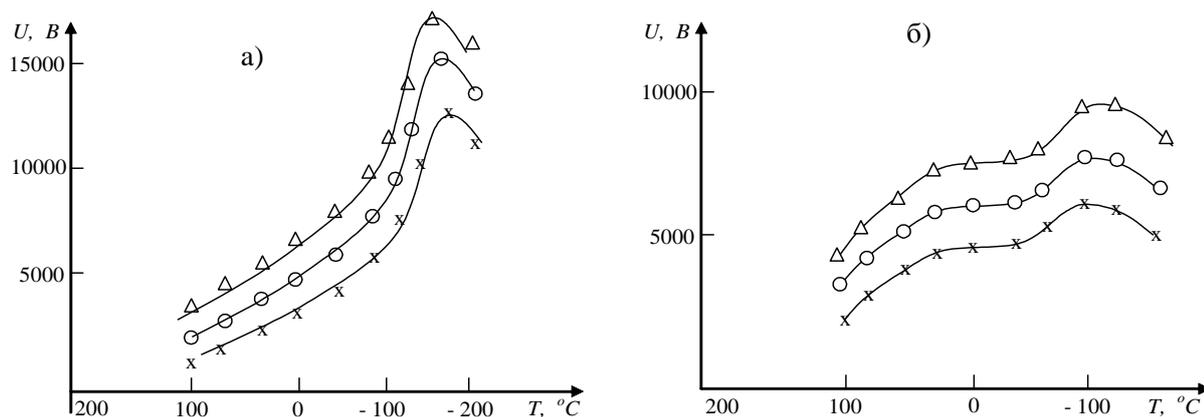


3-rasm. CdTe (1) va CdS (2) ning lyuks-amper xarakteristikasi: $\epsilon = 0$ (o), $\epsilon = -2 \cdot 10^{-3}$ (x-siqilish) va $\epsilon = 2 \cdot 10^{-3}$ nis.b. (Δ - cho‘zish). $T = 300$ K.

fragmentlari keltirilgan. Rasmdan ko‘rinadiki, fotokuchlanishning maksimumi $\lambda_M = 613$ nm ($\hbar\omega_M \approx 2.02$ eV) to‘lqin uzunligida joylashgan xarakterli M spektral chizig‘i kuzatiladi, u taxminan (550-650) nm oralig‘ida joylashgan va ilgari ma‘lum texnologiyalar yordamida boshqa mualliflar tomonidan olingan CdTe va CdTe: Ag yupqa qatlamlarida aniqlanmagan. $U_{AFN}(\lambda)$ spektrning qisqa to‘lqinli sohasida M chizig‘ining paydo bo‘lishi vakuumda portsiyalab bug‘latish usuli bilan bir oz boshqacha tuzilishga ega yuqori

taqiqlangan zona kengliklari 1.46 eV va 2.18 eV ni tashkil qilishini va ularning ikkinchisi $\hbar\omega_M=2.02 \text{ eV}$ qiymatiga juda yaqin ekanligini e'tiborga olsak yuqoridagi xulosalar tasdiqlanadi.

Fotovoltaik effektini o'rganishda fototok va fotokuchlanishning haroratga bog'liqligi muhim xususiyatlar hisoblanadi. Dastlabki va deformatsiyalangan CdTe va CdSe yupqa qatlamlarida fotokuchlanish va qisqa tutashuv fototokning haroratga bog'liqligi eksperimental qayd etilgan. 5-rasmda mexanik deformatsiya qo'yilmagan va mavjud bo'lgan hollardagi fotokuchlanish U_{AFN} ning haroratga

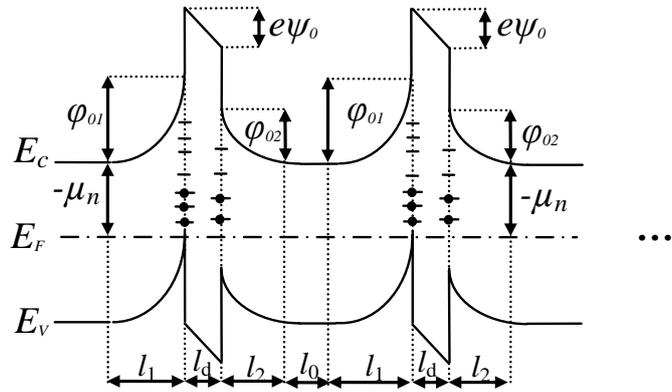


5-rasm. Mexanik deformatsiya paytida CdTe (a) va CdSe (b) yupqa qatlamlar fotokuchlanishining haroratga bog'lanishi: $\epsilon=0$ (o), $2,0 \cdot 10^{-3}$ nis.b. (Δ --cho'zilish), va $-2,0 \cdot 10^{-3}$ nis.b. (x-siqilish). $L=2 \cdot 10^4 \text{ lk}$. bog'liqligi ko'rsatilgan.

Rasmdan ko'rinadiki, haroratning pasayishi bilan deformatsiyasiz CdTe yupqa qatlamda hosil bo'lgan fotokuchlanish dastlab $T=100 \text{ }^\circ\text{C}$ da $2 \cdot 10^3 \text{ V}$ qiymatdan $T=-50 \text{ }^\circ\text{C}$ da $7 \cdot 10^3 \text{ V}$ gacha deyarli chiziqli ravishda ortadi. $T=-160 \text{ }^\circ\text{C}$ da maksimal $\sim 15 \text{ kV}$ gacha superchiziqli ortadi va keyin keskin pasayadi (a). CdSe yupqa qatlam uchun (5-rasm, b) birinchi navbatda $T=100 \text{ }^\circ\text{C}$ da $3 \cdot 10^3 \text{ V}$ qiymatdan $T=40 \text{ }^\circ\text{C}$ da $6 \cdot 10^3 \text{ V}$ gacha silliq subchiziqli o'sish kuzatiladi, $T=-\sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$ larda to'yinish sodir bo'ladi, shundan so'ng $T=-100 \text{ }^\circ\text{C}$ da $7.5 \cdot 10^3 \text{ V}$ qiymatlargacha superchiziqli takroran o'sish-to'yinish va keyin keskin pasayish kuzatiladi. $U_{AFN}(T)$ ning haroratga bog'liqligining bunday xususiyatlari fotokuchlanish hosil bo'lishiga turli xil mikrostrukturalar, ko'chirilish mexanizmlari va sochilish sohalari sezilarli darajada ta'sir qilishini ko'rsatadi. CdTe yupqa qatlami uchun $T \geq -50 \text{ }^\circ\text{C}$ da kristall donlarining kvazineytral sohasida zaryad tashuvchilarning ko'chirilishi, $T < -50 \text{ }^\circ\text{C}$ da esa sirtga yaqin hajmiy zaryadlar sohasining ta'siri va sirt holatlarining qayta zaryadlanishi ustunlik qiladi deb hisoblash mumkin. Shunisi alohida e'tiborliki, CdSe yupqa qatlamlari uchun uchta xarakterli harorat oraliqlari mavjud: $T \geq 40 \text{ }^\circ\text{C}$, $T=(40 \div -40) \text{ }^\circ\text{C}$, $T < -40 \text{ }^\circ\text{C}$. Deformatsiya ta'sirida har ikkala yupqa qatlamning temperatura xarakteristikasi $U_{AFN}(T)$ sifat jihatidan deyarli o'zgarmaydi, faqat cho'zilishda ordinata bo'ylab

yuqoriga, siqilishda esa pastga siljiydi va ϵ ga nisbatan simmetrik bo‘ladi. Demak mexanik deformatsiya anomal fotokuchlanish tabiati va mexanizmini buzmaydi. Eng muhimi, fotovoltaiik namunalar haroratning pasayishi bilan mexanik deformatsiyaga nisbatan sezgirroq bo‘lib qoladi. Bu mikropotensial to‘siqlarning balandligi va kengligining o‘zgarishi, shuningdek nuqsonlarning zaryadlanish holatlari tufayli zaryad tashuvchilarning samarali konsentratsiyasi va harakatchanligining pasayishi tufayli past haroratlarda plyonkalar qarshiligining ortishi bilan izohlanishi mumkin.

Anomal fotokuchlanish U_{AFN} ni nazariy hisoblash uchun fotovoltaiik plyonkaning yarimo‘tkazgich (Y) - dielektrik (D)- yarim o‘tkazgich (Y) ketma-ket ulangan qatlamlar davriy chiziqli zanjiri sifatidagi modeli ko‘rib chiqiladi (6-rasm). Dielektrik qatlam (DQ) tuzoqsiz, uning qarama-qarshi sirtlarida har xil konsentratsiyali bir qator tez sirt energetik holatlari mavjud deb hisoblanadi. Strukturaviy element YDY ning xususiyatlaridagi bunday assimetriya kristall donlar o‘shining assimetrik geometriyasini aks ettiruvchi sirtoldi potensial to‘siqlarining assimetriyasini keltirib chiqaradi. D -qatlamning turli tomonlaridagi sirtlar va potensial to‘siqlar elektr xossalari bo‘yicha bir-biridan farq qilganligi sababli YDY -strukturaviy element hosil qiladigan



6-rasm. Termodinamik muvozonatdagi davriy kristall donlar chiziqli zanjiri uchun kristallitlar chegarasidagi g‘ovaklikka (D -qatlam) tutashgan assimetrik potensial to‘siqli zonaviy diagramma.

$$U_{FO}^{(1)} = U_{FO,1}^{(1)} - U_{FO,2}^{(1)} + U_{FO}^s \quad (2)$$

sirt foto-kuchlanishlarining algebraik yig‘indisi nolga teng bo‘lmaydi va fotovoltaiik yupqa qatlamning bitta konstruktiv elementi YDY tomonidan yaratilishi mumkin bo‘lgan elementar fotokuchlanishlarning asosiy hissasini tashkil etadi. U holda aniqki,

$$U_{AFN} = (N-1)U_{FO}^{(1)}. \quad (3)$$

Bu erda N - yupqa qatlam bo‘ylab davriy ravishda joylashgan kristall donlar soni. So‘ngra dissertatsiyada bitta diskret sirt energetik sathi asosan valent zonasi bilan zaryad tashuvchilar almashtirganda, zonaning inversion egilish chegaraviy holatidagi hisoblash natijalari keltirilgan:

$$U_{FO,1}^{(1)} - U_{FO,2}^{(1)} = \frac{kT}{e} \alpha \eta L \times \left[\frac{p_{01}^{-1} \cdot L_1 / L}{v_{01} + v_{s1} \exp \frac{\psi_{s1}}{kT}} - \frac{p_{02}^{-1} \cdot L_2 / L}{v_{02} + v_{s2} \exp \frac{\psi_{s2}}{kT}} \right], \quad (4)$$

$$U_{FO}^s = \frac{e \delta_{\text{ef}} p_t^0}{\epsilon_0} \cdot \alpha \eta L \left[\frac{N_{t1} p_{01}^{-1} \cdot L_1 / L}{\left(v_{01} + v_{s1} e^{\frac{\psi_{s1}}{kT}} \right) \left(p_{01} + p_t^0 e^{\frac{\psi_{s1}}{kT}} \right)} - \frac{N_{t2} p_{02}^{-1} \cdot L_2 / L}{\left(v_{02} + v_{s2} e^{\frac{\psi_{s2}}{kT}} \right) \left(p_{02} + p_t^0 e^{\frac{\psi_{s2}}{kT}} \right)} \right]. \quad (5)$$

Bu erda α , η va L - yutilish koeffitsienti, tushayotgan yorug‘likning kvant chiqishi va intensivligi, L_1 va L_2 - D-qatlamning chap va o‘ng tomonidan o‘tadigan nurlanish intensivligi, N_{t1} va N_{t2} - yoritilmagan paytda t- tuzoqlar konsentratsiyalari va v_{01} , v_{02} va v_{s1} , v_{s2} - hajmiy va sirt rekombinatsiya tezliklari, ψ_{s1} va ψ_{s2} - yoritilgan paytda D-qatlamning har ikki tomonidagi sirtlarda zonaning egilish qiymatlari, δ_{ef} - D-qatlamning effektiv kengligi, ϵ_0 - dielektrik o‘tkazuvchanlik, p_t^0 - Fermi sathi t - tuzoq sathiga to‘g‘ri kelganda teshiklar konsentratsiyasi, e -elektron zaryadi, k -Boltsman doimiysi, T -absolyut temperatura.

Yorug‘lik intensivligining $\psi_{s1}^* - \psi_{s1} < kT$ shartni qanoatlantiruvchi past qiymatlarida quyidagi natija olingan:

$$U_{FO}^{(1)} = \frac{kT}{e} \alpha \eta L \times \left[\frac{p_{01}^{-1} \cdot L_1 / L}{v_{01} + v_{s1} e^{\frac{\psi_{s1}}{kT}}} \left(1 + \frac{N_{t1} \cdot \delta_{\text{ef}} / L_t^2}{p_{01} + p_t^0 e^{\frac{\psi_{s1}}{kT}}} \right) - \frac{p_{02}^{-1} \cdot L_2 / L}{v_{02} + v_{s2} e^{\frac{\psi_{s2}}{kT}}} \left(1 + \frac{N_{t2} \cdot \delta_{\text{ef}} / L_t^2}{p_{02} + p_t^0 e^{\frac{\psi_{s2}}{kT}}} \right) \right], \quad (6)$$

Bu erda $L_t^2 = \epsilon_0 kT / e^2 p_t^0$. (6) dan ko‘rinnadiki, AFK effekti, ya’ni polikristall fotovoltaiik yupqa pardalarda U_{AFN} ni hosil bo‘lishi qo‘shni kristall donlarning hajmiy (n_0 , p_0 , v_0) va sirti (ψ_s , v_s) elektron xususiyatlarining farqi tufayli yuzaga keladi, bu esa molekular dastalarining taglikka normal tushadgan texnologiyada yuzaga kelmaydi. yetarlicha kichik yoritilganliklarda U_{AFN} yorug‘likning yutilish α koeffitsienti, kvant chiqishi η va intensivligi L larga proporsionaldir.

Hozirgacha AFK effekti bo‘yicha ma’lum bo‘lgan nazariy ishlarda, past yoritilganlik qiymatlarida lyuks-volt xarakteristika $U_{AFN}(L)$ subchiziqli ekanligi ta’kidlangan. Biroq ulardan farqli o‘laroq bu erda ishlab chiqilgan nazariya natijalariga ko‘ra ushbu holatda U_{AFN} qo‘zg‘atuvchi yorug‘likning intensivligi L ga chiziqli ravishda bog‘liq. Haqiqatan, (6) formuladan ko‘rinib turibdiki, agar past yorug‘lik intensivligida v_{0i} va v_{si} miqdorlar, qavs ichidagi ayirma ifoda L ga bog‘liq emas deb hisoblasak, unda chiziqli bog‘lanish $U_{AFN} \sim L$ kelib chiqadi (7-rasmda a-sohaga qarang). **"CdTe:Sn va CdSe_xS_{1-x} yupqa qatlamli strukturalarning fotoelektrik xossalari mexanik deformatsiyaning ta’siri"** nomli uchinchi bobda kirishmali burchak ostida o‘stirilgan polikristalli CdTe:Sn yupqa ($d \leq 1$ mkm) qatlamdagi fotovoltaiik effektini, shuningdek, ularning

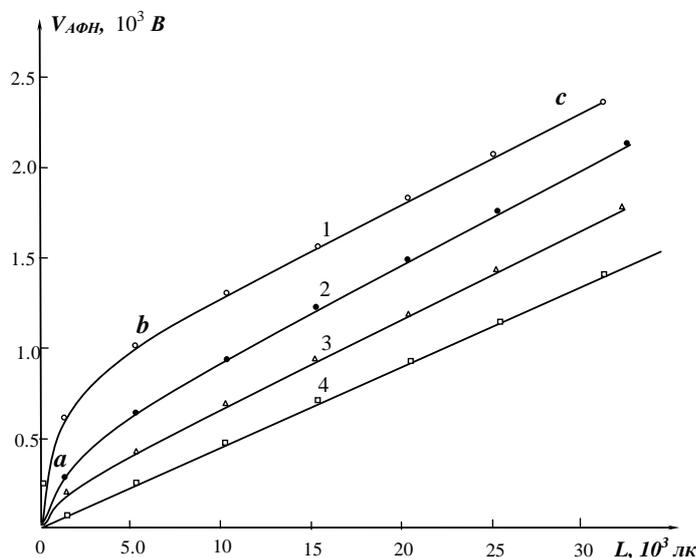
elektrofizik va fotoelektrik xususiyatlariga mexanik deformatsiyaning ta'sirini qalay kirishma miqdori va texnologik parametrlarga bog'liq ravishda o'rganish natijalari keltirilgan.

$T \approx 550 \text{ K}$ ga qadar qizdirilgan slyuda tagligida kukunli CdSe va CdS aralashmasini kvazimuvozanat sharoitida termal vakuumda bug'lantirish natijasida olingan etarlicha yuqori fotoo'tkazuvchanlikka ega ($d \approx 4.0-5.0 \text{ mkm}$) polikristal plyonkalarining foto-tenzoelektrik xossalari ko'rib chiqildi. Lukovskiy usulida $\text{CdSe}_{0.8}\text{S}_{0.2}$ plyonkalar fotoo'tkazuvchanligining spektral taqsimotini o'rganish orqali kirishmali fotoo'tkazuvchanlikni

aniqlaydigan lokal sathlarning faollashuv energiyalari aniqlandi. Namunalarni cho'g'lanma lampa bilan yoritganda, deformatsiya sezuvchanligi pasayadi va zaryad tashuvchilarning harakatchanligi haroratga zaif bog'liqligi ko'rsatilgan, bu mikropotensial to'siqlar xususiyatlarining pasayishi va kristallitlar hajmida chuqur sathlarning qayta zaryadlanishi bilan izohlanadi. yorug'lik ta'sirida don chegaralari. $\text{CdSe}_{0.8}\text{CdS}_{0.2}$ qattiq eritmasidan tayyorlangan yupqa qatlamlarning qorong'ida tenzosezgirliги ancha yuqori $K \approx 10^2-10^3$ nis.b. bo'lib, yorug'lik ta'sirida kamayadi va yuqori ($L \geq 10^4 \text{ lk}$) intensivliklarda amalda yo'qolib ketadi, bu uning namunalar kuchli fotoo'tkazuvchanligi ostida bostirilishi bilan izohlanadi.

Ma'lum texnologiyalardan farqli o'laroq, biz CdTe va Sn larni alohida bug'latish orqali oldindan qizdirilmagan tagliklarda qalay bilan legirlangan kadmiy telluridning fotovoltaik plyonkalarini olishning yangi usulini ishlab chiqdik. Dastlabki material sifatida stexiometrik tarkibli polikristalli kadmiy tellurid, kadmiy va tellurning kukun holdidagi sof komponentlari va kukunli qalay olindi. Yupqa qatlamlar shisha qalpoq ostidagi vakuum kamerasida oddiy yoki organik shisha taglikka o'tqazildi, uning ichida bug'latgich sifatida tantal qayiqcha (tigel)lar joylashtirilgan edi. Taglik bug'latgichdan 5-7 sm masofada molekular dastasi yo'nalishiga nisbatan $30-50^\circ$ burchak ostida joylashtirildi.

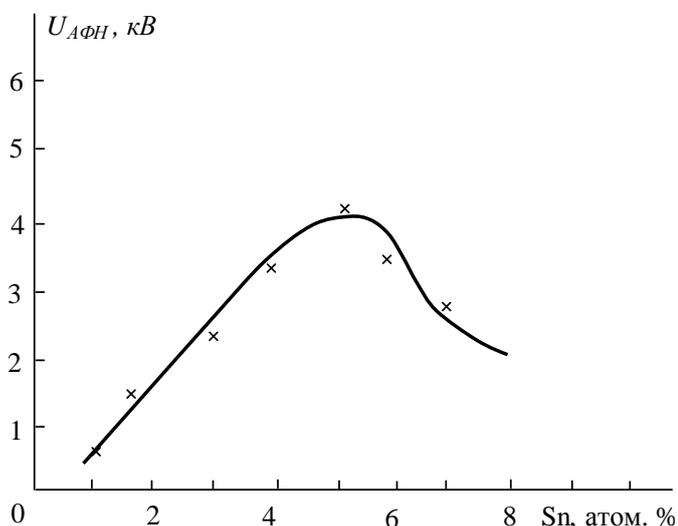
Yupqa burchak ostida o'tqizilgan CdTe qatlamlarini legirlash jarayoni to'g'ridan-to'g'ri ularning $10^{-4} \div 10^{-5} \text{ mm.sm.ust.}$ vakuumda o'sishi paytida CdTe va Sn ni alohida tigellardan bug'latish orqali amalga oshirildi. Bug'latiladigan aralashmaning optimal boshlang'ich massasi CdTe massasiga nisbatan 3-5 atom. % ni tashkil etdi. Sn ning bug'lanishi CdTe bug'lanishidan 2-3 daqiqaga kechiktirildi



7-rasm. Fotovoltaik yupqa qatlamlarning xona haroratidagi ($T=300 \text{ K}$) lyuks-volt xarakteristikalari: 1-CdTe, 2-CdSe, 3-CdS, 4-CdTe:Ag.

va 3-5 daqiqa oldinroq to'xtatildi. Omik kontaktlarni olish texnologiyasi va U_{AFK} ni o'lchash texnikasi ma'lum ishlardagi usullardan farq qilmadi. Qalinligi $d \approx 0.8 - 1.0$ mkm va yuzasi 5×20 mm² bo'lgan yangi tayyorlangan CdTe:Sn namunalari (kondensatsiya tezligi 0.5-1.0 nm/s oralig'ida o'zgargan) yuqori qarshilikka ega bo'lib chiqdi va CdTe:In plenkasidan farqli o'laroq, qo'shimcha termik ishlov berish talab qilmadi.

8-rasmda CdTe:Sn yupqa pardasi tomonidan hosil qilingan maksimal fotokuchlanishning qalay kirishmasi miqdoriga tipik bog'lanishi keltirilgan. Rasmdan ko'rinadiki, Sn miqdorining noldan 5 atom% gacha ko'tarilganda fotokuchlanishning maksimal qiymati dastlab deyarli chiziqli ravishda ~400 V dan 4200 V gacha oshadi, keyin esa to'yinish sodir bo'ladi va Sn qo'shimchasi 8 atom % gacha ortganda nochiziqli ravishda 2000 V gacha pasayadi. Quyida biz tadqiqot natijalarni faqat 5 atom.% Sn qo'shilgan namunalari uchun taqdim etamiz.



8-rasm. CdTe:Sn fotovoltaik yupqa qatlam tomonidan hosil qilingan fotokuchlanishning maksimal qiymatiga qalay kirishmasi miqdorining ta'siri. T=300 K

CdTe:Sn yupqa pardalarining fotovoltaik parametrlari II bobda o'rganilgan yupqa pardalarnikidan yomon emas: xona haroratida $U_{AFK} = 3000$ V/sm va suyuq azot haroratida $U_{AFK} = 1.3 \cdot 10^4$ V/sm. Stoxiometrik CdTe plyonkasining qorong'idagi qarshiligi $10^{10} - 10^{11}$ Om ga teng bo'lsa, 5 atom % qalay qo'shilgan CdTe:Sn plyonkasi uchun $10^{12} - 10^{13}$ Om ni tashkil etdi, bu deyarli ikki tartibda kattaroqdir (1-jadvalga qarang). Tabiiyki, bu hol yangi texnologiyada olingan polikristall CdTe:Sn yupqa pardasining mikrokrystallitlari hajmida ham, yuzasida ham donor va akseptor kirishma markazlarining o'ta kuchli kompensatsiyasi bilan vujudga kelganligi bilan izohlanadi. 1-jadvaldagi ma'lumotlarni tahlil qilib, CdTe ni In kirishmasi bilan faqat optimal termik ishlov (TI) berish orqali, CdTe:Sn plyonkasini TI siz optimal legirlab maksimal $U_{AFN} = (2-3) \cdot 10^3$ V/sm va $I_{qt}^{\phi} \approx 10^{-9}$ A qiymatlarga erishiladi degan xulosaga kelishimiz mumkinki.

1-Jadval.

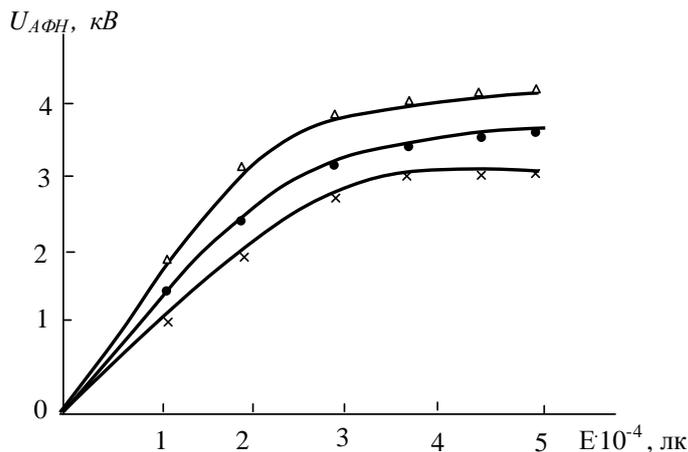
CdTe, CdTe:In, CdTe:Sn CdTe yupqa qatlamlarining parametrlari

№ t/r	Yupqa qatlamlarning elektrofizik parametrlari	toza CdTe	legirlangan CdTe:In		CdTe:Sn, toblanmagan
			Toblanishdan oldin	Toblanishdan keyin	
1.	Qorong'u qarshilik, R_{qor} , Om	$(1.0 \pm 0.05)10^{11}$	$(2.0 \pm 0.05)10^{10}$	$(5.0 \pm 0.05)10^{11}$	$(5.0 \pm 0.05)10^{12}$
2.	Yoritilgan qarshilik, R_{yo} ,	$(2.0 \pm 0.05)10^{10}$	$(3.0 \pm 0.05)10^9$	$(2.0 \pm 0.05)10^{11}$	$(2.0 \pm 0.05)10^{11}$

	<i>Om</i>				
3.	Qisqa tutashuv toki, I_{qt}, A	$(1.0 \pm 0.03)10^{-10}$	$(2.0 \pm 0.03)10^{-8}$	$(1.0 \pm 0.03)10^{-9}$	$(1.0 \pm 0.03)10^{-9}$
4.	Maksimal fotokuchlanish qiymati, U_{AFN}, V	$(4.0 \pm 0.5)10^2$	$(0.6 \pm 0.1) 10^2$	$(2.0 \pm 0.1)10^3$	$(3.0 \pm 0.5)10^3$

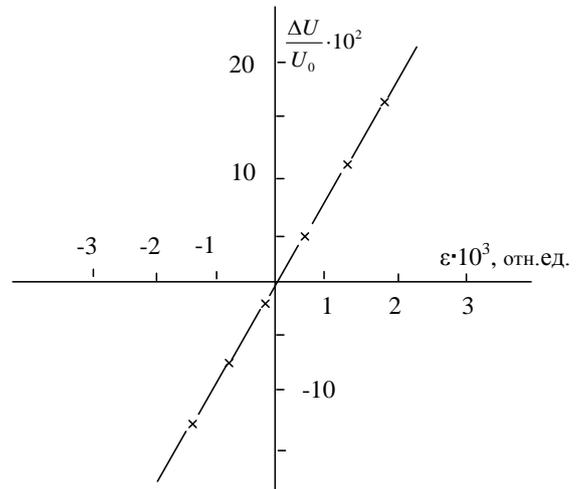
9-rasmda CdTe:Sn fotovoltaik yupqa pardalarning $L = 3.5 \cdot 10^4 \mu\text{K}$ yorug'lik ostidagi tipik deformatsiya xarakteristikasi $\Delta U_{AFN}(\epsilon)/U_{AFN}$ ko'rsatilgan, bu qat'iy chiziqli. Fotokuchlanish uchun tenzosezgirlik koeffitsienti bir tomonlama cho'zilish va siqilish deformatsiyalari uchun $K = (0,7-1,0) \cdot 10^2 \text{ n.b.}$ tartibidagi bir xil qiymatga ega. K qiymatning deformatsiya yo'nalishi inversiyasiga nisbatan o'zgarishligi plyonkalaridagi mumkin bo'lgan ichki mexanik kuchlanish ularning fotovoltaik xususiyatlariga ta'sir qilmasligini anglatadi.

10-rasmdan ko'rinadiki, xona temperaturasidagi CdTe:Sn yupqa pardalarining 0 dan $5 \cdot 10^4 \text{ lk}$ gacha yorug'lik intensivligi oralig'ida olingan lyuks-volt xarakteristika-lari turli xil qiyalik burchaklariga ega bo'lgan ikkita xarakterli sohadan iborat. Birinchi chiziqli soha yorug'likka qarab fotokuchlanishning tez o'sishiga to'g'ri keladi. Ikkinchi chiziqli bo'lmagan qismida intensivlik bilan sekinroq o'sish va to'yin-ganlikka



10-rasm. Qalay aralashmalari 5 atom % li kadmiy tellurid plyonkalarining lyuks-volt xarakteristikasiga deforma-tsiyaning ta'siri: $\epsilon = 2 \cdot 10^{-3} \text{ n.b.}$, Δ - cho'zilish, x - siqilish, \bullet - $\epsilon = 0$.

balandligidagi o'zgarishlar $U_{AFN}(L)$ bog'lanishga qanday ta'sir qilishini ko'rsatadi.



9-rasm. Qalay kirishmasi 5 atom % bo'lgan fotovoltaik CdTe:Sn plyon-kaning deformatsiya xarakteristikasi. $L = 3.5 \cdot 10^4 \text{ lk}$ va $T = 300 \text{ K}$.

chiqish kuzatiladi. Fotokuchlanishning yorug'likka bog'lanish xakteri va miqdoran yupqa pardalarning orqa va old tomonidan yoritilishda o'zgarmadi. Foto-voltaik sezgirlik $T = 300 \text{ K}$ temperaturada va

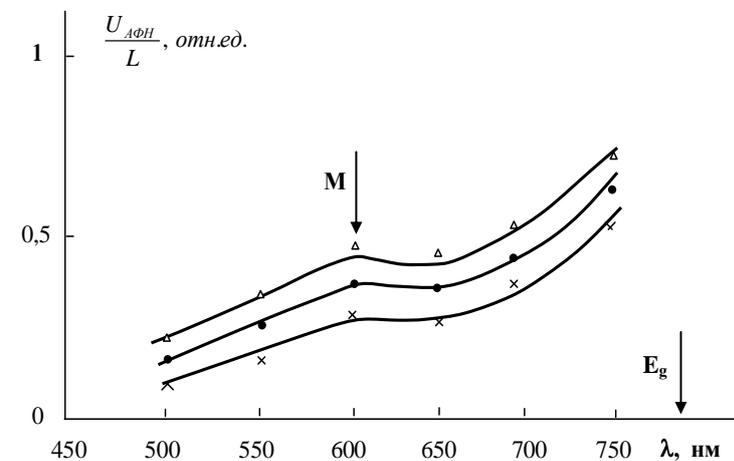
$L = 10^{-5} \frac{Vt}{\text{sm}^2}$ intensivlikda $2 \cdot 10^7 \frac{Vt / \text{sm}}{Vt / \text{sm}^2}$ qiymatga ega bo'ldi. Rasmda fotokuchlanishning qiymati siqilish deformatsiyasi bilan qanday kamayishi va cho'zilishda ortishi aniq ko'rsatilgan, bu oxir-oqibatda plyonka deformatsiyasi paytida mikropotensial to'siqlar

balandligidagi o'zgarishlar $U_{AFN}(L)$ bog'lanishga qanday ta'sir qilishini ko'rsatadi.

11-rasmda qalay kirishmasi miqdori 5 atom % bo'lgan CdTe:Sn yupqa pardalari uchun $\hbar\omega > E_g$ qisqa to'liq uzunlik sohasida $U_{AFN}(\lambda)$ spektrlarining fragmentlari deformatsiya yo'q holatda (\bullet nuqtali chiziq) hamda bir tomonlama cho'zilish (Δ - uchburchaklar bilan) va siqilish (\times – krestiklar bilan) uchun keltirilgan. Ko'rinib turibdiki, barcha spektrlar bir xil xarakterli sohalar va spektrning $\lambda \approx 600$ nm ($h\nu \approx 2.07$ eV) to'liq uzunli-gidagi M burilish nuqtasiga ega bo'lgan deyarli parallel chiziqlardir (4-rasmga taqqoslang).

Yutilish $\alpha(\omega)$ spektrining shunga o'xshash bog'lanishi kristall kadmiy xalkogenidlarining an'anaviy geteroo'tishlariga xosdir. Shu sababli M nuqtaning holati taqiqlangan zona E_g chegarasiga nisbatan spektrning qisqa to'liq uzunliklari sohasiga siljiganligiga e'tibor qaratish zarur. Bu shuni anglatadiki, o'rganilayotgan fotovoltaiik plyonkalarini tashkil etuvchi mikrofotoelementlar CdTe-CdO-CdTe-..... ($E_{g,CdTe} = 1.60$ eB, $E_{g,CdO} = 2.18$ eB). ko'rinishidagi mikro geteroo'tishlar zanjirini ifodalashi mumkin.

Rasmdan yana shuni ham ta'kidlash qiziqki, spektrning M nuqtaga nisbatan qisqa to'liqni sohasining $U_{AFK}(\lambda)$ hosil bo'lishiga qo'shgan hissasi uzun to'liqni sohasining hissasi qaraganda sezilarli darajada kichikroqdir. Bu esa CdTe-CdO mikro-geteroo'tish interfeysining har ikki tomonidagi potensial to'siq sohalar assimetriyasining namoyon bo'lishidir: CdO sohasining chiziqli o'lchami CdTe



11-rasm. CdTe:Sn plyonkalarining $h\nu > E_g$ chastota diapazonida fotokuchlanish spektriga deformatsiyaning ta'siri, masalan. \bullet -deformatsiyasiz, \times -siqilish ($\epsilon = -2 \cdot 10^{-3}$ n.b.), Δ -cho'zilish ($\epsilon = 2 \cdot 10^{-3}$

o'lchamidan ancha kichikdir. M nuqtaning spektral joylashuvi deformatsiya va nuqtaviy nuqsonlar konsentratsiyasiga deyarli bog'liq emas. Bu CdTe-CdO chegaraviy qatlam silliq-varizonli mikro-geteroo'tish ekanligi bilan izohlanadi. Tadqiqotning keyingi natijalari yana shuni ko'rsatdiki, CdTe:Sn plyonkalarining tenzosezgirliги spektrning xususiy yutilish chegarasi yaqinida maksimumga erishadi. Spektral va optik xarakteristikalar o'rtasida yaxshi korrelyatsiya kuzatiladi.

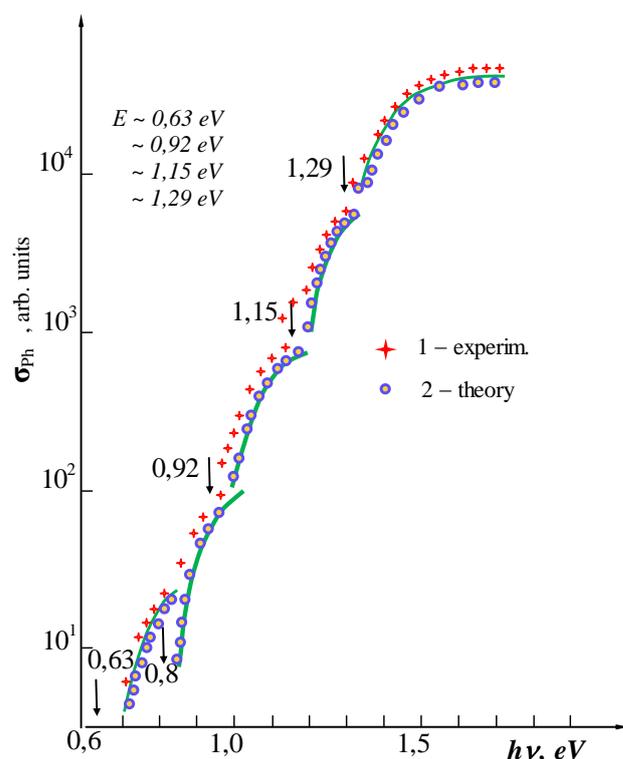
Hozirgacha biz burchak ostida o'tqizilgan polikristal yupqa pardalarning foto-tenzoelektrik xususiyatlarini ko'rib chiqdik, bu erda chegaralararo potensial to'siqlarning assimetriyasi bilan bir qatorda, plyonka qalinligi etarlicha yupqa $d \leq 1 \mu\text{m}$ bo'lishi ham talab qilingan. Ma'lumki, qalinlik ortishi bilan ($d \geq 5 \mu\text{m}$) bunday plyonkalarining AFK xususiyatlari deyarli yo'qoladi va ular katta hajmiy materiallar kabi sezilarli elektr o'tkazuvchanligiga ega bo'lib qoladi. Qalin yarimo'tkazgich yupqa pardalardagi tenzorezistiv effektlar juda yaxshi o'rganilgan.

Biroq, ulardagi mexanik deformatsiyaning ta'siri ostida bir vaqtda sodir bo'ladigan fotoelektrik hodisalar hali deyarli o'rganilmagan.

Qattiq qorishmali $CdSe_xS_{1-x}$ yupqa pardalarini olish uchun mexanik forvakuum nasosi va bug'-moy diffuziya nasosi asosida vakuum bloki yig'ildi, u $\sim 10^{-2}$ Pa tartibidagi bosimni ta'minladi. Bug'lantiruvchi qayiqcha sifatida alyuminiy oksidli tigellardan foydalanildi. Yarimo'tkazgichning bug'lanish harorati 750-800 °C oralig'ida tigel konstruksiyasi va tok kuchini o'zgartirish bilan erishildi. Shisha yoki slyuda taglik qaynab turgan 0,5% konsentratsiyali nitrat kislota eritmasida ishlov berish orqali tozalandi, keyin atsetonda yog'sizlantirildi va distillangan suvda qayta-qayta qaynatildi. Qalpoq ostida $\sim 10^{-2}$ Pa vakuumga erishilgandan so'ng, tagliklar 30 daqiqa davomida 300°C haroratda isitish orqali gazsizlantirildi. Boshlang'ich material sifatida "yarim o'tkazgichlar uchun" belgisi bo'lgan kukunli CdSe va CdS ishlatildi. $CdSe_xS_{1-x}$ yupqa pardalari CdSe va CdS aralashmasini turli nisbatlarda bug'latish orqali olingan. Qattiq eritmaning tarkibini va bug'langan materialning dastlabki oqimini saqlab qolish uchun qattiq eritma bug'lanishdan oldin 20-25 daqiqa davomida bug'lanish rejimida qizdirildi. Biz keng qalinlikdagi (5-20 mkm) qatlamlarni yuqori taglik haroratida ($\sim 400^\circ C$) olishga muvaffaq bo'ldik. Quyida biz $CdSe_{0.8}S_{0.2}$ yupqa pardalarining foto-tenzoelektrik xususiyatlarini ko'rib chiqamiz, ular kondensatsiya tezligi, taglik harorati va qizdirish vaqtlarining keng diapazonida osongina boshqariladi.

Taglik harorati $T_p = 723$ K va fotosezgirlik koeffitsienti

$S = \sigma_{fo} / \sigma_{qor} \approx 10^2$ bo'lgan yangi tayyorlangan plyonkalar uchun 300 K haroratda o'lgangan fotoo'tkazuvchanlikning $\sigma_{fo}(h\nu)$ spektral chiziqlari¹ (krestiklar) 12-rasmda ko'rsatilgan. Eksperimental natijalar Lukovskiy



12-rasm. Yangi tayyorlangan $CdSe_{0.8}S_{0.2}$ yupqa qatlamning fotoo'tkazuvchanlik spektri. Vertikal strelkalar nazariy egri chiziqlarni hisoblashda ishlatiladigan chuqur markazning optik ionlanish energiyasini ko'rsatadi.

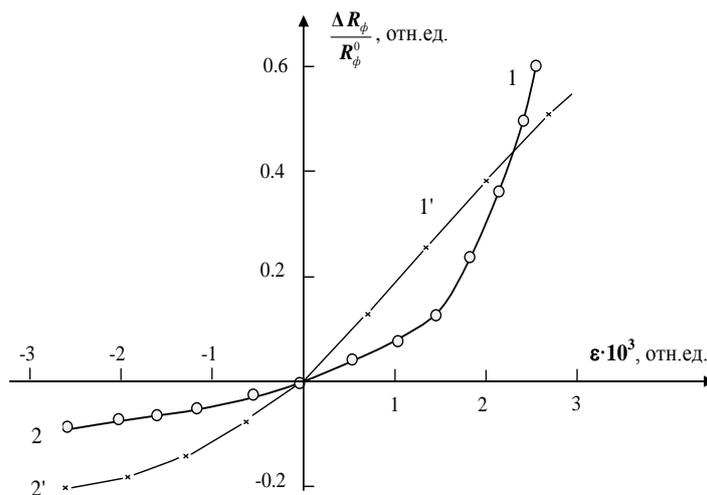
$$\sigma_{ion} = \frac{16\pi e^2 \hbar m^*}{3cn} \left(\frac{E_{eff}}{E_0} \right)^2 E_{opt}^{-\frac{1}{2}} (h\nu - E_{opt})^{\frac{3}{2}} (h\nu)^{-3}, \quad (7)$$

¹ Fotoo'tkazuvchanlikning eksperimental spektri $\sigma_{fo}(h\nu)$ V. Kapsukas nomidagi Vilnyus universitetida olingan.

formulasi yordamida hisoblangan nazariy egri chiziqlar bilan taqqoslandi.

Bu erda E_{eff}/E_0 - kristall maydon koeffitsienti, m^* - markazda bog'langan elektronning effektiv massasi, n - moddaning sindirish ko'rsatkichi, σ_{ion} va E_{opt} - markazning effektiv kesimi va optik ionlanish energiyasi. Bu holda, yorug'likning ma'lum chastotasi uchun kirishmaviy fotoo'tkazuvchanlik σ_{fp} ko'rilayotgan kirishmaviy markazning fotoionlash σ_{ion} kesimiga mutanosib bo'ladi, deb taxmin qilinadi. Eksperimental va nazariy spektrlarning grafik tahlili quyidagicha faollashuv energiyalariga ega chuqur sathlar mavjudligini aniqladi: $E_{v+}(0,63\pm 0,02)$, $E_{v+}(0,8\pm 0,02)$, $E_{v+}(0,92\pm 0,02)$, $E_{c-}(0,55\pm 0,02)$ va $E_{c-}(0,41\pm 0,02)$ eV. Havoda $CdCl_2$ ishtirokida qisqa ~ 4 min muddatli qizdirish natijasida fotosezgirlik darajasi $S \approx 10^4$ qiymatga etadi va fotoo'tkazuvchanlik spektrida yaqqol qo'shimcha $E_{c-}(0,24\pm 0,02)$ eV yoki $E_{v+}(1,46\pm 0,02)$ eV o'tkazuvchanlik zonasining pastki qismida joylashgan sath namoyon bo'ladi. Bu holda dissotsilangan mis va xlor atomlari yupqa qatlam kristallitlarining hajmiga va interfeys sohalariga diffuziyalanib kirib boradi. Misning kovalent radiusi kadmiy radiusidan kichik bo'lganligi sababli, mis atomi panjara tugunidagi kadmiy atomini almashtiradi. Xlor atomlari bu jarayonni tezlashtiradi, chunki kadmiy bilan reaksiyaga kirishib, ular kadmiy vakansiyalari konsentratsiyasining oshishiga olib keladi va mis atomlari bu bo'shliqni osonroq egallaydi. Bunday jrayon $E_v + (0,66\pm 0,02)$ eV kompensatsiyalovchi akseptor sathning hosil bo'lishiga va uning konsentratsiyasini oshishiga olib keladi, bu esa o'z navbatida fotosezgirlikning oshishiga sabab bo'ladi.

Mexanik deformatsiyalarning fotosezgir namunalar xususiyatlariga eng sezilarli ta'siri toblash harorati $T_m \geq 750K$ ga teng $CdSe_{0.8}S_{0.2}$ qattiq eritmasidan olingan yupqa qatlamlar uchun kuzatilgan. Shuning uchun, ikki bosqichli termik ishlov berish natijasida hosil bo'lgan va galogenidlarning gaz muhitida faollashtirilgan $CdSe_{0.8}S_{0.2}$ yupqa qatlamlariga $\varepsilon = -3 \cdot 10^{-3}$ dan $\varepsilon = +3 \cdot 10^{-3}$ n.b. oralig'ida cho'zilish va siqilish deformatsiyalari bilan bir vaqtda $L=0-10^3$ lk intensivlikdagi cho'g'lanma lampaning tabiiy yorug'ligi ta'sir ettirildi. Ma'lum bo'lishicha, $L \geq 10^4$ lk yoritilishlarda plyonka tenzosezgirliги deyarli yo'qolib ketadi.

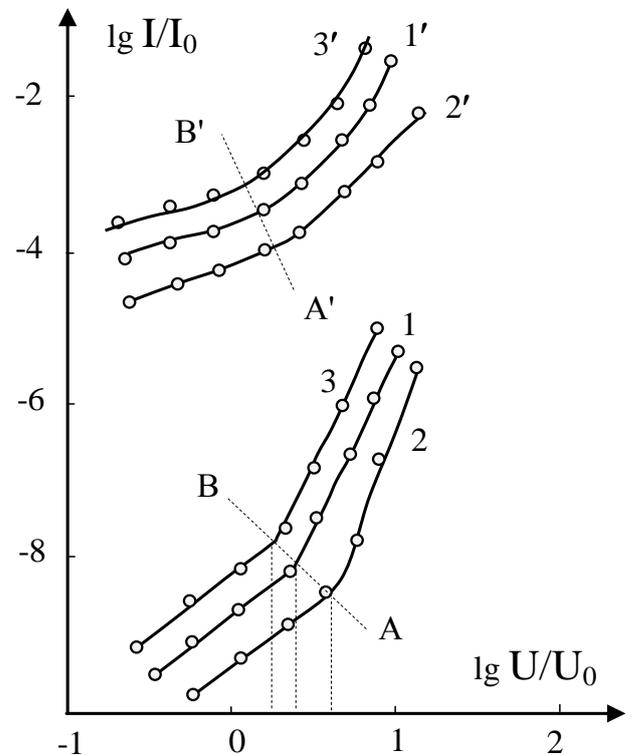


13-rasm. $CdSe_{0.8}S_{0.2}$ yupqa qatlamning deformatsiya xarakteristikasi. 1', 2' - $L=0$; 1, 2 - $L \approx 10^2$ lk. $T=300$

13-rasmda $CdSe_{0.8}S_{0.2}$ yupqa pardaning $L=0$ (1', 2') va $L \approx 10^2$ lk (1, 2) larda deformatsiya xarakteristikalari keltirilgan. Ko'rinib turibdiki, qorong'uda ham, yorug'lik ostida ham yupqa

qatlarning tenzosezgirliги siqilish deformatsiyasiga ($K < 100$) nisbatan cho‘zilish deformatsiyasida ($K \approx 200$) sezilarli darajada yuqori, buning sababi plyonka-taglik tizimida ichki mexanik kuchlanishlarning mavjud-ligi bilan bog‘liq. Bundan tashqari, siqilishda deforma-tsiya xarakteristikasi har doim subchiziqli va $K_{yo} < K_q$. Cho‘zilgan holatda esa nisbiy deformatsiya-ning kichik $\varepsilon < 10^{-3}$ qiymatlar oralig‘ida chiziqli bog‘lanish kuzatiladi ($K_{yo} < K_q$), so‘ngra $\varepsilon > 1.5 \cdot 10^{-3}$ da superchiziqli bog‘lanishga o‘tadi va hatto $\varepsilon > 2.5 \cdot 10^{-3}$ n.b. da $L \leq 10^2$ lk yoritilganlik uchun tenzosezgirlik ortib ketadi ($K_{yo} > K_q$). Oxirgi holatni $\varepsilon \geq 2.5 \cdot 10^{-3}$ nis.b. cho‘zilish deformatsiyasida nisbatan pastroq $L \leq 10^2$ lk intensivlikdagi yorug‘lik ta’sirida sirt holatlari va chuqur sathlarning qayta zaryadlanishi hisobiga donlararo (dreyf) potentsial to‘siqlar sohasining kuchliroq o‘zgarishi bilan izohlash mumkin

14-rasmdagi VAX chiziqlari (1-3 qorong‘ulikda, 1'-3'-yorug‘likda) ko‘rsatadiki, $CdSe_{0.8}S_{0.2}$ qattiq eritmasidan olingan plyonkalar birinchidan, etarlicha yuqori fotosezgirlikka ega. $L = 2,0 \cdot 10^3$ lk da fototok kuchining nisbiy I_f/I_{tem} o‘zgarishi $\sim 10^4$ ni tashkil etadi. Ikkinchidan, 1'-3' volt-amper bog‘lanishlarning ikki bosqichli xarakteri saqlanib qolsa-da, biroq $U < U_{ot}$ va $U > U_{ot}$ sohalarda yoritilgan plyonkalar orqali tok o‘tish mexanizmlari (1-3 va 1'-3' to‘g‘ri chiziq'larga tik holda o‘tkazilgan AB va A'B' to‘g‘ri chiziqlar qiyaligiga qarang) qorong‘ulikdagi o‘tkazuvchanlikka nisbatan sezilarli darajada o‘zgaradi. Biz 1'-3' egri chiziq'lardan, kuchlanishning $U < U_{ot}$ qiymatlar sohasida VAXlar $I \sim U^{1/2}$ omik qonun bilan tavsiflanmasligini, $U > U_{ot}$ sohada esa ular $\varphi^f(U)$ bog‘lanish tufayli murakkab nochiziqli xarakterga ega ($n \neq const$) ekanligini aniqlaymiz.



14-rasm. Qorong‘ulikda (1, 2, 3) va yorug‘likda (1', 2', 3' $L = 2,0 \cdot 10^3$ lk) $CdSe_{0.8}S_{0.2}$ yupqa qatlamlarning logarifmik masshtabdagi VAX. $\varepsilon = 0$ (1, 1'), bir tomonlama cho‘zilish $\varepsilon = +3 \cdot 10^{-3}$ (2, 2') va siqilish $\varepsilon = -3 \cdot 10^{-3}$ nis.b. (3, 3'). $T = 300$ K.

Qattiq eritmali $CdSe_{0.8}S_{0.2}$ yupqa pardalarning yuqorda qayd qilingan foto-tenzoelektrik xossalarini polikristallar elektr o‘tkazuvchanligining potentsial to‘siqli modeli asosida fenomenologik jihatdan tavsiflandi. Har bir potentsial to‘siqdagi kuchlanish tushuvi U/N ga teng deb hisoblasak (N – tok yo‘nalishi bo‘yicha mikropotentsial to‘siqlar soni), u holda namunaning VAX ni

$$I = I_0 (\exp(eU / NkT) - 1) \exp[-e\varphi / kT] \quad (8)$$

shaklida yozilishi mumkin. Demak, namunaning qarshiligi uchun

$$R = R_0 \exp \left[e \left(\varphi - \frac{U}{N} \right) / kT \right], \quad (9)$$

ifoda hosil bo'ladi. Bu erda R_0 potentsial to'siqsiz massiv-uzluksiz plyonkaning qarshiligi.

Tabiiyki, cho'zilish deformatsiyasi potentsial to'siqlar balandligi va kengligini oshiradi, natijada namuna orqali tok kuchining pasayishi kuzatiladi. L intensivlikdagi yorug'lik ta'sirida deformatsiyalangan namunaning VAX uchun (8) va (9) quyidagi tarzda qayta yozilishi mumkin:

$$I^\varepsilon(L) = I_0^\varepsilon(L) \left(\exp(eU / NkT) - 1 \right) \exp \left[-e\varphi^\varepsilon(L) / kT \right], \quad (10)$$

$$R^\varepsilon(L) = R_0^\varepsilon(L) \exp \left[e \left(\varphi^\varepsilon(L) - \frac{U}{N} \right) / kT \right]. \quad (11)$$

(11) ga asosanib, yorug'lik ostidagi polikristall plyonkalarining tenzosezgirlik koeffitsienti (TSK) uchun umumiy ifodani

$$K(L) = K_\varepsilon(L) + K_0(L) = K_0(L) \exp \left[e \left(\varphi^\varepsilon(L) - \varphi(L) \right) / kT \right], \quad (12)$$

shaklda olish mumkin. Bu erda $R_0(L)$ va $R_0^\varepsilon(L)$ - yoritilgan massiv namunaning mexanik deformatsiyasiz va deformatsiya paytdagi qarshiligi, $K_0(L) = R_0^\varepsilon(L) / R_0(L)\varepsilon$ - uning yorug'lik ostidagi TSK.

(12) dan ko'rinadiki, polikristal plyonkaning TSK har doim massiv namunadagidan kattaroqdir hamda potentsial to'siqlar ($K_\varepsilon(L)$) va sof hajmiy xususiyatlar ($K_0(L)$) bilan bog'liq ikkita hissani o'z ichiga oladi.

Shunday qilib, ushbu dissertatsiya ishida o'rganilgan $CdTe$, CdS , $CdSe$ va $CdTe:Sn$, $CdSe_{0.8}S_{0.2}$ yupqa pardali polikristall strukturalar qorong'uda ancha yuqori $K \approx 2 \cdot 10^2$ n.b. va barqaror tenzosezgirlikka ega. U $CdSe_{0.8}S_{0.2}$ namunalarda sezilarli darajada yorug'lik intensivligiga bog'liq va $L \geq 10^4$ lk larda yuqori fotoo'tkazuvchanlik bilan bostirilishi oqibatida deyarli yo'qolib ketadi. Yuqori spektral fotosezgirlik sohasidagi yorug'lik ta'sirida tenzosezgirlikning bunday o'zgarishi fotovoltaiik va fotoo'tkazuvchan yupqa pardalar asosida gibridd deformatsiyaga sezgir foto-tenzoelektrik qurilmalarni loyihalash imkonini beradi.

XULOSA

$CdTe_xSe_yS_{1-(x+y)}$ ($CdTe$, CdS , $CdSe$ va $CdTe:Sn$, $CdSe_{0.8}S_{0.2}$) plyonkali polikristall strukturalarning olish texnologiyasini ishlab chiqish va foto-tenzoelektrik xossalarni o'rganish natijalari asosida quyidagi asosiy xulosalarni chiqarish mumkin:

1 Qoldiq gaz bosimi $P \approx 10^{-1} - 10^{-2}$ Pa vakuumda 40-50 mg boshlang'ich materialni portsiyaviy bug'lantirish orqali $T_p = 250-350$ K haroratli shisha taglikda chiziqli volt-amper, lyuks-amper, deformatsiyaviy xususiyatlariga ega bo'lgan yupqa ($d \leq 1$ mkm) $CdTe$, CdS va $CdSe$ fotovoltaiik plyonkalar olish texnologiyasi ishlab chiqilgan va u yangi plyonkali foto-tenzoelektrik sezgir qurilmalar ishlab chiqarish imkonini beradi.

2. Deformatsiya paytida fotokuchlanish va qisqa tutashuv fototoki spektrlarining haroratga bog'lanishini tahlil qilish shuni ko'rsatadiki, burchak ostida o'tqazilgan $CdTe$, $CdSe$ va CdS yupqa qatlamlarda yuqori kuchlanishli fotovoltaiik effekt $CdTe-CdO-CdTe...$ turdagi ichki qurilgan assimetrik mikro-geterostrukturali davriy potentsial to'siqlarning zanjirlari tufayli yuzaga keladi;

3. Burchak ostida o'tqazilgan yupqa qatlam o'sishining haqiqiy strukturasi asoslanib, ikki qo'shni kristall donlar chegarasidagi sirtoldi sohalarning assimetriyali fotovoltaiik xususiyatlarini hisobga olgan holda, yuqori fotokuchlanish shakllanishining fenomenologik nazariyasi ishlab chiqilgan va u eksperimental olingan spektral hamda lyuks-voltaiik xarakteristikalarini sifat jihatidan qoniqarli darajada tushuntiradi.

4. Aniqlanishicha, qalay kirishmalari miqdori noldan 5 atom% gacha ko'tarilganda, $CdTe:Sn$ yupqa qatlami $T = 300$ K da hosil qiladigan fotokuchlanishning maksimal qiymati chiziqli ravishda 400 V dan 4200 V gacha ortadi, keyin asta-sekin qo'shilgan Sn miqdori 8 atom.% ga etganda 2000 V gacha pasayadi. 0,5-1,0 nm/s kondensatsiya tezligida olingan qalinligi $d \approx 0,8-1,0$ mkm, yuzasi 5×20 mm² bo'lgan $CdTe:Sn$ namunalari yuqori ($R_{qor} \approx 10^{12} - 10^{13}$ Ohm) qarshilikka ega bo'lib, maksimal fotokuchlanishning $U_{AFK} = (2-3) \cdot 10^3$ V/sm va qisqa tutashuv tokining $I_{qt}^{\phi} \approx 10^{-9}$ A qiymatlariga qo'shimcha termik ishlovsiz erishilgan.

5. $CdTe:Sn$ yupqa qatlamlarining $-2 \cdot 10^{-3} \leq \varepsilon \leq +2 \cdot 10^{-3}$ nusb. b. oraliqdagi tipik deformatsiya xarakteristikasi $U_{AFN}(\varepsilon)$ plyonkali fotorezistorlarning $\Delta R(\varepsilon)/R_0$ idan farqli o'laroq, qat'iy chiziqli, simmetrik bog'lanish namoyon qiladi, qorong'uda barqaror $K \approx (0.5-1.0) \cdot 10^2$ nusb. b. tenzosezgirlikka ega bo'lib ($T=300$ K), yorug'lik intensivligiga qarab ortadi va bunda siqilish paytida fotokuchlanish kamayadi, cho'zilishda esa ortadi.

6. $CdSe_{0.8}S_{0.2}$ qattiq eritmasidan qalinligi $d \sim 10.0-15.0$ mkm va yuzasi 5×20 mm² bo'lgan yangi tayyorlangan yupqa pardalar elektron o'tkazuvchanlikka va oz qarshilikka egaligi aniqlandi. Ularning elektron mikrofotogrammalari va rentgenogrammalarida yorqin polikristall struktura va $CdSe$ monokristallaridagi

tipik donorlar uchun xos aktivlanish energiyasi $\sim 0,6 \pm 0,02$ eV bo'lgan ortiqcha kadmiyning refleksi kuzatiladi.

7. CdSe_{0,8}S_{0,2} yupqa pardalar havoda CdCl₂ bug'lari ishtirokida ~ 4 minut qizdirilganda fotosezgirlik darajasi $S \approx 10^4$ gacha ortishi va buning sababi aktivlashish energiyasi $E_v + (0,42 \pm 0,02)$ eV bo'lgan kadmiy vakansiyasi va xlor kompleksi, $E_v + (0,63 \pm 0,02)$ eV kadmiy vakansiyasi, $E_v + (0,92 \pm 0,02)$ eV tez rekombinatsiya markazi. shuningdek $E_c - (0,19 \pm 0,02)$ eV selen va kadmiy vakansiyasining kompleksi hosil qilgan chuqur sathlar ekanligi ko'rsatilgan.

8. CdSe_{0,8}S_{0,2} qattiq eritmasidan olingan yupqa pardalarning qorong'ulikdagi ancha katta tenzosezgirlik $K \approx 2 \cdot 10^2$ n.b. yorug'lik intensivligi ortishi bilan kamayishi, yuqori $L \geq 10^4$ lk intensivliklarda amalda yo'qolib ketishi namunalarning yuqori fotoo'tkazuvchanligi bilan bog'liq ekanligi isbotlangan. Tenzosezgirlikning etarlicha yuqori spektral fotosezgirlik sohasidagi yorug'lik ta'sirida bunday o'zgarishi ushbu yupqa pardalar asosida gibridd foto-tenzoelektrik o'zgartirgichlarni loyihalash imkonini beradi.

**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

РАХМОНОВ ТОХИРБЕК ИМОМАЛИЕВИЧ

**ТЕХНОЛОГИЯ И ФОТО-ТЕНЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
ПЛЕНОЧНЫХ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУР
 $CdTe_xSe_yS_{1-(x+y)}$**

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам

Фергана-2023

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 B2021.4.PhD/FM658.

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.ziyo.net).

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

Официальные оппоненты: Нуритдинов Иззатилло
доктор физико-математических наук, профессор

Гулямев Гафур
доктор физико-математических наук, профессор

Ведущая организация: Научно-исследовательский институт физики полупроводников и микроэлектроники при Национальном университете Узбекистана имени Мирзо Улугбека

Защита диссертации состоится «16» 09 2023 года в 10⁰⁰ часов на заседании Научного совета PhD.03/27.02.2020.ФМ.106.01 при Ферганском политехническом институте (Адрес: 150107, г. Фергана, ул. Ферганская, дом 86. Тел: (+99873) 241-12-06, факс (+99873) 241-12-06, e-mail: uzferfizika@mail.ru, малый зал заседания).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке (ЦИР) института. (зарегистрирована за № 192) (Адрес: 150107, г. Фергана, ул. Ферганская, дом 86. Тел: (+99873) 241-12-06).

Автореферат диссертации разослан «04» 09 2023 года. (Ф - 70.30.10)
(реестр протокола рассылки № 14 от «04» 09 2023 г.)



В. Р. Расулов
Заместитель председателя Научного совета по присуждению ученой степени доктора философии, PhD ф.-м.н. доцент

Б.Ж. Ахмадалиев
Заместитель секретаря Научного совета по присуждению ученой степени доктора философии, PhD ф.-м.н.

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 в области физики твердого тела и солнечной энергетики пристальное внимание уделяется развитию технологии получения и исследованию физических свойств микро- и нано материалов на основе бинарных полупроводников A^IVB^VI . На сегодняшний день разрабатываются дешевые светоизлучатели, фотоприемники, фотодатчики с улучшенными оптическими и фотоэлектрическими свойствами на основе твердых растворов и гетероструктур халькогенидов кадмия. Особый интерес исследователей вызывает дальнейшее повышение эффективности солнечных элементов и других фотопреобразователей на основе CdS , $CdSe$, $CdTe$. В этом аспекте разработка новых технологий и изучение фото-тензоэлектрических явлений в пленочных структурах твердых растворов типа $CdSe_xS_{1-x}$ и $CdTe:Sn$ с целью выявления их перспективных функциональных возможностей являются актуальными задачами физики конденсированного состояния.

В ведущих научно-исследовательских центрах мира особое значение придается вопросам установления новых структурно-чувствительных и фото-тензоэлектрических свойств полупроводниковых поликристаллических пленочных структур, сильно зависящих от условий их выращивания. Поэтому представляет интерес проведение фундаментальных исследований по следующим не решенным задачам микроэлектроники: разработка технологии получения пленочных фотовольтаических поликристаллических пленок $CdTe$, $CdSe$, CdS методом порционного испарения в вакууме и исследование их фото-тензоэлектрических свойств; разработка технологии получения легированных пленок $CdTe:Sn$ и изучение влияния механической деформации на их фотовольтаические свойства; получение фоторезистивных поликристаллических пленочных структур на основе твердого раствора $CdSe_xS_{1-x}$ и изучение их фото-тензоэлектрических свойств.

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

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

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 фото- и тензочувствительностью, обусловленной наличием специфических объемных локальных центров с глубокими уровнями и особыми электронными свойствами зернограничной поверхности, существенно зависящими от технологии их изготовления.

Над разработкой технологии получения фотовольтаических пленок и исследованием их фундаментальных физических свойств интенсивно работали известные ученые Узбекистана. В результате оригинальных работ Э.А. Адировича и его учеников, как Т. Мирзамахмудов, Ю.М. Юабов, ферганских физиков Э.И. Билялова, А.Я. Афuzова, Н.Х. Юлдашева, а также

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).

С.З. Шамирзаева, К.М. Дощанова разработаны технологии тонких пленок на основе халькогенидных полупроводников и теоретически описаны особенности аномальных фотовольтаических эффектов в них. В экспериментальных работах Саидова М.С., Мирсагатова Ш. А., Разикова Т.М. и Каримова М.А. исследованы фотоэлектрические свойства и механизмы токопрохождения в тонкопленочных структурах халькогенидов кадмия.

Однако, до сих пор в достаточной степени не решены задачи разработки технологии получения фотовольтаических пленок CdTe, CdSe, CdS методом порционного испарения в вакууме, легированных пленок CdTe:Sn, фоторезистивных поликристаллических пленочных структур на основе твердого раствора $CdSe_xS_{1-x}$ и изучение их фото-тензоэлектрических свойств.

Связь темы диссертации с тематическими планами научно-исследовательских работ. Диссертационная работа выполнено в Ферганском политехническом институте, в частности, в рамках фундаментального научного проекта: Грант № 80-06 Фонда Поддержки Фундаментальных Исследований АН РУз и перспективного научного плана института на 2017-2022 гг. по теме: «Фото-тензоэлектрические явления в полупроводниковых пленочных структурах халькогенидов кадмия».

Целью исследования является определение оптимальных технологических режимов получения пленочных структур разного состава $CdTe_xSe_yS_{1-(x+y)}$ путем усовершенствования метода термического испарения в вакууме и изучение их фото-тензоэлектрических свойств.

Задачи исследования:

разработка технологии получения пленочных фотовольтаических поликристаллических пленок CdTe, CdSe, CdS методом порционного испарения в вакууме и исследование их фото-тензоэлектрических свойств;

разработка технологии получения легированных пленок CdTe:Sn и изучение влияния механической деформации на их спектры фоточувствительности;

получение фоторезистивных поликристаллических пленочных структур на основе твердого раствора $CdSe_xS_{1-x}$ и изучение их фото-тензоэлектрических свойств.

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

Предметом исследования являются технологические процессы получения пленок CdTe, CdSe, CdS, CdTe:Sn и $CdSe_xS_{1-x}$, а также электрофизические, фотоэлектрические и тензоэлектрические явления.

Методы исследований: метод термического испарения в вакууме, метод дифракции рентгеновского излучения, методы холловского измерения концентрации и подвижности носителей заряда, методы анализа вольт-амперных, люкс-амперных, люкс-вольтовых, спектральных и деформационных характеристик, широко применяемые в физике твердого тела.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

впервые разработана технология получения фотовольтаических пленок $CdTe$, $CdSe$ и CdS на стеклянной подложке с $T_n=250-350 K$ путем порционного испарения исходного материала $40-50 мг$ в вакууме $P \approx 10^{-1}-10^{-2} Па$. Анализ температурной зависимости спектров фотонапряжения и фототока короткого замыкания при деформации показывает, что за высоковольтный фотовольтаический эффект отвечают встроенные цепочки асимметричных потенциальных барьеров типа $CdTe-CdO-CdTe \dots$.

развита феноменологическая теория образования высоковольтной фото ЭДС, исходящая из реальной структуры роста косоапыленной пленки с учетом асимметричных фотовольтаических свойств приповерхностных областей на границе двух соседних кристаллических зерен, которая качественно удовлетворительно согласуется с экспериментальными спектральными и люксвольтовыми характеристиками $U_{АФН}$.

впервые установлено, что для высокоомных ($R_{mem} \approx 10^{12} - 10^{13} Ом$) пленок $CdTe:Sn$ толщиной $d \approx 0.8-1.0 мкм$ с ростом количества Sn от 0 до 5 атом.% при $T=300 K$ значение $U_{АФН}$ увеличивается от 400 до 4200 В, затем медленно падает до 2000 В при добавке Sn в 8 атом.%, их деформационная характеристика $V_{АФН}(\varepsilon)$ в пределах $-2 \cdot 10^{-3} \leq \varepsilon \leq +2 \cdot 10^{-3} отн.ед$ обнаруживает линейную зависимость и обладает стабильной тензочувствительностью.

показано, что свежеприготовленные пленки $CdSe_{0.8}S_{0.2}$ толщиной $d \sim 10.0-15.0 мкм$ оказались низкоомными с электронной проводимостью благодаря избыточному кадмию с энергией активации $\sim 0,6 \pm 0,02 эВ$, а после термической обработки на воздухе в присутствии паров $CdCl_2$ в течение 4 мин образуются комплекс атома хлора с вакансией кадмия $E_v + (0,42 \pm 0,02) эВ$, центр быстрой рекомбинации $E_v + (0,92 \pm 0,02) эВ$. а также комплекс вакансия селена и кадмия с уровнем прилипания $E_c - (0,19 \pm 0,02) эВ$.

установлено, что фоторезистивные плёнки $CdSe_{0.8}CdS_{0.2}$ обладают достаточно высокой тензочувствительностью $K \approx 2 \cdot 10^2 отн. ед.$, которая уменьшается с ростом интенсивности L освещения, а при $L \geq 10^4 лк$ практически исчезает из-за подавления её высокой фотопроводимостью образца, что позволяет сконструировать на основе этих пленок гибридных фото - тензоэлектрических преобразователей.

Практические результаты исследования:

разработаны технологические режимы получения фотовольтаических и фоторезистивных тонких поликристаллических пленок халькогенидов кадмия разного состава методом термовакуумного осаждения;

определено изменение фотоэлектрических и деформационных величин тонких пленок $CdTe_xSe_yS_{1-(x+y)}$, отвечающих требованиям к параметрам дешевых и эффективных фото- и тензодатчиков.

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 фото-тензоэлектрических свойств пленок $CdTe_xSe_yS_{1-(x+y)}$ с их рабочими параметрами способствуют расширению представлений о физических процессах в полупроводниковых поликристаллических тонких пленках.

Практическая значимость результатов исследования объясняется тем, что результаты диссертации могут быть использованы при разработке технологий изготовления дешевых и эффективных солнечных элементов, фотоприемников и фото-тензодатчиков на основе пленок $CdTe_xSe_yS_{1-(x+y)}$.

Внедрение результатов исследования.

На основе результатов разработки технологии и исследования фото-тензоэлектрических свойств пленочных поликристаллических структур $CdTe_xSe_yS_{1-(x+y)}$:

разработанные теоретический и экспериментальный методы анализа деформационных явлений в поликристаллических пленках халькогенидов кадмия, позволяющий усовершенствовать технологии получения полупроводниковых фото-тензодатчиков методом термовакуумного испарения прошел апробации на АО «FOTON» АК «Узэлтехсаноат» (Справка АК «Узэлтехсаноат» № 04-3/339 от 06.04.2023 г.). Научные результаты можно внедрят в предприятиях Узэлтехсаноат. Применение этой научной новизны, несомненно приводит к модернизации способа изготовления полупроводниковых пленочных фото- и тензодатчиков;

результаты исследования фото-тензоэлектрических свойств поликристаллических пленок $CdTe$, $CdSe$, CdS , $CdTe:Sn$ и $CdSe_xS_{1-x}$, и метод расчета высоковольтного фото-ЭДС в линейных периодических ассимметричных структурах кристаллических зерен использованы при выполнении фундаментального проекта ОТ-Ф2-70 " Влияние температуры, деформации и света на параметры наноразмерных полупроводников в сильном электромагнитном поле" (руководитель проекта проф. Г. Гулямов) (Справка Наманганского инженерно-строительного института № 06/10-09/276 от 25.03.2023 г.). Использование научных результатов позволило проанализировать физических механизмов электронных кинетических явлений в сильнолегированных полупроводниковых структурах при собственном и примесным поглощении света.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на 6 международных и 3 республиканских научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов. По теме диссертации опубликовано всего 18 научных трудов, из них 9 научных статей в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертации.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы из 126 наименований. Текст диссертации содержит 136 машинописных страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

В первой главе **«Современное состояние изучения фото- и тензoeлектрических явлений в пленочных структурах халькогенидов кадмия»** приводятся краткие сведения об основных параметрах кристаллов CdS, CdSe, CdTe и результаты анализа текущей литературы по вопросам технологии получения, исследования свойств тонких поликристаллических пленок на их основе. Рассмотрены известные механизмы электропроводности, характерные особенности фотопроводимости, фотовольтаических и тензорезистивных свойств пленочных структур. На основе критического анализа известных результатов сформулированы цели и задачи диссертации.

Во второй главе **«Фото-тензoeлектрические свойства фотовольтаических тонких поликристаллических пленок CdTe, CdSe, CdS, изготовленных методом порционного испарения в вакууме»** рассмотрены некоторые вопросы усовершенствования технологии получения тонкопленочных ($d \approx 1.0$ мкм) элементов с аномальным фотовольтаическим свойством из халькогенидов кадмия методом термического испарения в вакууме отдельными порциями на прозрачные диэлектрические подложки. Анализированы экспериментальные результаты исследования вольт-амперных, люкс-амперных, люкс-вольтовых и деформационных характеристик поликристаллических пленок CdTe, CdSe, CdS. Показано, что полученные образцы обладают линейными ВАХ, ЛАХ, температурными ($T \approx 120-320$ К) и деформационными характеристиками ($\epsilon \approx -3 \cdot 10^{-5} - 3 \cdot 10^{-3}$ отн. ед.). Поэтому они могут служить как перспективными пленочными фотоприемниками, чувствительными к механической деформации в видимой и ближней ИК области спектра излучения. Далее развита новая теория образования аномально большого фотонапряжения в косонапыленных тонких поликристаллических пленках при собственном и примесном фотовозбуждении, на основе которой проводится анализ полученных автором и известных из текущей литературы экспериментальных результатов.

Имеются достаточно много работ, посвященных всестороннему изучению эффекта генерации аномально большого фото напряжения (АФН, аномальный фотовольтаический (АФВ) эффект, $U_{\text{АФН}} \approx 10^2 - 10^4$ В/см) в полупроводниковых пленках при собственном и примесном поглощении света. Как показывают опыты, АФВ-эффект наблюдается исключительно в косонапыленных поликристаллических тонких ($d \approx 1$ мкм) пленках, выращенных на диэлектрических подложках по специальной технологии. Этот эффект практически не обнаруживается в относительно толстых полупроводниковых проводящих и аморфных пленках ($d \sim l_D$, где l_D – Дебаевская длина экранирования) или монокристаллах. До сегодняшнего дня отсутствует единого мнения относительно физической природы образования и механизма данного эффекта. Несомненно, что АФВ-эффект связан с наличием большого количества микро фоточувствительных элементов, соответствующих зернистой кристаллической структуре тонких пленок. Тем не менее, пока ещё окончательно не ясны точные механизмы возникновения фото-ЭДС в каждом из микро фотоэлементов. Поэтому целью настоящей главы заключалась в получении новых информации о механизме генерации АФН путем комплексного исследования влияния технологических условий получения поликристаллических фотовольтаических пленок на их электрофизические, фотоэлектрические, спектральные и тензоэлектрические свойства. Было рассмотрено принципиальные вопросы усовершенствования технологии получения тонких пленок с АФВ свойством из *CdTe*, *CdSe*, *CdS*.

Для получения пленок использованы мелкодисперсные порошки *CdTe*, *CdSe*, *CdS* с грифом “Особо чистый”, а также механические смеси отдельных компонентов указанных выше двойных соединений. Естественно, что на структуру и свойства пленочных фотовольтаических элементов значительное влияние оказывает состав паровой фазы, который в свою очередь зависит от состава исходной навески, особенностей и условий ее испарения. Поэтому, учитывая эти технологические факторы, нами получены пленочные элементы из следующих компонент материалов: 1. Навесок *CdTe*, *CdSe* и *CdS* механических смесей стехиометрического состава. 2. Определенных порций испаряемого материала. 3. Механических смесей порошков *CdTe* и *CdS* с избытком *Cd* до 20 масс. %. 4. Механических смесей порошков *CdSe* с избытком *Cd* до 15 масс. %.

Исследования показывали, что с увеличением первой порции от 5 % до 30 % максимальное фотонапряжение, генерируемое при нормальных условиях пленочными элементами при освещении растут до 2500 В на 1 см длины пленки, полученной из теллурида кадмия и 1200 В - из сульфида кадмия, а затем (выше 30 %) медленно падают. При увеличении количество не испаренной части (при увеличении третьей порции) от 0 до 10 % максимальное значение АФН растет, а затем (выше 10 %) начинает падать. Наибольшее значение АФН получены при следующих условиях: I порция ~30%, II порция ~60%, III порция ~10%. Наименьшее фотонапряжение генерировали пленочные элементы, полученные из всего исходного материала. Самое наибольшее фотонапряжение ~ 5 кВ генерировали пленки

из CdSe, полученные из порций I (25% исходного материала). Определены наименьшие оптимальные массы исходного материала. Они составляли: CdTe-40 мг, CdSe и CdS-50 мг. Такое влияние порции исходного материала на величину генерируемых фотонапряжений, связано с тем, что в процессе испарения молекулярный состав навески изменяется, а это вызывает изменение фазового состава и структуры получаемых слоев.

Изучались электрические свойства пленочных элементов CdTe, CdSe с толщиной $d \approx 1$ мкм и площадью 5×20 мм², полученных по оптимальным технологическим условиям, снимались их ВАХ в темноте и при естественной освещенности $5 \cdot 10^4$ лк в интервале значений напряженности электрического поля от -3 кВ/см до +3 кВ/см. Оказалось, что ВАХ этих пленок, также как и в известных работах, линейны в темноте и при освещении, однако их темновое сопротивление на один порядок превышает сопротивления аналогичных пленок, полученные по другим методам, и составляет $R \approx 10^{12} \div 10^{13}$ Ом. Это связано с тем, что в фотовольтаических пленках, изготовленных методом порционного испарения формируется большее число активных микрофотоэлементов (микро-гетеропереходов) и уменьшается число неактивных (шунтирующих слоев), и заведомо осуществляется сильная компенсация донорных и акцепторных примесей в кристаллических зернах.

На рис.1,а представлена ВАХ пленочных элементов CdTe, CdS в темноте при отсутствии и наложении внешней упругой механической деформации. Из характеристик видно, что при деформации линейный характер ВАХ не меняется. При одностороннем сжатии проводимость пленки заметно растет, а при растяжении уменьшается. Это обусловлено изменением потенциальных барьеров на границах зерен под действием деформации. Очевидно, что при сжатии высота и ширина барьера уменьшается, а при растяжении-растет. Коэффициент тензочувствительности K пленочных образцов при постоянном напряжении $U = \text{const}$ вычисляли по формуле

$$K = \Delta I / I_0 \varepsilon \quad (1)$$

где $\Delta I = I - I_0$ - абсолютное изменение силы тока, I и I_0 - ток через образец при наличии и отсутствии деформации, ε - относительная деформация. Оценки показали, что величина K достигает от 60 до 100 отн. единиц для исследованных пленок.

Типичная деформационная характеристика $f(\varepsilon) = \Delta U_{\text{АФН}} / U_{\text{АФН}}$ фото

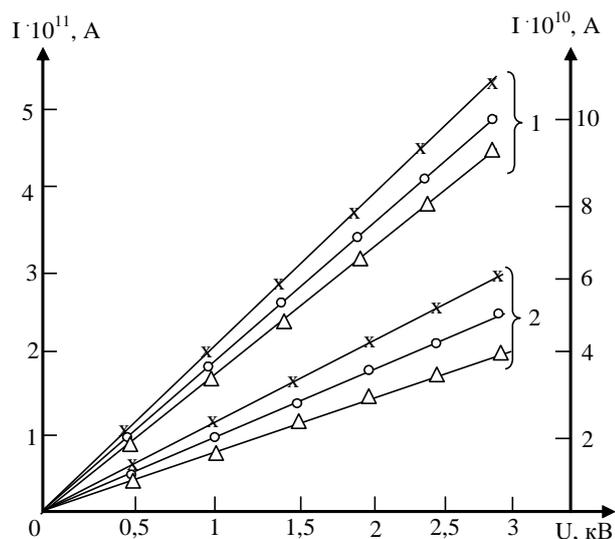


Рис. 1. ВАХ CdTe (1) и CdS (2, левая шкала) при деформациях: $\varepsilon=0$ (о), $2,0 \cdot 10^{-3}$ (Δ-растяжение), $-2,0 \cdot 10^{-3}$ (х-сжатие) отн.ед. $T=300$ К.

напряжения пленок $CdTe$, CdS и $CdSe$ приведена на рис. 2, из которого видно, что при сжатии величина $U_{АФН}$ уменьшается, а при растяжении – растет линейно и симметрично по ε . Из рисунка также видно, что тензочувствительность по $U_{АФН}$ наибольшая у пленок CdS : $K \approx 10^2$. Изменения фототока и фотонапряжения при деформации, очевидно, связаны с изменением параметров микропотенциальных барьеров внутри кристаллических структур пленок, создаваемых, прежде всего, асимметричными гетеропереходами на интерфейсах границ раздела кристаллических зерен.

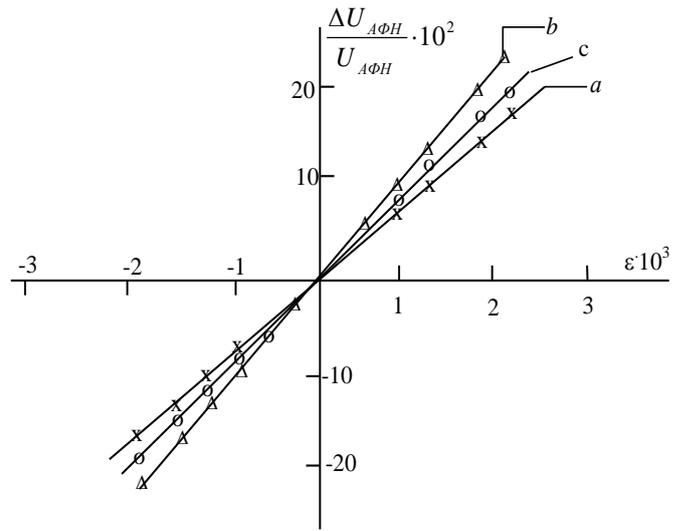


Рис.2. Деформационная характеристика $CdTe$ (a), CdS (b) и $CdSe$ (c) по $U_{АФН}$ при комнатной температуре при значении освещенности света лампы накаливания $L=2 \cdot 10^4$ лк. $T=300$ К.

Были изучены также и люкс-амперные характеристики пленок $CdTe$ и CdS при комнатной K .

температуре в интервале значения освещенности от 0 до $5 \cdot 10^4$ лк при деформации и без деформации. Соответствующие ЛАХ приведены на рис.3. Видно, что в интервале значения освещенности от 0

до $5 \cdot 10^4$ лк характеристика линейно как при наличии, так и при отсутствии деформации. Под действием деформации качественный вид ЛАХ не меняется, а только смещается по ординате вниз при растяжении, и вверх - при сжатии, т.е. фототок при сжатии растет, а при растяжении - уменьшается. Эти изменения мы также связываем с изменением параметров асимметричных микропотенциальных барьеров при деформации фотовольтаических пленок халькогенидов кадмия,

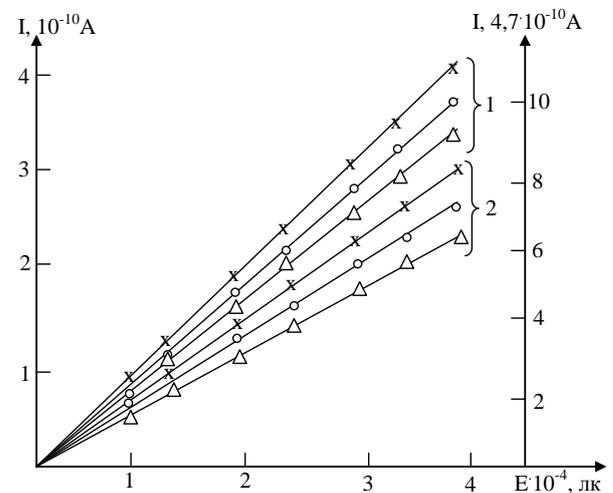


Рис.3. Люкс-амперная характеристика $CdTe$ (1) и CdS (2) при: $\varepsilon=0$ (o), $\varepsilon=-2 \cdot 10^{-3}$ (x-сжатие) и $\varepsilon=2 \cdot 10^{-3}$ отн.ед. (Δ -растяжение). $T=300$ К.

приводящее к существенной фото- и тензочувствительности этих пленок.

Снимались спектральные характеристики $U_{АФН}(\lambda)$ для пленок $CdTe$, $CdSe$, полученных методом порционного испарения при наличии и без механической деформации. Типичные кривые $U_{АФН}(\lambda)$ для этих пленок имеют качественно одинаковый вид, поэтому на рис. 4,б показаны

фрагменты спектров в коротковолновой области $\hbar\omega > E_g$ только для пленки $CdTe: Cd$. Из рисунка видно, что наблюдается характерная спектральная линия M фото-напряжения, расположенная примерно в интервале (550-650) нм с максимумом на длине волны $\lambda_M = 613$ нм ($\hbar\omega_M \approx 2.0$ эВ), что ранее не

было обнаружено в пленках $CdTe$ и $CdTe: Ag$, полученных другими авторами с помощью известных технологий. Появление линии M на коротковолновой крыльях спектра $U_{AFH}(\lambda)$ связано образованием фотовольтаических пленок с сильно развитыми асимметричными микропотенциальными барьерами несколько иной структурой по методу порционного испарения в вакууме. Считаем, что M -линия заведомо обусловлено генерацией фотонапряжения микрогетеропереходной структурой типа $CdTe-CdO-CdTe$. Заметим, что ширина запрещенных зон $CdTe$ и CdO при комнатной температуре равны 1.46 эВ и 2.18 эВ, а последнее сравнимо со значением $\hbar\omega_M = 2.02$ эВ.

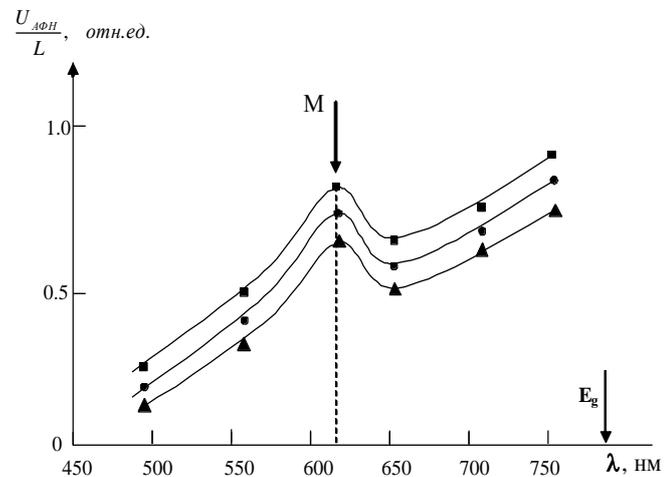


Рис.4. Влияние механической деформации на спектр $U_{AFH}(\lambda)$ пленки $CdTe: Cd$. Для линий с точками $\bullet - \epsilon = 0$; $\blacksquare - \epsilon = 2,0 \cdot 10^{-3}$ отн. ед. (растяжение) и $\blacktriangle - \epsilon = -2,0 \cdot 10^{-3}$ отн. ед. (сжатие), $T = 300$ К

При изучении фотовольтаического эффекта немаловажными характеристиками являются зависимости фототока и фотонапряжения от температуры. В исходной и деформированной пленках $CdTe$, $CdSe$ снимались зависимости фотонапряжения и фототока короткого замыкания от

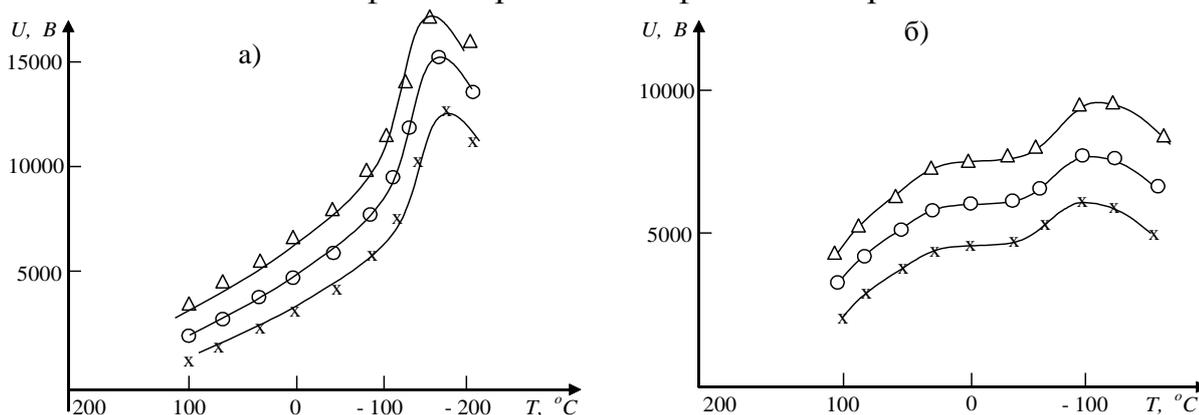


Рис. 5. Температурные зависимости фотонапряжения пленок $CdTe$ (а) и $CdSe$ (б) при механической деформации: $\epsilon = 0$ (о), $2,0 \cdot 10^{-3}$ отн. ед. (Δ -растяжение), и $-2,0 \cdot 10^{-3}$ отн. ед. (х-сжатие). $L = 2 \cdot 10^4$ лк.

температуры. На рис.5,а приведена температурная зависимость фотонапряжения U_{AFH} при наличии и отсутствии деформации. Из рисунка

видно, что с уменьшением температуры генерируемое фотонапряжение для пленок $CdTe$ без деформации возрастает сначала почти линейно от значения $2 \cdot 10^3$ В при $T=100$ °С до $7 \cdot 10^3$ В при $T=-50$ °С, далее суперлинейно увеличивается до максимума (~ 15 кВ) при $T=-160$ °С, а затем резко уменьшается (а). Для $CdSe$ (рис.5, б) наблюдается сначала плавный сублинейный рост от значения $3 \cdot 10^3$ В при $T=100$ °С до $6 \cdot 10^3$ В при $T=40$ °С, происходит насыщение до $T=-40$ °С, далее повторный суперлинейный рост до значения $7.5 \cdot 10^3$ В при $T=-100$ °С, а затем плавное падение. Такие особенности температурной зависимости $U_{АФН}(T)$ говорит о том, что на генерации фотонапряжения существенно влияют различные механизмы и области рассеяния. Так, для пленки $CdTe$ при $T \geq -50$ °С превалирует рассеяния носителей в квазинейтральной области кристаллических зерен, а при $T < -50$ °С доминируют влияния приповерхностных областей объемных зарядов и перезарядки поверхностных состояний. Заметим, что у пленок $CdSe$ различаются три характерные температурные области: $T \geq 40$ °С, $T = (40 \div -40)$ °С, $T < -40$ °С. При деформации вид температурной характеристики $U_{АФН}(T)$ обеих пленок качественно почти не меняется, а лишь только смещается по ординате вверх при растяжении, а при сжатии – вниз, причем симметрично относительно ε . Отсюда заключаем, что механическая деформация не разрушает природу и механизма образования аномального фотонапряжения. Заметим, фотовольтаические пленки становятся более чувствительным к механической деформации с уменьшением температуры. Это объясняется увеличением сопротивления пленок при низких температурах за счет уменьшения эффективных концентраций и подвижностей носителей заряда, обусловленных изменением высоты и ширины микро-потенциальных барьеров, а также зарядовых состояний дефектов.

Для теоретического расчета $U_{АФН}$ рассмотрен модель фотовольтаической пленки как линейная периодическая цепочка последовательно включенных слоев полупроводник (П) - диэлектрик (D) - полупроводник (П) (рис. 6). Диэлектрическую прослойку (ДС) считается безловушечной, на противоположных гранях которой имеются ряд быстрых поверхностных состояний с отличающимися концентрациями. Равновесные концентрации электронов n_0 и дырок p_0 в квазинейтральных объемах полупроводников, прилегающих с разных сторон к D-слою, отличаются: $n_{01} \neq n_{02}$, $p_{01} \neq p_{02}$.

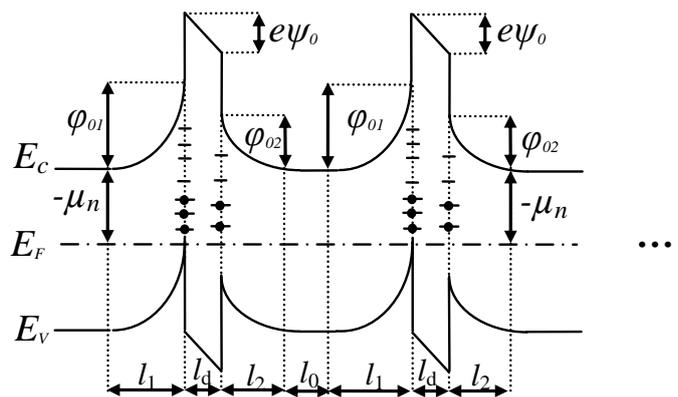


Рис. 6. Энергетическая зонная диаграмма линейной цепочки кристаллических зерен с асимметричными барьерами на границах кристаллитов с порами (D-слой) в состоянии термодинамического равновесия.

Подобная асимметрия свойств структурного элемента ПДП обуславливает асимметрию поверхностных барьеров, отражающую асимметричную геометрию роста кристаллических зерен. Поскольку, поверхность и потенциальный барьер с разных сторон D-слоя отличаются по электрофизическим свойствам, то алгебраическая сумма поверхностных фото-ЭДС ПДП -структуры

$$U_{\Phi\Pi}^{(1)} = U_{\Phi\Pi,1}^{(1)} - U_{\Phi\Pi,2}^{(1)} + U_{\Phi\Pi}^s, \quad (2)$$

отлична от нуля, и составляет наиболее вероятный вклад элементарного фотонапряжения, генерируемое одним структурным элементом АФВ -пленки. Тогда очевидно, что

$$U_{АФВ} = (N-1)U_{\Phi\Pi}^{(1)}, \quad (3)$$

где N - число периодически расположенных кристаллических зерен вдоль пленки. Далее приводятся результаты расчета в предельном случае инверсионного изгиба зон, когда один дискретный поверхностный уровень обменивается носителями преимущественно с валентной зоной:

$$U_{\Phi\Pi,1}^{(1)} - U_{\Phi\Pi,2}^{(1)} = \frac{kT}{e} \alpha \eta L \times \left[\frac{p_{01}^{-1} \cdot L_1 / L}{v_{01} + v_{s1} \exp \frac{\psi_{s1}}{kT}} - \frac{p_{02}^{-1} \cdot L_2 / L}{v_{02} + v_{s2} \exp \frac{\psi_{s2}}{kT}} \right], \quad (4)$$

$$U_{\Phi\Pi}^s = \frac{e \delta_{\text{эф}} p_t^0}{\varepsilon_0} \cdot \alpha \eta L \left[\frac{N_{t1} p_{01}^{-1} \cdot L_1 / L}{\left(v_{01} + v_{s1} e^{\frac{\psi_{s1}}{kT}} \right) \left(p_{01} + p_t^0 e^{\frac{\psi_{s1}}{kT}} \right)} - \frac{N_{t2} p_{02}^{-1} \cdot L_2 / L}{\left(v_{02} + v_{s2} e^{\frac{\psi_{s2}}{kT}} \right) \left(p_{02} + p_t^0 e^{\frac{\psi_{s2}}{kT}} \right)} \right]. \quad (5)$$

Здесь α , η и L - коэффициент поглощения, квантовый выход и интенсивность падающего света, L_1 и L_2 – значения интенсивности прошедшего света с левой и правой стороны D-слоя, N_{t1} и N_{t2} – концентрации t - ловушек без освещения, а v_{01} , v_{02} и v_{s1} , v_{s2} – объемные и поверхностные скорости рекомбинации, ψ_{s1} и ψ_{s2} – величины изгиба зон на поверхностях при освещении с двух сторон D-слоя, $\delta_{\text{эф}}$ -эффективная ширина D-слоя, ε_0 – диэлектрическая постоянная, p_t^0 - концентрация дырок в случае, когда уровень Ферми совпадает с уровнем t – ловушки, e -заряд электрона, k - постоянная Больцмана, T -абсолютная температура.

Тогда при малом уровне возбуждения, когда $\psi_{s1}^* - \psi_{s1} < kT$, получим

$$V_{\Phi\Pi}^{(1)} = \frac{kT}{e} \alpha \eta L \times \left[\frac{p_{01}^{-1} \cdot L_1 / L}{v_{01} + v_{s1} e^{\frac{\psi_{s1}}{kT}}} \left(1 + \frac{N_{t1} \cdot \delta_{\text{эф}} / L_t^2}{p_{01} + p_t^0 e^{\frac{\psi_{s1}}{kT}}} \right) - \frac{p_{02}^{-1} \cdot L_2 / L}{v_{02} + v_{s2} e^{\frac{\psi_{s2}}{kT}}} \left(1 + \frac{N_{t2} \cdot \delta_{\text{эф}} / L_t^2}{p_{02} + p_t^0 e^{\frac{\psi_{s2}}{kT}}} \right) \right], \quad (6)$$

где $L_t^2 = \varepsilon_0 kT / e^2 p_t^0$.

Как видно из (6), АФВ эффект, т.е. генерация $U_{АФВ}$ в поликристаллических фотовольтаических пленках возникает из-за различия электронных свойств объема (n_0 , p_0 , v_0) и поверхности (ψ_s , v_s) соседних

кристаллических зерен, не реализующегося при нормальном падении молекулярного пучка к подложке. В случае малых освещенностей света $U_{АФН}$ пропорционально коэффициенту поглощения α , квантовому выходу η , интенсивности света L .

В известных до сих пор теоретических работах утверждалось, что люкс-вольтовая характеристика $U_{АФН}(L)$ при малых освещенностях носит сублинейный характер. В отличие от этих работ по результатам развитой здесь теории, $U_{АФН}$ линейно зависит от освещенности L возбуждающего света (см. рис.7). Действительно, как видно из формулы (6) если считать, что при малых интенсивностях света величины v_{0i} и v_{si} не зависят от L , то обнаруживается линейная зависимость $U_{АФН} \sim L$.

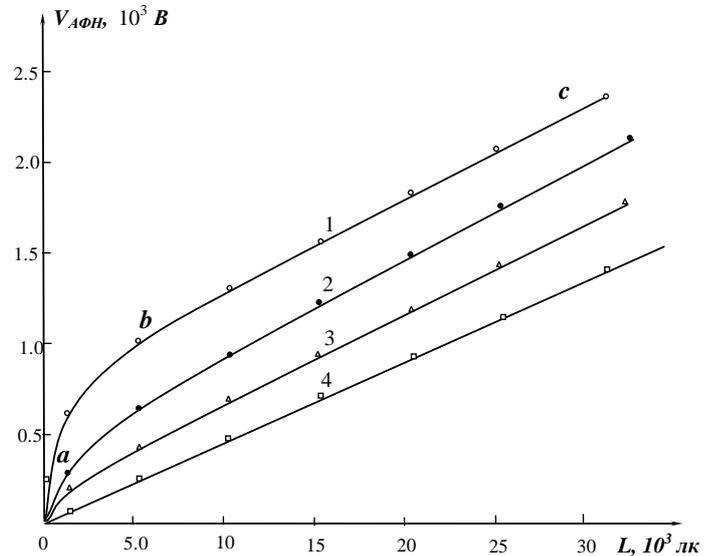


Рис.7. Люкс-вольтовые характеристики фотовольтаических пленок $CdTe$ (кривая 1), $CdSe$ (2), CdS (3), $CdTe:Ag$ (4) при комнатной температуре ($T=300$ К).

В третьей главе «Исследование влияния механической деформации на фотоэлектрические свойства пленочных структур из $CdTe:Sn$ и $CdSe_xS_{1-x}$ » приведены результаты исследований фотовольтаического эффекта в легированных косопапыленными поликристаллических тонких ($d \leq 1$ мкм) пленках $CdTe:Sn$, а также влияния механической деформации на их электрофизические и фотоэлектрические свойства в зависимости от количества примеси олово и технологических параметров. рассмотрены фото-тензоэлектрические свойства поликристаллических пленок с достаточно высокой фотопроводимостью ($d \approx 4.0-5.0$ мкм), полученных методом термовакuumного испарения смеси порошкообразных $CdSe$ и CdS в квазиравновесных условиях на нагретую до $T \approx 550$ К слюдяную подложку. Исследованием спектрального распределения фотопроводимости ($\sigma_{\phi n}$) пленок $CdSe_{0.8}S_{0.2}$ методом Луковского, определены энергии активации локальных уровней, ответственных за примесную фотопроводимость. Показано, что при освещении образцов с помощью лампы накаливания наблюдается уменьшение тензочувствительности и слабая зависимость подвижности носителей от температуры, которые объясняются с уменьшением свойств микропотенциальных барьеров и перезарядкой глубоких уровней в объеме кристаллитов и на межзеренных границах под действием света. Тензочувствительность плёнок из твердого раствора $CdSe_{0.8}CdS_{0.2}$ в темноте достаточно высокая $K \approx 10^2-10^3$ отн.ед. и она

азота. Темновое сопротивление пленки $CdTe$ стехиометрического состава было порядка $10^{10} - 10^{11} \text{ Ом}$, а для пленки $CdTe:Sn$ с примесью олова 5 атом. % составило $10^{12} - 10^{13} \text{ Ом}$, что почти на два порядка больше (см. табл.1). Естественно это объясняется сверхсильной компенсацией донорных и акцепторных примесных центров, как в объеме, так и на поверхности микрокристаллитов тонкой поликристаллической пленки $CdTe:Sn$, изготовленной новым способом. Анализируя данные таблицы 1, можно заключить, что, как и в случае легирования $CdTe$ примесью In лишь после оптимальной термообработки (ТО), так и в случае пленки $CdTe:Sn$ без ТО достигается максимальные значения $U_{АФН} = (2-3) \cdot 10^3 \text{ В/см}$ и $I_{кз}^{\phi} \approx 10^{-9} \text{ А}$.

Таблица 1.

Электrofизические параметры пленок $CdTe$, $CdTe:In$, $CdTe:Sn$.

№ п/н	Электрофизические параметры пленок	чистый $CdTe$	легированный $CdTe:In$		$CdTe:Sn$, не оттоженная
			до отжига	после отжига	
1.	Темновое сопротивление, $R_{тем}, \text{ Ом}$	$(1.0 \pm 0.05)10^{11}$	$(2.0 \pm 0.05)10^{10}$	$(5.0 \pm 0.05)10^{11}$	$(5.0 \pm 0.05)10^{12}$
2.	Световое сопротивление, $R_{св}, \text{ Ом}$	$(2.0 \pm 0.05)10^{10}$	$(3.0 \pm 0.05)10^9$	$(2.0 \pm 0.05)10^{11}$	$(2.0 \pm 0.05)10^{11}$
3.	Сила фототока короткого замыкания, $I_{кз}, \text{ А}$	$(1.0 \pm 0.03)10^{-10}$	$(2.0 \pm 0.03)10^{-8}$	$(1.0 \pm 0.03)10^{-8}$	$(1.0 \pm 0.03)10^{-9}$
4.	Значение максимального фотонапряжения, $U_{АФН}, \text{ В}$	$(4.0 \pm 0.5)10^2$	$(0.6 \pm 0.1) 10^2$	$(2.0 \pm 0.1)10^3$	$(3.0 \pm 0.5)10^3$

На рис.9 приведена типичная деформационная характеристика

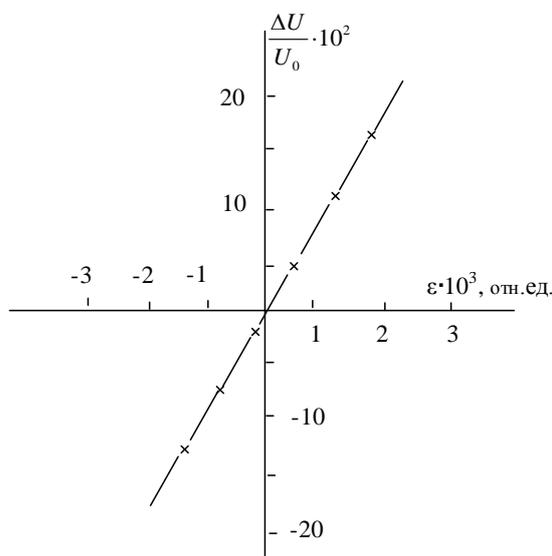


Рис.9. Деформационная характеристика $U_{АФН}(\varepsilon)/U_0$ фотовольтаической пленки $CdTe:Sn$ с примесью олова в 5 атом.%. $L = 3.5 \cdot 10^4 \text{ лк}$ и $T = 300 \text{ К}$.

$\Delta U_{АФН}(\varepsilon)/U_{АФН}$ фотовольтаических пленок $CdTe:Sn$ при освещенности $L = 3.5 \cdot 10^4 \text{ лк}$, которая носит строго линейный характер. Коэффициент тензочувствительности по фотонапряжению имеет одинаковое значение порядка $K = (0,7 - 1,0) \cdot 10^2 \text{ отн. ед}$ при деформациях растяжения и сжатия. Инвариантность значения K по отношению к инверсии направления односторонней деформации означает, что возможное внутреннее механическое напряжение в пленках не влияет на их фотовольтаические свойства.

Как видно из рис.10, что люкс-вольтовые характеристики пленок

CdTe:Sn, снятых при комнатной температуре, в интервале освещенности от 0 до $5 \cdot 10^4$ лк, состоят из двух характерных участков с различными углами наклона.

Первый линейный

участок соответствует быстрому росту фотонапряжения с освещением до $2 \cdot 10^4$ лк. Во второй нелинейной участке наблюдается более медленный рост с интенсивностью и выход к насыщению. Величина и характер зависимости фотонапряжения от освещенности не изменялись при тыловом и фронтальном освещении пленок.

Фотовольтаическая

чувствительность достигает значения $2 \cdot 10^7 \frac{B/cm}{Vm/cm^2}$ при

$T=300$ К и интенсивности $L = 10^{-5} Bm/cm^2$. Из рисунка отчетливо видно, как значение фотонапряжения уменьшается при деформации сжатия и увеличивается при растяжении, что демонстрирует, в конечном счете, как влияет изменения высоты микропотенциальных барьеров при деформации пленок на $U_{АФН}(L)$.

На рис.11 представлены в коротковолновой области $\hbar\omega > E_g$ фрагменты спектров $U_{АФН}(\lambda)$ пленок CdTe:Sn с примесью олова в 5 масс.% без деформации (линия с точками ●), при одностороннем сжатии (с крестиками x) и растяжении (с треугольниками Δ).

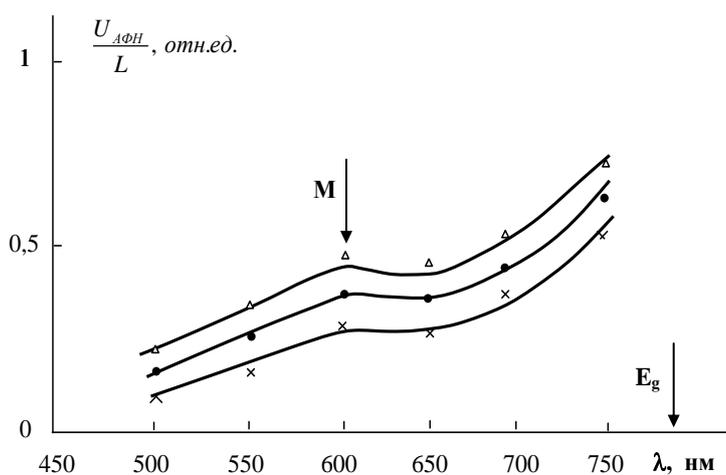


Рис.11. Влияние деформации на спектральную зависимость фотонапряжения пленок CdTe:Sn в области частот $\hbar\nu > E_g$. ●-без деформации, x-при сжатии ($\epsilon = -2 \cdot 10^{-3}$ отн. ед.), Δ-при растяжении ($\epsilon = 2 \cdot 10^{-3}$ отн. ед.).

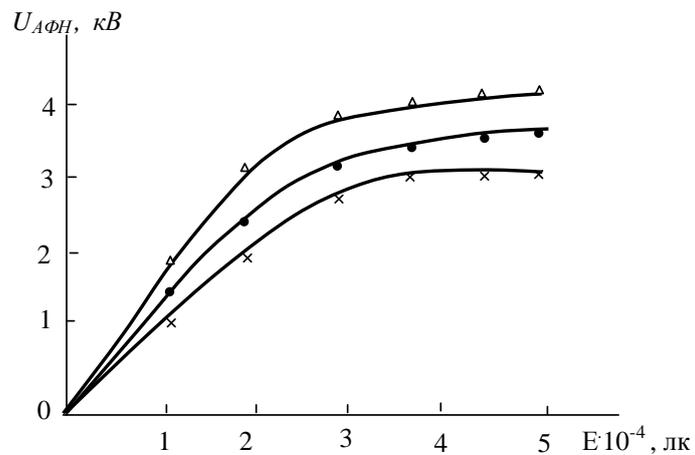


Рис. 10. Влияние деформации на люксвольтовую характеристику пленок теллурида кадмия с примесью олова в 5 атом.-%: Δ-растяжение, x-сжатие, ●- без деформации. $\epsilon = 2 \cdot 10^{-3}$ отн. ед.

и растяжении (с треугольниками Δ). Видно, что все спектральные линии почти параллельные с одинаковыми характерными участками и точкой М перегиба спектра на длине волне $\lambda \approx 600$ нм или $\hbar\nu \approx 2.07$ эВ (ср. рис.4). Аналогичная зависимость спектра поглощения $\alpha(\omega)$ характерна для обычных гетеропереходов из кристаллических халькогенидов кадмия. Заметим, что положение точки М сдвинута в область

коротких длин волн спектра по отношению к краю запрещенной зоны E_g . Это означает, что микро фотоэлементы, из которых состоят исследуемые фотовольтаические пленки, возможно, представляют собой цепочку микро-гетеропереходов в виде CdTe-CdO-CdTe-... ($E_{g,CdTe} = 1.60 \text{ эВ}$, $E_{g,CdO} = 2.18 \text{ эВ}$). Из рисунка также интересно заметить, что вклад в генерации $U_{\text{АФН}}(\lambda)$ коротковолнового крылья спектра от точки М заметно меньше, чем вклада длинноволнового крылья. Это и есть проявление асимметричности барьерных областей с двух сторон границы раздела микро-гетероперехода CdTe-CdO: линейный размер области CdO существенно меньше размера CdTe. Спектральное положение точки М практически не зависит от деформации и концентрации точечных дефектов. А это объясняется тем, что пограничный слой CdTe-CdO является плавным, т.е. варизонным микро-гетеропереходом. Дальнейшие результаты исследования также показали, что тензочувствительность пленок CdTe:Sn имеет максимум вблизи края собственного поглощения. Наблюдается хорошая корреляция между спектральными и оптическими характеристиками.

До сих пор мы рассматривали фото-тензоэлектрические свойства косонапыленных поликристаллических пленок, где наряду с асимметричностью межграницных потенциальных барьеров ещё потребовалось, чтобы толщина пленок была достаточно тонкая $d \leq 1 \text{ мкм}$. Известно, что с ростом толщины при $d \geq 5 \text{ мкм}$ АФВ свойства таких пленок практически исчезают, и они приобретают существенной электропроводностью подобно массивным материалам. Тензорезистивные эффекты в толстых полупроводниковых пленках достаточно хорошо изучены. Однако фотоэлектрические явления в таких пленках, происходящие при одновременном воздействии механической деформации до сих пор практически не исследовались.

Для получения пленок $CdSe_xS_{1-x}$ собрана вакуумная установка на основе механического форвакуумного насоса и паромасляного диффузионного насоса, который обеспечивает давления порядка $\sim 10^{-2} \text{ Па}$. В качестве испарителя использованы тигли из окиси алюминия. Температура испарения полупроводника достигалась конструкцией тигля и регулированием тока в пределах $750\text{-}800 \text{ }^\circ\text{C}$. Подложка из стекла или слюды очищали путем обработки в кипящем 0,5%-ном растворе азотной кислоты, затем обезжиривали в ацетоне и многократно кипятили в дистиллированной воде. После достижения вакуума $\sim 10^{-2} \text{ Па}$ производили обезгаживание подложек путем нагрева при температуре 300°C в течение 30 минут. В качестве исходного материала использовали порошкообразные $CdSe$ и CdS марки "для полупроводников". Пленки $CdSe_xS_{1-x}$ получали испарением смеси $CdSe$ и CdS в различных соотношениях. Для сохранения состава шихты и начального потока испаряемого материала перед испарением шихты отжигали в режиме испарения в течение 20-25 минут. Нам удалось получить слои в широком диапазоне толщин (5-20 мкм) и при высоких температурах подложки ($\sim 400^\circ\text{C}$). Ниже рассмотрим фото-тензоэлектрические свойства

пленок $CdSe_{0.8}S_{0.2}$, которые легко регулируются в широком диапазоне скорости конденсации, температуры подложки, времени ТО.

Кривые спектральных зависимостей $\sigma_{\text{фп}}(h\nu)$ для свежеприготовленных пленок с температурой подложки $T_n=723\text{ K}$ и кратностью фоточувствительности $S=\sigma_{\text{фп}}/\sigma_{\text{тем}}\approx 10^2$, измеренные при температуре 300 K (крестики)¹, представлены на рис.12. Проводилось сопоставление экспериментальных результатов с теоретическими кривыми, рассчитанными по формуле Луковского

$$\sigma_{\text{ион}} = \frac{16\pi e^2 \hbar m^*}{3cn} \left(\frac{E_{\text{эфф}}}{E_0} \right)^2 E_{\text{онм}}^{1/2} (h\nu - E_{\text{онм}})^{3/2} (h\nu)^{-3}, \quad (7)$$

где $E_{\text{эфф}}/E_0$ – коэффициент кристаллического поля, m^* – эффективная масса связанного на центре электрона, n – показатель преломления вещества, $\sigma_{\text{ион}}$ и $E_{\text{онм}}$ – сечение и энергия оптической ионизации центра. При этом считается, что для заданной частоты света примесная удельная фотопроводимость $\sigma_{\text{фп}}$, пропорциональна сечению фотоионизации $\sigma_{\text{ион}}$ рассматриваемого примесного центра. Графическим анализом экспериментальных и теоретических спектров установлено, что имеются глубокие уровни с энергией активации: $E_v+(0,63\pm 0,02)$, $E_v+(0,8\pm 0,02)$, $E_v+(0,92\pm 0,02)$, $E_c-(0,55\pm 0,02)$ и $E_c-(0,41\pm 0,02)$ эВ. При кратковременной ТО ~4 мин на воздухе в присутствии $CdCl_2$ кратность достигает до значений $S\approx 10^4$ и в спектре фотопроводимости отчетливо проявляется дополнительный уровень $E_c-(0,24\pm 0,02)$ эВ или тоже самое, что $E_v+(1,46\pm 0,02)$ эВ у дна зоны проводимости. В данном случае диссоциированные атомы меди и хлора диффундируют в объем кристаллитов и межкристаллитные области пленки. Поскольку ковалентный радиус меди меньше радиуса

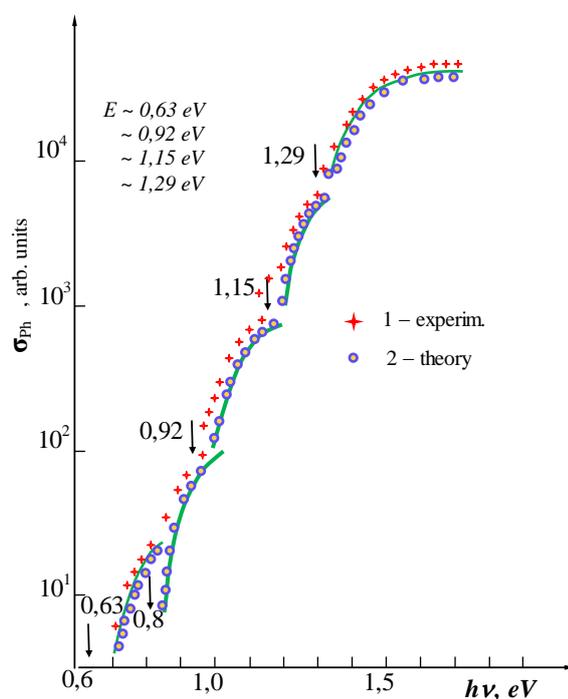


Рис. 12. Спектральная зависимость $\sigma_{\text{фп}}$ свежеприготовленных пленок $CdSe_{0.8}S_{0.2}$. Точки 2 получены путем вычитания теоретически рассчитанных сплошных кривых из экспериментальных данных 1. Стрелки на рисунке указывают значение энергии оптической ионизации глубокого центра, использованное при расчете теоретических кривых.

¹ Экспериментальные спектры фотопроводимости $\sigma_{\text{фп}}$ снимались в Вильнюсском университете имени В.Капсукаса.

кадмия, то атом меди замещает в узле решетки атом кадмия. Атомы хлора ускоряют этот процесс, так как, реагируя с кадмием, приводят к увеличению концентрации вакансий кадмия, и атомы меди легче занимают эту вакансию. Это приводит к образованию компенсирующего акцепторного уровня $E_v + (0,66 \pm 0,02) \text{ эВ}$ и к увеличению его концентрации, что определяет увеличение фоточувствительности.

Наиболее существенное влияние механических деформаций на свойства фоточувствительных образцов обнаружено у плёнок из твердого раствора $\text{CdSe}_{0.8}\text{S}_{0.2}$ с температурой отжига $T_{\text{отж}} \geq 750 \text{ К}$. Поэтому плёнки из $\text{CdSe}_{0.8}\text{S}_{0.2}$, изготовленные двухстадийной термообработкой и активированные в газовой среде галоидов, подвергали к деформации растяжения и сжатия в диапазоне от $\varepsilon = -3 \cdot 10^{-3}$ до $\varepsilon = +3 \cdot 10^{-3}$ отн. ед. при одновременном действии естественного света лампы накаливания в пределах интенсивности $L = 0 - 10^3$ лк. Оказалось, что при освещенностях $L \geq 10^4$ лк тензочувствительность пленки практически исчезает.

На рис.13 показаны деформационные характеристики плёнки $\text{CdSe}_{0.8}\text{S}_{0.2}$ при $L=0$ (кривая 1') и $L \approx 10^2$ (1) лк. Видно, что КТЧ пленки, как в темноте, так и под освещением, при деформации одностороннего растяжения существенно выше ($K \approx 200$), чем при деформации сжатия ($K < 100$), что обусловлено с наличием внутренних механических напряжений сжатия в системе пленка-подложка. Более того, деформационная характеристика фототока при $L < 10^2$ лк в случае деформации сжатия всегда сублинейная ($K_{\text{св}} < K_{\text{тем}}$), а в случае растяжения сублинейная зависимость в области малых значений $\varepsilon < 10^{-3}$ ($K_{\text{св}} < K_{\text{тем}}$) переходит в суперлинейную зависимость при $\varepsilon > 1.5 \cdot 10^{-3}$ отн.ед., а в области $\varepsilon > 2.5 \cdot 10^{-3}$ отн.ед. даже световая тензочувствительность становится больше, чем темновой ($K_{\text{св}} > K_{\text{тем}}$). Последнее можно объяснить более сильным изменением высоты межкристаллитных (дрейфовых) барьеров за счет перезарядки поверхностных состояний и глубоких уровней в области деформации растяжения $\varepsilon \geq 1.5 \cdot 10^{-3}$ отн.ед. при небольших интенсивностях света $L \leq 10^2$ лк.

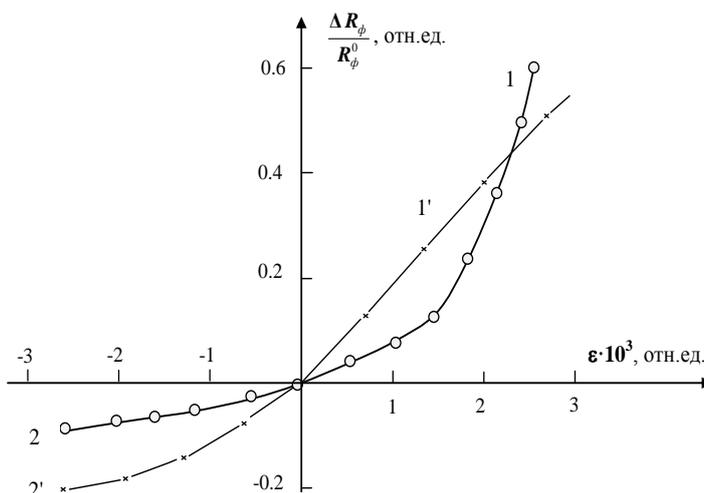


Рис.13. Деформационная характеристика $\Delta R_{\phi}(\varepsilon)/R_{\phi}^0$ пленки $\text{CdSe}_{0.8}\text{S}_{0.2}$ в пределах относительной деформации $-3 \cdot 10^{-3} < \varepsilon < +3 \cdot 10^{-3}$ отн. ед. при $L=0$ (кривая 1', 2'), $L \approx 10^2$ лк (1, 2). $T=300 \text{ К}$.

Как показывает ВАХ на рис.14, что, во-первых, полученные пленки из твердого раствора $\text{CdSe}_{0.8}\text{S}_{0.2}$ обладают достаточно высокой фоточувстви-

тельностью. При $L=2,0 \cdot 10^3$ лк кратность изменения силы тока $I_{\phi}/I_{\text{тем}}$ составляет $\sim 10^4$. Во-вторых, хотя двухступенчатый характер ВАХ сохраняется, однако механизмы переноса тока через освещенные пленки в областях $U < U_{\text{пер}}$ и $U > U_{\text{пер}}$ (см. точки пересечения прямой А'В' с кривыми 1'-3')

3') существенно изменяются по сравнению с темновой проводимостью. Из кривых 1'-3' определяем, что при $U < U_{\text{пер}}$ ВАХи описываются не омическим законом $I \sim U^{1/2}$, а при $U > U_{\text{пер}}$ носят сложный нелинейный характер ($n \neq \text{const}$), обусловленный зависимостью $\phi^{\phi}(U)$.

Феноменологически описаны обнаруженные выше фото-тензоэлектрические свойства пленок $\text{CdSe}_{0,8}\text{S}_{0,2}$ на основе барьер-ной модели электропроводности поликристаллических образцов. Считается, что падение напряжения на каждом потенциальном барьере равно U/N (N -число микро потенциальных барьеров вдоль направления тока), тогда ВАХ образца можно записать как

$$I = I_0 (\exp(eU / NkT) - 1) \exp[-e\phi / kT] \quad (8)$$

где $e\phi$ - энергетическая высота барьера. Отсюда для сопротивления образца имеем выражение

$$R = R_0 \exp \left[e \left(\phi - \frac{U}{N} \right) / kT \right] \quad (9)$$

где R_0 - сопротивление массивной сплошной пленки без барьеров.

Естественно, что при деформации растяжения увеличивается высота барьеров и наблюдается уменьшение тока через образец. Для ВАХ деформированного образца при освещении с интенсивностью L (8) и (9) можно переписать следующим образом:

$$I^{\epsilon}(L) = I_0^{\epsilon}(L) (\exp(eU / NkT) - 1) \exp[-e\phi^{\epsilon}(L) / kT] \quad (10)$$

$$R^{\epsilon}(L) = R_0^{\epsilon}(L) \exp \left[e \left(\phi^{\epsilon}(L) - U / N \right) / kT \right]. \quad (11)$$

На основе (11) можно получить общее выражение для КТЧ

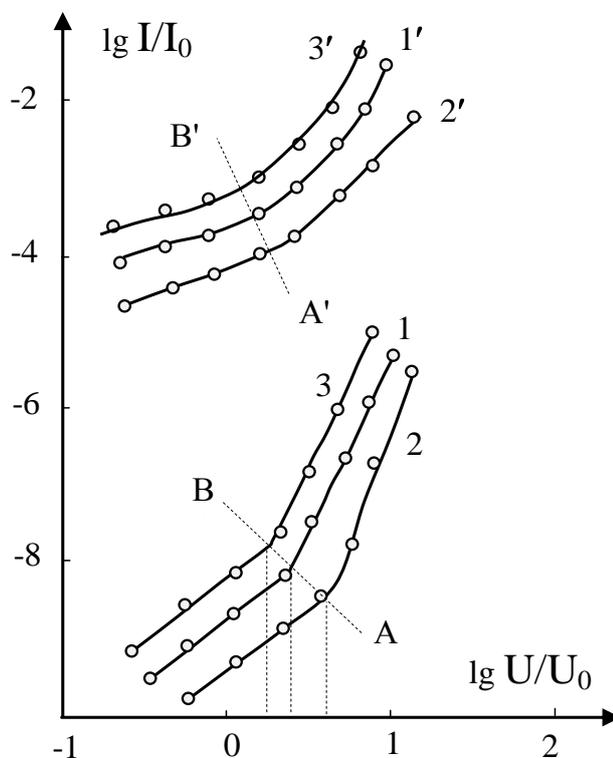


Рис.14. Темновая (кривые 1, 2, 3) и световая (1', 2', 3' при $L=2,0 \cdot 10^3$ лк) ВАХ в логарифмическом масштабах для пленок $\text{CdSe}_{0,8}\text{S}_{0,2}$ без деформации $\epsilon=0$ (1, 1') и при одностороннем растяжении $\epsilon=+3 \cdot 10^{-3}$ отн. ед. (2, 2'), сжатии $\epsilon=-3 \cdot 10^{-3}$ отн. ед. (3, 3'). $T=300$ К.

поликристаллических пленок при освещении в виде

$$K(L) = K_{\varepsilon}(L) + K_0(L) = K_0(L) \exp \left[e \left(\varphi^{\varepsilon}(L) - \varphi(L) \right) / kT \right] , \quad (12)$$

Здесь $R_0(L)$ и $R_0^{\varepsilon}(L)$ - световые сопротивления массивного сплошного образца при отсутствии и наличии механической деформации, $K_0(L) = R_0^{\varepsilon}(L) / R_0(L) \varepsilon$ - КТЧ сплошной пленки при освещении.

Из (12) видно, что КТЧ поликристаллической пленки всегда больше, чем у сплошного образца и состоит из двух вкладов, обусловленных потенциальными барьерами ($K_{\varepsilon}(L)$) и чисто объемными свойствами ($K_0(L)$).

Таким образом, исследованные в данной диссертационной работе плёночные поликристаллические структуры $CdTe$, CdS , $CdSe$ и $CdTe:Sn$, $CdSe_{0.8}S_{0.2}$ обладают в темноте достаточно высокой $K \approx 2 \cdot 10^2$ отн.ед. и стабильной тензочувствительностью. Она для образцов $CdSe_{0.8}S_{0.2}$ существенно зависит от интенсивности освещения и практически исчезает при больших $L \geq 10^4$ лк, что обусловлено подавлением её высокой фотопроводимостью. Такая вариация тензочувствительности под действием освещения из области достаточно высокой спектральной фоточувствительности позволяет сконструировать гибридных тензо-фотоэлектрических приборов на основе фотовольтаических и фотопроводящих пленок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам разработки технологии получения и исследования фото-тензоэлектрических свойств пленочных поликристаллических структур $CdTe_xSe_yS_{1-(x+y)}$ ($CdTe$, CdS , $CdSe$ и $CdTe:Sn$, $CdSe_{0.8}S_{0.2}$) можно сделать следующие **основные выводы**:

1. Разработана технология получения тонких ($d \leq 1$ мкм) фотовольтаических пленок $CdTe$, CdS и $CdSe$ на стеклянной подложке температурой $T_n = 250-350$ К в вакууме с давлением остаточных газов $P \approx 10^{-1}-10^{-2}$ Па путем порционного испарения исходного материала в 40-50 мг, обладающих линейными вольт-амперными, люкс-амперными, деформационными характеристиками, что позволяет изготовить на их основе новых пленочных фото-тензочувствительных приборов.

2. Анализом спектральных характеристик, температурных зависимостей фотонапряжения и фототока короткого замыкания при деформации показано, что за высоковольтный фотовольтаический эффект в косонапыленных пленках $CdTe$, $CdSe$ и CdS отвечают встроенные цепочки микро-фотоэлементов, представляющие асимметричных потенциальных барьеров природы микро-гетеропереходной структуры типа $CdTe-CdO-CdTe$.

3. Развита феноменологическая теория образования высоковольтной фото-ЭДС, исходящая из реальной структуры роста косонапыленной пленки с учетом асимметричных фотовольтаических свойств приповерхностных областей на границе двух соседних кристаллических зерен, которая качественно удовлетворительно согласуется с экспериментальными спектральными и люксвольтовыми характеристиками $V_{АФН}$.

4. Установлено, что с увеличением количества примеси олово от нуля до 5 атом.%, максимальное значение фотонапряжения, генерируемое пленками $CdTe:Sn$ при $T=300$ К линейно увеличивается от 400 В до 4200 В, затем медленно падает до 2000 В при значении добавки Sn в 8 атом.%. Образцы $CdTe:Sn$ толщиной $d \approx 0.8-1.0$ мкм, площадью 5×20 мм² при скорости конденсации 0.5-1.0 нм/с оказались сильно высокоомными ($R_{тем} \approx 10^{12} - 10^{13}$ Ом) и максимальные значения $U_{АФН} = (2-3) \cdot 10^3$ В/см, $I_{кз}^{\phi} \approx 10^{-9}$ А достигались без дополнительной термической обработки.

5. Показано, что типичная деформационная характеристика $V_{АФН}(\varepsilon)$ пленок $CdTe:Sn$ в пределах $-2 \cdot 10^{-3} \leq \varepsilon \leq +2 \cdot 10^{-3}$ отн.ед в отличие от $\Delta R(\varepsilon)/R_0$ пленочных фоторезисторов обнаруживает строго линейную и симметричную зависимость, обладает стабильной тензочувствительностью $K \approx (0.5-1.0) \cdot 10^2$ отн. ед. в темноте, которая увеличивается с ростом интенсивности света L , причем фотонапряжение при сжатии уменьшается, а при растяжении – растет.

6. Установлено, что свежеприготовленные пленки твердого раствора $CdSe_{0.8}S_{0.2}$ с толщиной $d \sim 10.0-15.0$ мкм и площадью 5×20 мм² оказались низкоомными с электронной проводимостью, на электронно- и рентгенограммах которых наблюдались явная поликристаллическая

структура и рефлекс избыточного кадмия с энергией активации $\sim 0,6 \pm 0,02$ эВ, типичного для доноров в монокристаллах $CdSe$.

7. Показано, что при термической обработке пленок $CdSe_{0,8}S_{0,2}$ на воздухе в присутствии паров $CdCl_2$ в течение ~ 4 минут кратность фоточувствительности достигает до значений $S \approx 10^4$, обусловленная глубокими уровнями комплекса атома хлора и вакансией кадмия с энергией активации $E_v + (0,42 \pm 0,02)$ эВ, вакансия кадмия с уровнем $E_v + (0,63 \pm 0,02)$ эВ, центра быстрой рекомбинации $E_v + (0,92 \pm 0,02)$ эВ, а также комплекса вакансия селена и кадмия с уровнем прилипания $E_c - (0,19 \pm 0,02)$ эВ.

8. Доказано, что тензочувствительность плёнок из твердого раствора $CdSe_{0,8}CdS_{0,2}$ в темноте достаточно высокая $K \approx 2 \cdot 10^2$ отн. ед. и с увеличением интенсивности освещения падает, а при больших интенсивностях $L \geq 10^4$ лк практически исчезает, что обусловлено подавлением её высокой фотопроводимостью образцов. Такая вариация тензочувствительности под действием освещения из области достаточно высокой спектральной фоточувствительности позволяет сконструировать гибридных фото - тензоэлектрических преобразователей на основе этих пленок.

**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

RAKHMONOV TOHIRBEK IMOMALIYEVICH

**TECHNOLOGY AND PHOTO-TENSOELECTRIC PROPERTIES OF
FILM POLYCRYSTALLINE STRUCTURES $\text{CdTe}_x\text{Se}_y\text{S}_{1-(x+y)}$**

04.01.07 - Condensed matter physics

ABSTRACT

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

Ferghana-2023

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 B2021.4.PhD/FM658.

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.ziyo.net.

Scientific supervisor:

Yuldashev Nosirjon Khaydarovich
doctor of Physical and Mathematical, professor

Official opponents:

Nuriddinov Izzatillo
doctor of Physical and Mathematical, professor

Gulyamov Gafur
doctor of Physical and Mathematical, professor

Leading organization

Scientific-research Institute of Semiconductor Physics and Microelectronics at the National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek

The defense of the doctoral dissertation will be held on "16" 09 2023 at 10⁰⁰ hours at a meeting of the Scientific Council PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 at the Ferghana Polytechnic Institute (Address: 150107, Ferghana, Ferghana St., house 86. Tel: (+99873) 241-12-06, fax (+99873) 241-12-06, e-mail: uzferfizika@mail.ru, small meeting room).

The dissertation can be found in the library of the institute. (registered under No. 192) (Address: 150107, Fergana, st. Fergana, house 86. Tel: (+99873) 241-12-06).

The abstract of the dissertation was distributed on "04" 09 2023.
(Registry record No. 14 dated "04" 09 2023)



Y.R Rasulov
Chairman of the Scientific Council on award of PhD scientific degree, PhD in physics and mathematics, docent

B.J. Axmadaloyev
Secretary of Scientific Council on award of PhD scientific degrees, PhD in physics and mathematics.

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 modes for obtaining film structures of different compositions $CdTe_xSe_yS_{1-(x+y)}$ by improving the method of thermal evaporation in vacuum and studying their photo-tensoelectric properties.

The objects of the research work polycrystalline films $CdTe$, $CdSe$, CdS , $CdTe:Sn$ and $CdSe_xS_{1-x}$, obtained on the surface of regular glass by the method of thermal vacuum evaporation, were chosen..

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

- for the first time, a technology was developed for obtaining photovoltaic films of $CdTe$, $CdSe$ and CdS on a glass substrate with $T_s=250-350 K$ by batch evaporation of the starting material 40-50 mg in vacuum $P \approx 10^{-1}-10^{-2} Pa$. An analysis of the temperature dependence of the photovoltage and short-circuit photocurrent spectra during deformation shows that the built-in chains of asymmetric potential barriers of the $CdTe-CdO-CdTe$... type are responsible for the high-voltage photovoltaic effect;

- a phenomenological theory of the formation of a high-voltage photo-EMF has been developed, based on the real structure of the growth of an obliquely deposited film, taking into account the asymmetric photovoltaic properties of near-surface regions at the boundary of two adjacent crystal grains, which qualitatively agree satisfactorily with the experimental spectral and luxvolt characteristics U_{AFV} ;

- it was found for the first time that for high-resistance ($R_{tem} \approx 10^{12} - 10^{13} Om$) $CdTe:Sn$ films with a thickness of $d \approx 0.8-1.0 \mu m$, with an increase in the amount of Sn from 0 to 5 atom.% at $T = 300 K$, the value U_{AFV} increases from 400 to 4200 V, then slowly drops to 2000 V with an addition of 8 at.% Sn , their deformation characteristic $V_{AFV}(\epsilon)$ within $-2 \cdot 10^{-3} \leq \epsilon \leq +2 \cdot 10^{-3}$ rel.unit reveals a linear dependence and has a stable strain sensitivity;

- it was shown that freshly prepared $CdSe_{0.8}S_{0.2}$ films with a thickness of $d \sim 10.0-15.0 \mu m$ turned out to be low-resistance with electronic conductivity due to excess cadmium with an activation energy of $\sim 0.6 \pm 0.02$ eV, and after thermal treatment in air in the presence of $CdCl_2$ vapor for 4 min, a complex of a chlorine atom with a cadmium vacancy $E_v + (0.42 \pm 0.02)$ eV, a fast recombination center $E_v + (0.92 \pm 0.02)$ eV is formed. as well as a vacancy complex of selenium and cadmium with a sticking level of $E_c - (0.19 \pm 0.02)$ eV;

- it has been established that $CdSe_{0.8}CdS_{0.2}$ photoresistive films have a sufficiently high strain sensitivity $K \approx 2 \cdot 10^2$ rel. unit, which decreases with increasing illumination intensity L , and at $L \geq 10^4$ lx it practically disappears due to its suppression by the high photoconductivity of the sample, which makes it possible to design hybrid photo-strain-electric converters based on these films;

Implementation of research results. Based on the results of the development of technology and the study of the photo-tensoelectric properties of film

polycrystalline structures $\text{CdTe}_x\text{Se}_y\text{S}_{1-(x+y)}$:

- developed theoretical and experimental methods for the analysis of deformation phenomena in polycrystalline films of cadmium chalcogenides, which makes it possible to improve the technology for obtaining semiconductor photo-strain sensors by the method of thermal vacuum evaporation. April 6, 2023). Scientific results can be implemented in Uzeltekhsanoat enterprises. The application of this scientific novelty undoubtedly leads to the modernization of the method of manufacturing semiconductor film photo- and strain gauges;

- the results of the study of the photo-tensoelectric properties of polycrystalline films CdTe , CdSe , CdS , CdTe:Sn and $\text{CdSe}_x\text{S}_{1-x}$, and the method for calculating high-voltage photo-EMF in linear periodic asymmetric structures of crystalline grains were used in the implementation of the fundamental project OT-F2-70 "Effects of temperature, strain and light on the parameters of a nano-sized semiconductor in a strong electromagnetic field" (project manager prof. G. Gulyamov) (Certificate of the Namangan Civil Engineering Institute No. 06/10-09/276 dated 03.25.2023). The use of scientific results made it possible to analyze the physical mechanisms electronic kinetic phenomena in heavily doped semiconductor structures with intrinsic and impurity absorption of light.

Approbation of results of a research. The main results of the dissertation were reported and discussed at 6 international and 3 republican scientific and practical conferences.

Publication of results. Only 18 scientific papers have been published on the topic of the dissertation, of which 9 are 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, three chapters, a conclusion, a list of references from 126 titles. The dissertation text contains 136 typewritten pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; part I)

1. Tokhirbek Imomaliyevich Rakhmonov. Photosensitivity Spectra of Thin Films from a $CdSe_xS_{1-x}$ Solid Solution // Journal of Applied Mathematics and Physics. 2022. Vol.10 No.12, P.3676-3683. (JIF, IF:0.71). <https://doi.org/10.4236/jamp.2022.1012245>
2. Rakhmonov T.I., Mamadiyeva D.T., Yuldashev N.Kh. Photoelectric phenomena in thin Polycrystalline CdTe, CdSe, CdS films under mechanical deformation // European Science Review. – 2021. – No 11-12. – P. 40-49. (05.00.00, №3). (GIF, IF:1.47).
3. Nurmatov O., Rahmonov T., Sulaymonov Kh., Yuldashev N. Phototenzoelectric properties of polycrystalline films of chalcogenides of cadmium and zinc, produced by portional evaporation in vacuum // Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering. 2020. Vol. 2. Iss. 5. P.40-45. (01.00.00, №16).
4. Rakhmonov T.I., Yuldashev N.Kh. Photo-tensoelectric properties of thin polycrystalline CdTe, CdSe, CdS films obtained by portional thermal evaporation in a vacuum // Scientific-technical journal. 2021. Vol. 4. Iss. 4. P.25-34 Uzbekistan Research Online <https://uzjournals.edu.uz/ferpi/vol4/iss4/5>
5. Rakhmonov T I., Siddikov R U., Mirzaaxmedov A. Influence of mechanical deformation on the photo-voltaic properties of thin polycrystalline CdTe, CdSe, CdS films manufactured by portional evaporation in vacuum // Scientific-technical journal 2021.Vol. 4. Iss. 3. P11-21. Uzbekistan Research Online <https://uzjournals.edu.uz/ferpi/vol4/iss3/3>
6. Мамадиева Д.Т., Нурматов О.Р., Рахмонов Т.И., Сулаймонов Х.М., Юлдашев Н.Х. The effect of mechanical deformation on the photovoltaic properties of semiconductor polycrystalline film structures CdTe:Sn // Scientific-technical journal(STJ) FerPI,-Ferghana, 2019.-V.2. №3.-P.9-14. Uzbekistan Research Online <https://uzjournals.edu.uz/ferpi/vol2/iss3/1>

II бўлим (II часть; part II)

1. Рахмонов Т.И., Юлдашев Н.Х. Фотовольтаический эффект в поликристаллических пленках с асимметричными барьерами на границах зерен // Илмий–техника журнали ФарПИ. 2022. Т.26, №1.С.141-144. (05.00.00, №20).
2. Рахмонов Т.И., Юлдашев Н.Х. Некоторые спектральные характеристики фотопроводимости пленок твердого раствора $CdSe_xS_{1-x}$ // Илмий–техника журнали ФарПИ. 2022. Т.26, №4.-С.169-172. (05.00.00, №20).
3. Рахмонов Т.И., Халилов М., Юлдашев Н.Х. Влияние механической деформации на фотоэлектрические свойства поликристаллических пленок

$CdSe_xS_{1-x}$ // Илмий–техника журнали ФарПИ. 2020. Т.24, №5.-С.19-23. (05.00.00, №20).

4. Мухаммадюкубов Х.Э., Сулаймонов Х.М., Рахмонов Т.И., Юлдашев Н.Х. Фото– и тензоэлектрические свойства тонких поликристаллических пленок CdTe, CdSe, ZnTe на прозрачных диэлектрических подложках, полученных методом дискретного испарения в вакууме // General question of world science Collection of scientific papers on materials VII International Scientific Conference-Brussel, 2019.-С.42-48.

5. Маматов О., Нурматов О.Р., Рахмонов Т.И., Юлдашев Н.Х. Фото– и тензоэлектрические свойства тонких пленок халькогенидов кадмия, полученных методом порционных испарений в вакууме // «Оптика неоднородных структур 2019» V международная Научная конференция-Могилев, 2019.-С.241-247.

6. Mamatov O. M., Nurmatov O. R., Rahmonov T.I., Sulaymonov Kh. M., Umarov A. O., Yuldashev N. Kh Photo– and Thenzoelectric Properties of Thin Cadmy Halcogenide Films Obtained by Portional Vaporium Vacuum Method // International Congress of The Turkic World on Health and Natural Sciences-Osh, 2019.-P.258-259.

7. Рахмонов Т.И., Мирзаев В., Нурматов О.Р., Сулаймонов Х.М., Юлдашев Н.Х. Спектральные характеристики фотопроводимости пленок $CdSe_xS_{1-x}$ // «Фотоэнергетикада наноструктурали яримўтказгич материаллар» III халқаро илмий анжуман. Тошкент, 2022.-С.304-307.

8. Рахмонов Т.И., Мамадиева Д.Т., Сулаймонов Х.М., Юлдашев Н.Х. Фотовольтаический эффект в поликристаллических пленках с асимметричными барьерами на границах зерен // «Фан, таълим ва техникани инновацион ривожлантириш масалалари» Халқаро илмий-амалий онлайн анжуман. Андижон, 2022.-С.21-24.

9. Рахмонов Т.И., Сулаймонов Х.М., Султанов Н.А., Юлдашев Н.Х. Изучение радиационных дефектов, А – и Е – центров в теллуриде кадмия с помощью пьезоемкостной спектроскопия // «Тенденции развития физики конденсированных сред».-Фергана, 2021.-С. 8-11.

10. Нурматов О.Р., Рахмонов Т.И., Сулаймонов Х.М., Юлдашев Н.Х. Фото-тензоэлектрические свойства поликристаллических пленок халькогенидов кадмия и цинка, изготовленных порционным испарением в вакууме // “Тенденции развития современной физики полупроводников: проблемы, достижения и перспективы” Сборник материалов международной онлайн конференции-Ташкент, 2020.-Ч.1.-С.117-124.

11. Рахмонов Т.И., Юлдашев Н.Х. Фотоэлектрические свойства поликристаллических пленок из твердых растворов $CdSe_xS_{1-x}$ под действием механической деформации // Материалы международной конференции «Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниковых микро-и наноструктурах».-Фергана, 2020.-С115-117.

12. Нурматов О.Р., Рахмонов Т.И., Сулаймонов Х.М., Юлдашев Н.Х. Фото-тензоэлектрические свойства поликристаллических пленок твердых растворов $CdSe_xS_{1-x}$ // Республика илмий услубий анжуман «Замонавий

микроэлектрониканинг ривожланишида фан, таълим ва инновация
интеграцияси».-Андижон, 2020.-С.68-70.

Ilmiy rahbar

N.X.Yuldashev.

Talabgor

T.I.Raxmonov.

Avtoreferatning o'zbek, rus va ingliz tillaridagi nusxalari Farg'ona politexnika instituti muassisligidagi **"Scientific technical journal"** jurnal tahririyatida tahrirdan o'tkazildi (31.09.2023 y.).

Bosishga ruxsat etildi: 2023 y. Nashriyot bosma tabog'i-3,5.
raqamli bosma usuli. Times garniturası.
Shartli bosma tabog'i-1,75. Bichimi 64x108 1/16. Adadi 60.

"ALPHA BRAND" MCHJ
150107. Farg'ona shahar, Farg'ona ko'chasi 86-uy