

**ФАРҒОНА ПОЛИТЕХНИКА ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ФИЗИКА-
МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАСИНИ БЕРУВЧИ PhD.03/27.02.2020.ФМ.106.01 РАҚАМЛИ
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ФАРҒОНА ПОЛИТЕХНИКА ИНСТИТУТИ

МАМАТОВ ОЛМОСБЕК МАҲАММАТДОВИДОВИЧ

**n-CdS/p-CdTe АСОСИДА ФОТОВОЛЬТАИК ЮПҚА ПАРДАЛИ
СТРУКТУРАЛАР ОЛИШ ТЕХНОЛОГИЯСИНИ ИШЛАБ ЧИҚИШ ВА
ФИЗИК ХОССАЛАРИНИ ТАДҚИҚ ЭТИШ**

01.04.07 – Конденсирланган ҳолат физикаси

**Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси
АВТОРЕФЕРАТИ**

Фарғона-2021

УДК: 538.911, 935, 958, 975

**Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD)
диссертацияси автореферати мундарижаси**

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

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

Маматов Олмосбек Махамматдовидович

n-CdS/p-CdTe асосида фотовольтаик юпқа пардали структуралар олиш
технологиясини ишлаб чиқиш ва физик хоссаларини тадқиқ этиш 3

Маматов Олмосбек Махамматдовидович

Разработка технологии и исследование физических свойств
фотовольтаических пленочных структур на основе *n-CdS/p-CdTe* 27

Mamatov Olmosbek Mahammadovich

Development of technology and research of physical properties of photovoltaic
film structures on a basis *n-CdS/p-CdTe*51

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ

List of published works..... 55

**ФАРҒОНА ПОЛИТЕХНИКА ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ФИЗИКА-
МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАСИНИ БЕРУВЧИ PhD.03/27.02.2020.ФМ.106.01 РАҚАМЛИ
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ФАРҒОНА ПОЛИТЕХНИКА ИНСТИТУТИ

МАМАТОВ ОЛМОСБЕК МАҲАММАТДОВИДОВИЧ

**n-CdS/p-CdTe АСОСИДА ФОТОВОЛЬТАИК ЮПҚА ПАРДАЛИ
СТРУКТУРАЛАР ОЛИШ ТЕХНОЛОГИЯСИНИ ИШЛАБ ЧИҚИШ ВА
ФИЗИК ХОССАЛАРИНИ ТАДҚИҚ ЭТИШ**

01.04.07 – Конденсирланган ҳолат физикаси

**Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси
АВТОРЕФЕРАТИ**

Фарғона-2021

**Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (Doctor of Philosophy)
диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий
аттестация комиссиясида В2020.3.PhD/FM523 рақам билан қайд этилган.**

Диссертация Фарғона политехника институтида бажарилган.

Диссертация автореферати учта тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгашнинг веб-саҳифасида (www.ferpi.uz) ва «ZiyoNet» ахборот-таълим порталида (www.ziyounet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар: **Юлдашев Носиржон Хайдарович**
физика-математика фанлари доктори, профессор

Расмий оппонентлар: **Отажонов Салим Мадрахимович**
физика-математика фанлари доктори

Кўчқаров Қудратулла Мамарасулович
физика-математика фанлари доктори (DSc)

Етакчи ташкилот: **Андижон давлат университети**

Диссертациянинг ҳимояси Фарғона политехника институти ҳузуридаги фалсафа доктори илмий даражасини берувчи PhD.03/27.02.2020.ФМ.106.01 рақамли илмий кенгашнинг 2021 йил "___" _____ соат "___" _____ даги мажлисида бўлиб ўтади. Манзил: 150107, Фарғона ш. Фарғона к. 86 уй. Тел: (+99873) 241-12-06, факс (+99873) 241-12-06, e-mail: uzferfizika@mail.ru, ZOOM тизими орқали online.

Диссертация билан институтнинг ахборот-ресурс маркази илмий-услубий бўлимида танишиш мумкин. (№ _____ рақами билан рўйхатга олинган). Манзил: 150107, Фарғона ш. Фарғона к. 86 уй. Тел: (+99891) 328-32-69.

Диссертация автореферати 2021 йил "___" _____ куни тарқатилди.

(2021 йил "___" _____ даги _____ рақамли реестр баённомаси).

Н.А. Султанов
Фалсафа доктори илмий даражасини берувчи
Илмий Кенгаш раиси ўринбосари,
ф-м.ф.д., профессор.

Б.З. Полвонов
Фалсафа доктори илмий даражасини берувчи
Илмий Кенгаш илмий котиби, ф-м.ф PhD, доцент

Р.Я. Расулов
Фалсафа доктори илмий даражасини берувчи
Илмий Кенгаш қошидаги илмий семинар
раиси, ф-м.ф.д., профессор.

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертациясининг аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳон энергетикасида кремний пластинкали модулларга альтернатива тариқасида юпқа пленкали Қуёш элементларини тайёрлаш технологияси тез ривожланиб бормоқда. Ҳозирги кунда юпқа пленкали Қуёш модулларини ишлаб чиқаришда ишлатилаётган поликристалл CdTe материали келажаги энг порлоқ фотоэлектрик материал ҳисобланади. Пленкали n-CdS/p-CdTe гетероструктура асосидаги Қуёш элементларининг лаборатория намуналарида фойдали иш коэффициентининг максимал қиймати AM1.5 Қуёш нурланиши шароитида 22,1% ни ташкил этмоқда¹. Бу эса ушбу структуралардаги назарий фойдали иш коэффициентининг деярли 2/3 қисмини ташкил этади холос. Шу сабабдан CdTe модулларнинг самарадорлигини ошириш ўта долзарб илмий-техникавий масала ҳисобланади. Фотоўзгартириш самарадорлигини орттириш мақсадида Қуёш нурланишининг қайтиши, ютилиши ва технологиянинг такомиллашмаганлиги билан боғлиқ йўқотишларни камайтириш, шунингдек, Қуёш элементларининг энг муҳим характеристикалари бўйича чуқурроқ тадқиқотлар олиб бориш муҳим аҳамият касб этмоқда.

Дунёдаги етакчи илмий марказларда асосий эътибор поликристалл CdTe пленкалар асосида Қуёш элементлари олиш технологиясини ишлаб чиқиш ва уларда ток ўтиш механизмларини ўрганишга йўналтирилган илмий-тадқиқот ишларига қаратилган юпқа пленкали CdTe-Қуёш элементларини олиш технологиясини такомиллаштириш ва физик характеристикаларини янада чуқурроқ ўрганиш Қуёш энергетикасининг долзарб ва ечими кутилаётган вазифаси бўлиб қолмоқда. Бунда майда донли CdTe поликристалл пленканинг электрик, фотоэлектрик ва оптик хусусиятларининг шаклланишида кристалл донлар оралиқ чегаралари, сирт олди ва ички соҳалари аралашма-нуқсонли таркибларининг ролини тадқиқ этишга алоҳида эътибор берилмоқда.

Республикамызда фундаментал ва амалий тадқиқотларнинг долзарб устувор илмий йўналишларига, чунончи қайта тикланувчи энергия манбаларидан фойдаланиш соҳасидаги инновацион технологиялар ва ишланмаларга муҳим эътибор қаратилмоқда. Бу борада поликристалл CdTe пленкалар олиш технологиясини такомиллаштириш ва уларнинг физик хоссаларини тадқиқ этиш бўйича маълум натижаларга эришилган. Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича ҳаракатлар Стратегиясига² мувофиқ илмий-инновацион ишланмаларни амалда қўллашнинг самарали механизмларини яратиш бўйича муҳим вазифалар белгилаб берилган. Шу жиҳатдан, Қуёш энергетикаси, фотоника, оптоэлектроника соҳаларида яримўтказгичлар ва юпқа пленкали

¹ <https://www.researchgate.net/publication/302502393>

² Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича ҳаракатлар стратегияси тўғрисида» ги Фармони.

яримўтказгичли структуралар технологиясини ривожлантириш ҳамда оптик параметрларини чуқур ўрганиш методларини яратиш жуда муҳимдир. Ушбу диссертация пленкали $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$ гетероструктура олишнинг янги технологиясини яратиш ва фотоэлектрик, оптик хоссаларини, шунингдек $p\text{-CdTe}$ қатлам фотолюминесценция спектрини шаклланишининг янги механизмларини тадқиқ этишга бағишланган бўлиб, унинг натижалари Қуёш элементлари, ионлаштирувчи нурланиш детекторлари, юқори кучланишли фотогенераторлар ва бошқа шу каби оптоэлектрон асбоблар технологияларини оптималлаштиришга қаратилган.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2019 йил 30 майдаги ПФ-4348 сонли "Электротехника саноатини янада ривожлантириш ва тармоқнинг инвестиция ва экспорт салоҳиятини орттириш учун қулай шарт-шароитларни яратиш бўйича қўшимча чора-тадбирлар тўғрисида"ги Фармони, 2017 йил 26 майдаги ПҚ-3012 сонли "2017-2021 йилларга мўлжалланган қайта тикланувчи энергетикани янада ривожлантириш, иқтисодиёт ва ижтимоий соҳа тармоқларида энерго-самарадорликни ошириш бўйича дастур тўғрисида"ги, 2021 йил 19 мартдаги ПҚ-5032 "Физика соҳасида илмий тадқиқотларни ривожлантириш ва таълим сифатини ошириш тўғрисида"ги қарорларида ва бошқа шунга ўхшаш меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқотлари муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотларнинг Ўзбекистон Республикаси фан ва технологияларини ривожлантиришнинг устувор йўналишларига мослиги. Диссертация Ўзбекистон Республикасида фан ва технологияларни ривожлантиришнинг III: "Энергетика, энергия ва ресурсларни тежаш, транспорт, машинасозлик ва асбобсозлик, замонавий электроника, микроэлектроника, фотоника, электрон асбобсозликни ривожлантириш" устувор йўналишларига мос келади.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Юпқа пленкали CdTe ва CdS/CdTe гетероструктуралардан фотовольтаиканинг фотоўзгартиргич материали сифатида фойдаланиш Э.А Адирович ва унинг шогирдларининг 1960 йиллардаги дастлабки ишларидан бошланган. Хорижий олимлар R.H. Bube, A. Fahrenbruch, T. Okamoto, K. Durose, M.D. Potter, M. Tuteja, Л.А. Косяченко, Г.С.Хрипунов, Ю.В.Рудь ва бошқаларнинг оригинал ишлари туфайли тез орада $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$ асосидаги юпқа пленкали Қуёш элементлари ишлаб чиқариш технологиясини оптималлаштириш ва таннархини пасайтириш учун етарлича истиқболга эгаллиги маълум бўлиб қолди. Ҳозирги кунда CdTe -Қуёш элементлари ишлаб чиқиш ва тақсимлаш тармоқларини яратиш босқичида бўлиб, «Matsushita», «First Solar», «BP Solarex» ва бошқа фирмалар иштирокида эришилган саноат ишлаб чиқариш қуввати 1,2 МВт ни ташкил этади. Бу ҳолда CdTe -Қуёш элементларининг фойдали иш коэффициенти 16% , модулда эса 9% гача етиб борган.

Пленкали CdTe ва CdS/CdTe гетероструктура асосидаги юпқа пленкали структуралар фотовольтаикасининг ривожланишига ўзбек олимларидан

Ш.М. Мирсагатов, Т.М. Разиков, Н.Х. Юлдашев ва уларнинг шогирдлари маълум даражада ҳисса қўшдилар. Чунончи, Ш.А. Мирсагатов ва бошқалар томонидан кимёвий ўтқазиш методи билан CdTe поликристалл структуралар олинган ва n-CdS/n-CdS_xTe_{1-x}/p-CdTe-гетероструктураларнинг физик хоссалари комплекс тадқиқ этилган. Т.М. Разиков ва шогирдлари кимёвий молекуляр-дастали ўтқазиш методи билан халькогенид яримўтказгичлар асосида поликристалл пленкалар олишнинг янги технологиясини яратдилар ва юпқа пленкали n-CdS/p-CdTe-Қуёш элементларининг асосий ишчи параметрларини ўргандилар. Н.Х. Юлдашев ва шогирдлари томонидан аномал фотовольтаик, фотоэлектрет хоссаларга эга бўлган майда донли CdTe:Ag, CdTe:In юпқа пленкаларни термовакуумли буғлатиш методи билан олишнинг оригинал усуллари яратилди ҳамда уларнинг паст температурали фотоўтказувчанлик ва фотолюминесценция спектрлари тадқиқ қилинди.

Кейинги пайтларда поликристалл ультра юпқа пленкали CdTe-Қуёш элементларига қизиқиш ортиб бормокда, уларнинг турғунлигини ошириш муаммоси эса материал хоссалари ва қурилма физикасини чуқур билишни талаб қилмокда. Юпқа майда донли пленкаларда кристалл донлараро чегаралар, сирт олди соҳалар, нуқтавий ва бошқа нуқсонлар электрофизик, фотоэлектрик ва оптик хусусиятларнинг шаклланишида ўта муҳим рол ўйнайди. Бироқ бу масалалар мавжуд илмий адабиётларда жуда кам ўрганилган. Ультра юпқа пленкали n-CdS/p-CdTe гетероструктура олишнинг термовакуум технологиясини оптималлаштириш ва физик хоссаларини, хусусан, уларни олиш технологиясини мақсадли такомиллаштириш ва самарадорлигини оширишга қаратилган люминесценция спектрларини ўрганиш бўйича ишлар деярли учрамайди,

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация иши Фарғона политехника институтида фундаментал илмий лойиҳалар, хусусан, 2000-2004 йиллар учун ЎзР ФТДҚ Фундаментал тадқиқотлар фондининг «Ярим ўтказгич кристаллар ва квант-ўлчамли структураларнинг фотоқўзғатиш ва ионлар каналланишидаги экситон-поляритон люминесценцияси» № 10/2000 Гранти, 2007-2008 йиллар учун Ўзбекистон Фанлар Академияси тадқиқотларни қўллаб-қувватлаш жамғармасининг 80-06 сонли Гранти, 2012-2013 йиллар учун "Квант алоқа каналларини ташкил этишнинг поляритон тамойили" ККРНТ 28-сонли шартномаси бўйича грантлар доирасида бажарилган.

Тадқиқот мақсади фоторезистив ва фотовольтаик хусусиятларга эга бўлган пленкали n-CdS/p-CdTe гетероструктура олишнинг термовакуумли технологиясини ишлаб чиқиш ва фаол p-CdTe қатламнинг фотоэлектрик, оптик хусусиятларини тадқиқ этишдан иборат.

Қўйилган мақсадга мувофиқ қуйидаги асосий **вазифалар** ҳал қилинди: аномал фотовольтаик хоссага эга бўлган майда донли CdTe:In пленка ва n-CdS/p-CdTe пленкали гетероструктура олишнинг термовакуум технологиясини ишлаб чиқиш;

n-CdS/p-CdTe гетероструктура кристалл донларини субструктуравий параметрларининг рентгеноструктуравий ва электрон-микроскопик тадқиқот-ларини ўтказиш;

n-CdS/p-CdTe гетероструктурадаги фотовольтаик p-CdTe пленканинг электрофизик ва фотоэлектрик хоссаларини таҳлил қилиш;

n-CdS/p-CdTe гетероструктурадаги фотовольтаик p-CdTe қатламнинг паст температурали фотолюминесценция спектрини фоторезистив n-CdS қатламини қўшимча ёритиш билан ва унингсиз тадқиқ этиш.

Тадқиқот объекти вакуумда термик буғлатиш методи билан олинган майда донли CdTe:In поликристалл пленкалар ва юпка пленкали n-CdS/p-CdTe гетероструктуралардан иборат.

Тадқиқот предмети бўлиб юпка пленкали CdTe:In, n-CdS/p-CdTe структуралар олишнинг термовакуум технологик жараёнлари ва уларда кечадиган электрофизик, фотоэлектрик, оптик ҳодисалар хизмат қилади.

Тадқиқот усули. Қўйилган масалаларни ечиш учун юпка яримўтказгич пленкалар олиш технологиясининг замонавий термовакуум методикаси, рентгеноструктуравий ва электрон-микроскопик тадқиқот усуллари, вольт-ампер, люкс-ампер, люкс-вольт характеристикалар олиш бўйича маълум ўлчаш методикалари, шунингдек, яримўтказгич материалларни тадқиқ қилишнинг фотоэлектрик, оптик-спекроскопик усуллари жалб қилинган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагича:

вакуумда термик буғлатиш методи билан легирланмаган намуналарга нисбатан қисқа туташув токини икки тартибда, аномал фотокучланиш қийматини бир тартибда орттириш имконини берадиган майда донли фотовольтаик CdTe:In пленкани олиш технологияси ишлаб чиқилган;

пленкали n-CdS/p-CdTe гетероструктура олишнинг p-CdTe қатламнинг аномал фотокучланиш қийматини таглик томондан n-CdS қатламини хусусий ютилиш спектрал соҳасида қўшимча ёритиш билан танлаб бошқариш имконини берадиган термовакуум технологияси ишлаб чиқилган;

пленкали n-CdS/p-CdTe гетероструктурадаги p-CdTe қатламнинг вольт-ампер ва люкс-ампер характеристикаларида p-CdTe қатламини n-CdS фотоўтказувчанлиги туфайли шунтланиши орқали изоҳланадиган манфий дифференциал қаршилиқ билан боғлиқ ночизиқли соҳалар юзага келиши аниқланган;

биринчи марта n-CdS/p-CdTe гетероструктурадаги p-CdTe қатламнинг чегаравий люминесценция спектри қизил чегараси E_g га нисбатан қисқа тўлқинлар соҳасига силжиган, интенсивлиги энг катта хусусий нурланиш полосаси, унинг $LO+nLA$ -фонон қайтарилиши ва кенг сирт-интерфейс полосасидан ташкил топиши аниқланган;

илк маротаба n-CdS/p-CdTe гетероструктурада n-CdS қўшимча ёритилганда p-CdTe қатламнинг дублет структурали экситонлар ва симметрик контурли донор-акцептор жуфтлар нурланиш чизиқлари топилган ва бу p-CdTe қатламнинг майда донлилиги ҳамда аномал фотовольтаик қаршилигини n-CdS фотоўтказувчанлиги туфайли шунтланиши билан

боғлиқлиги кўрсатилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари куйидагилардан иборат:

вакуумда термик буғлатиш методи билан майда донли фотовольтаик CdTe:In пленка, фоторезистив ва аномал фотовольтаик хусусиятларга эга бўлган пленкали n-CdS/p-CdTe гетероструктура олиш технологиялари ишлаб чиқилди. CdTe:In пленка ва n-CdS/p-CdTe гетероструктура ўстиришнинг оптимал технологик параметрлари, дастлабки материал-компонентларнинг нисбий массаларини ва махсус технологик усулларни танлаш бўйича тавсиялар берилди. CdTe:In асосида фотовольтаик пленка олиш усулини ишлаб чиқишга Ўзбекистон Республикаси интеллектуал мулк Агентлигининг ихтиро учун Патенти олинди (№ IAP 05384, 28.04.2017).

Тадқиқот натижаларининг ишончлиги яримўтказгичлар физикасининг замонавий ўлчаш усулларида фойдаланилганлик ва олинган илмий натижаларни нуфузли нашрларда чоп этилган ишларнинг маълум натижаларига мослиги билан таъминланади. Юпқа поликристалл CdTe, CdTe:In пленкаларнинг ва пленкали n-CdS/p-CdTe гетероструктурадаги p-CdTe қатламнинг паст температурали фотолюминесценция спектрлари академик А.Ф. Иоффе номидаги Санкт-Петербург Физика-техника институтида ДФС-24 спектрометрида, пленкаларнинг рентгенограммалари ва сирт, кўндаланг қирқим электрон-микроскопик тасвирлари Новосибирск давлат университетида олинган.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.

Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти термовакуум буғлатиш методи билан фотовольтаик ва фоторезистив хусусиятларга эга бўлган пленкали n-CdS/p-CdTe гетероструктурани олишнинг оригинал технологик режимлари ишлаб чиқилганлиги, унинг фотолюминесценциясидаги янги спектрал чизиқлар топилганлиги ва шаклланиш механизмларини, шунингдек, фотоэлектрик характеристикаларининг ўзига хос томонларини тўғри талқин этилганлиги ва бунинг оқибатида яримўтказгичли структуралар материалшунослиги ҳамда оптик спектроскопиясининг янги имкониятлари очилиши билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти шундаки, диссертация ишининг натижалари юпқа пленкали n-CdS/p-CdTe гетероструктура асосида пленкали Қуёш элементлари, ионлаштирувчи нурланиш детекторлари, юқори кучланишли фотогенераторлар ва бошқа оптоэлектрон қурилмалар яратиш технологиясини такомиллаштиришга, хусусан яримўтказгич пленкали структураларни бузмасдан назорат ва диагностика қилишга хизмат қилади,

Тадқиқот натижаларининг жорий этилиши. Майда донли CdTe:In пленка ва n-CdS/p-CdTe пленкали гетероструктура олишнинг термовакуум технологиясини ишлаб чиқиш ва уларнинг физик хоссаларини тадқиқ этиш натижалари асосида:

CdTe:In асосида фотовольтаик пленка олиш усули ишлаб чиқилганлиги учун Ўзбекистон Республикаси интеллектуал мулк Агентлигининг ихтиро Патенти олинди (№ IAP 05384, 28.04.2017). Бу кадмий халькогенидларидан

оптоэлектроника ва гелиотехниканинг материалларини олиш технологияси соҳасида фойдаланилади. Ишлаб чиқилган технология кучланиш фотогенератори сифатида қўлланиладиган фотовольтаик пленка қувватининг уч тартибда оширилишини таъминлади;

термовакуум буглатиш методи билан фотовольтаик ва фоторезистив хусусиятларга эга бўлган пленкали $n\text{-CdS/p-CdTe}$ гетероструктурани олишнинг оригинал технологик режимлари ишлаб чиқилганлиги, унинг фотолюминесценциясида янги спектрал чизиқлар ва уларнинг шаклланиш механизмлари аниқланганлиги "Ўзэлтехсаноат" уюшмасининг "ФОТОН" АЖ да апробациядан ўтказилди (14.06.2021 даги №241-сонли маълумотнома). Олинган илмий натижалар Ўзэлтехсаноат муассасаларида қўлланилиши мумкин. Бу илмий янгиликни қўлланилиши материалшунослик фани ва яримўтказгичли структуралар оптик спектроскопияси учун янги имкониятлар очиши аниқланди.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Диссертация ишининг натижалари 8 та халқаро ва 1 та республика илмий-амалий анжуманларида маъруза қилинган ва муҳокамадан ўтган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мавзуси бўйича жами 16 та илмий иш, шу жумладан 7 та илмий мақола Ўзбекистон Республикаси олий аттестация комиссияси томонидан диссертацион ишларнинг илмий натижаларини эълон қилиш учун тавсия этилган журналларда чоп этилган.

Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши. Диссертация кириш, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхатидан иборат. Диссертациянинг ҳажми 2 та жадвал ва 42 та расмни ўз ичига олган 125 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Диссертация ишининг **Кириш** қисмида танланган мавзунинг долзарблиги ва зарурлиги қисқача асослаб берилган, унинг Республикамиз фан ва технологиялар тараққиётининг асосий устувор йўналишлари билан боғланиши аниқланган, мавзу бўйича адабиётларда мавжуд илмий ишлар таҳлил қилинган ва муаммонинг ўрганилганлик даражаси келтирилган, мақсад ва вазифалар шакллантирилган, тадқиқот объектлари, предметлари ва усуллари ойдинлаштирилган ҳамда илмий янгилиги ёритилган, олинган илмий натижаларнинг ишончлилиги асосланган, назарий ва амалий аҳамияти очиқ берилган, амалда қўлланилиши ва эълон қилиниши ҳақида маълумотлар келтирилган.

"Пленкали CdS/CdTe гетероструктуралар олиш технологияси ва фотовольтаик хоссаларини тадқиқот қилишнинг ҳозирги ҳолати" номли биринчи бобда Қуёш элементлари учун пленкали CdS/CdTe гетероструктуралар олиш технологияси масалалари бўйича мавжуд адабиётлар натижалари таҳлил қилинган, CdS, CdTe кристалларнинг зонавий структуралари ва улар асосидаги поликристалл пленкалар электр ўтказувчанлик механизмлари ҳақидаги қисқача маълумотлар келтирилган. CdS/CdTe гетероструктурадаги ток ўтишнинг маълум механизмлари, фототок ва чегаравий фотолюминесценция спектраларининг ўзига хос томонлари қараб чиқилган. Бу материалларни танқидий таҳлил этиш натижасида диссертация мақсади ва вазифалари қўйилган.

"Термовакuumли буғлатиш методи билан CdTe:In ва n-CdS/p-CdTe асосидаги фотовольтаик пленкали структуралар олиш технологиясини ишлаб чиқиш" номли иккинчи боб физик хусусиятларини тадқиқ этиш учун бурчак остида ўстирилган АФВ хусусиятли соф ва *In* билан легирланган юпқа поликристалл пленкалар ҳамда пленкали n-CdS/p-CdTe гетероструктура олишнинг термовакuum технологиясини ишлаб чиқишга бағишланган. Пленкаларда термик ишлов беришнинг фотокучланишни ошириш вақтли кинетикасига, табиати ва шаклланиш механизмига таъсири таҳлил қилинган. Бунда қўшимча ёритиш таъсирида CdS қатламнинг фотоўтказувчанлигини қўзғатиш натижасида CdTe қатламнинг АФВ хоссалари жуда сезиларли модуляцияланиши аниқланди. Шунингдек, пленкали n-CdS/p-CdTe гетеро-структурадаги CdTe қатламнинг кристалл структурасини рентгено-структуравий таҳлил ва электрон микрофотография усуллари билан тадқиқ этиш натижалари ҳам келтирилган.

Фотовольтаик CdTe:In пленка ва юпқа пленкали n-CdS/p-CdTe гетероструктура Фарғона политехника институти илмий лабораториясида ВУП-4 ва ВУП-5М вакуум қурилмалари ёрдамида вакуумда буғлатиш методи билан шиша тагликларда тайёрланган. Бучак остида ўтказилган CdTe қатламларни *In* билан легирлаш жараёни уларни 10^{-4} - 10^{-5} Torr вакуум остида кукунсимон ўта тоза CdTe ва қуйма шаклидаги In материалларини алоҳида махсус тайёрланган тигеллардан мос ҳолда 923-973 ва 573-593 K температураларда қайта-қайта буғлатиш йўли билан бевосита ўстириш

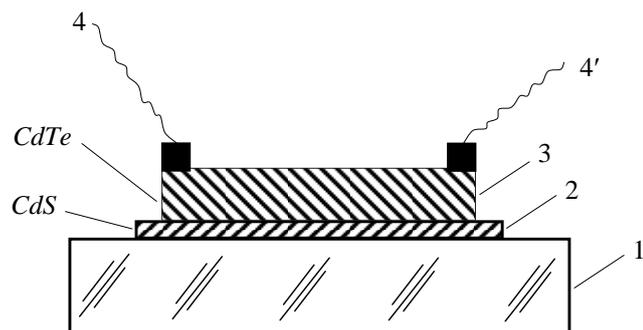
пайтида амалга оширилди.

Буғлатилаётган аралашма *In* металлининг дастлабки массаси CdTe ярим ўтказгич бирикманинг 3-7 масс. % ини ташкил этади. Асосий материалнинг буғлатилишига нисбатан *In* буғлатилиши дастлабки босқичда 2-3 минутга кечиктирилади ва охирида 3-5 минут олдин тугатилади. Шиша таглик температураси 473-523 K чегарада танлаб ўзгартирилади. Конденсация тезлиги $v_k \approx 1.0-1.5$ нм/с, чанглатиш бурчаги $\theta \approx 30-60^\circ$ қийматлар оралиғида бўлади. Янги тайёрланган CdTe:In намунанинг қалинлиги $d \approx 0.8-1.5$ мкм ва юзаси 5×20 мм² геометрик ўлчамда электр қаршилиги оз бўлиб, ўзининг АФВ хусусиятларини кучсиз намоён этди, хусусан максимал фотокучланиш $V_{АФК} = 50-100$ В ни ташкил этди холос. Бироқ вакуумда ёки тоза ҳаво атмосферасидаги берк ҳажмда 523-623 K да термик ишловдан сўнг намунанинг қаршилиги 2-3 марта ортган ҳолда, хона температурасида $(2-4) \cdot 10^3$ В гача максимал фотокучланиш генерациялади. Бу махсус легирланмаган CdTe намуналар берадиган фотокучланиш ($V_{АФК} = 200-400$ В) дан деярли бир тартибда катта эди. CdTe:In нинг қисқа туташув токи эса соф CdTe никидан икки тартибда ортиб кетди ва $I_{к.з.} \approx 10^{-8}$ А қийматгача етиб борди. Қиздирилган CdTe:In пленкаларнинг электрофизик ва АФВ хоссалари сезиларли даражада турғунлашди.

Сезиларли АФВ хусусиятга эга бўлган кескин чегарали n-CdS/p-CdTe гетероўтишни илгари маълум бўлган термовакуум буғлатиш усуллари ёрдамида олиш яроқсиз бўлиб чиқди. Бундай усуллар билан фотоўтказувчан CdS қатлами устида ўстирилган CdTe қатлам аксарият ҳолларда сезиларли АФВ хоссага эга бўлмади. Шу нарса маълум бўлдики, АФВ хоссали n-CdS/p-CdTe гетеросистема тайёрлаш учун қатламларнинг нисбий қаршиликлари, кристалл донларнинг ўсиш йўналишлари ва қалинликлари ҳал қилувчи омиллардир. Узоқ изланишлардан сўнг қуйидаги оптимал технологик шарт-шароитлар танлаб олинди.

1-расмда схематик тасвирланган гетероструктура шаффоф шиша таглик устига қолдиқ газлар босими $10^{-4}-10^{-5}$ Торр бўлган вакуумда “яримўтказгичлар учун” маркали кукунсимон CdS ва CdTe материалларни ягона технологик цикл жараёнида ўзига хос кетма-кет буғлатиш усули билан шакллантирилди.

Дастлаб 573 – 723 K температурали таглик сиртига $\alpha = 60-80^\circ$ бурчак остида махсус маска ёрдамида 20×5 мм² юзачали ва 0,2-0,4 мкм қалинликдаги CdS қатлами ўтқазилди. Сўнгра унинг сезгирлигини ошириш учун вакуумда $T = 773-823$ K



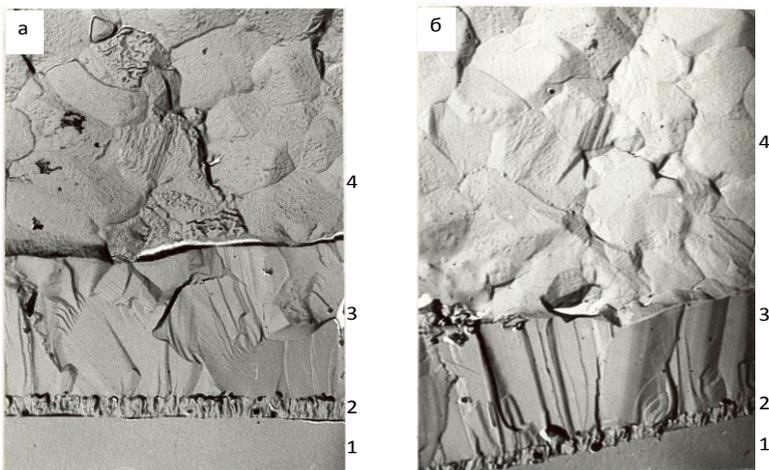
1-расм. Шаффоф шиша (1) тагликдаги пленкали n-CdS/p-CdTe гетероструктуранинг схематик кўриниши: 2-CdS фото-резистор, 3-CdTe фотовольтаик қатлам, 4-ток олинадиган омик контактлар.

температура интервалида 10-15 мин давомида қиздириш жараёни олиб борилди. Электрон ўтказувчанликдаги CdS пленканинг қоронғуликдаги қаршилиги $R \approx 10^{12}$ Ом, ёруғлик таъсирида ўзгариш даражаси эса $K = R_{\kappa} / R_{\epsilon} \approx 10^2 - 10^3$ нисб. бирл. гача етиб борди.

Структурани ўстиришнинг иккинчи босқичида эришилган вакуумни бузмасдан фоторезистив CdS пленка сиртига яна маска орқали бевосита *p*-CdTe қатлам (3) $d_{nl} = 0,5 - 0,8$ мкм қалинликда, $v_{\kappa} \approx 1,5 - 2,0$ Å/с тезликда, $\alpha = 130 - 150^\circ$ бурчак остида ва тагликнинг $T_n = 423 - 573$ K температурасида ўтказилди. Шу сабабли юпқа сэндвич қатламлар олишнинг биз таклиф этган оптимал технологик шартларига биноан CdS ва CdTe молекуляр дасталарнинг йўналишлари $\Delta\alpha \approx 70 - 90^\circ$ бурчакка фарқ қилган.

Баён қилинган технологик усул бўйича тайёрланган фотоприемник тўлқин узунлиги $600 \leq \lambda \leq 800$ нм интервалда ва интенсивлиги $L \approx 10^5$ лк бўлган ёруғлик билан фронтал ёритилганда хона температурасида $V_{AFH} \approx 200$ В гача фотокучланиш генерация қилди. Яна энг муҳими шундаки, гетероструктура $\lambda < 500$ спектрал соҳада атиги $L_{nc} \approx 1$ лк билан орқадан (яъни таглик томондан) кўшимча ёритилганда V_{AFK} сезиларли камаяди, $L_{nc} \approx 10^5$ лк да эса деярли йўқолиб кетади.

Электрон-микроскопик тадқиқот натижалари пленкани қиздириш кристаллитлар ўлчамларининг ўзгаришига олиб келишини кўрсатди. 2-расмдаги *n*-CdS/*p*-CdTe гетероструктуранинг кўндаланг қирқим электрон микрофотографиясидан кўринадики, термик ишловдан сўнг донларнинг ўлчамлари бошқа донлар ҳисобига катталашиши, чегараларнинг текисланиши ва чок бурчакларининг мувизонатга томон силликланиши



2-расм. Пленкали *n*-CdS/*p*-CdTe гетероструктура кўндаланг қирқимининг электрон микрофотографияси. а- $T_n = 250^\circ C$; б- $T_n = 350^\circ C$. 1- шиша таглик; 2- CdS қатлам; 3- CdTe қатлам, 4- унинг сирти.

кузатилади. $T_n = 523$ K да олинган пленкада дон ўлчамининг ўртача қиймати 1200 нм тартибида, $T_n = 623$ K даги пленка учун-1600 нм. Бу пленкаларда айрим донларнинг ўлчамлари 1,5-2 мкм ни ташкил этади. Пленка кўндаланг тузилишидан кўринадики, устунсимон структура қалинлик бўйлаб тўлик ёйилган. Бироқ таъкидлаш жоизки, фрактограмма бўйича визуал кузатишда кўндаланг тузилиш монолит кўринсада, ҳақиқатда эса рентгеноструктуравий таҳлил натижаларига кўра рентген нурларининг когерент сочилиш соҳаларини ўртача қийматлари анча кичик.

«Фотовольтаик n-CdS/p-CdTe пленкали структуралар электрофизик ва фотоэлектрик хоссаларини тадқиқ этиш» деб номланган учинчи бобда тайёрланган кўндаланг фотоўтказувчанликли CdTe:In ва n-CdS/p-CdTe пленкали структуралар электрофизик ва фотоэлектрик хусусиятларини ўрганиш бўйича эксперимент натижалари келтирилган. Олинган структураларнинг қоронғулик ва ёритилган пайтдаги ВАХ, ЛАХ ва ЛВХ ларидаги баъзи ўзига хосликлари пленкаларда кучли шаклланган потенциал тўсиқлар ва нуқтавий хусусий нуқсонлар билан алоқадорлиги ўрнатилган. n-CdS/p-CdTe гетеросистемадаги p-CdTe қатламнинг ёруғликдаги ВАХ n-CdS қатламни частотаси $h\nu \geq 2,52$ эВ ва интенсивлиги $L_{\text{пс}} < 100$ лк бўлган ёруғлик билан қўшимча ёритилганда учта характерли соҳалардан ташкил топиши аниқланди. Бунда қўшимча ёритиш интенсивлиги ортиши билан ночизикли ўтиш соҳаси торайиб, 1000 лк дан юқори қийматларда иккинчи чизикли соҳа билан биргаликда йўқолиб кетади. Қўшимча ёритиш n-CdS/p-CdTe гетероструктурадаги p-CdTe қатламнинг ЛАХ ва ЛВХ ларига ҳам кучли таъсир қилади.

Текширилган CdTe, CdTe:In пленкалар ва n-CdS/p-CdTe гетероструктуранинг §2.2 да баён қилинган маълум усуллар бўйича ўлчанган асосий электрофизик параметрларининг қийматларини таққослаш 1-жадвалда келтирилган.

1-жадвал.

CdTe, CdTe:In, p-CdTe пленкаларнинг электрофизик параметрлари.

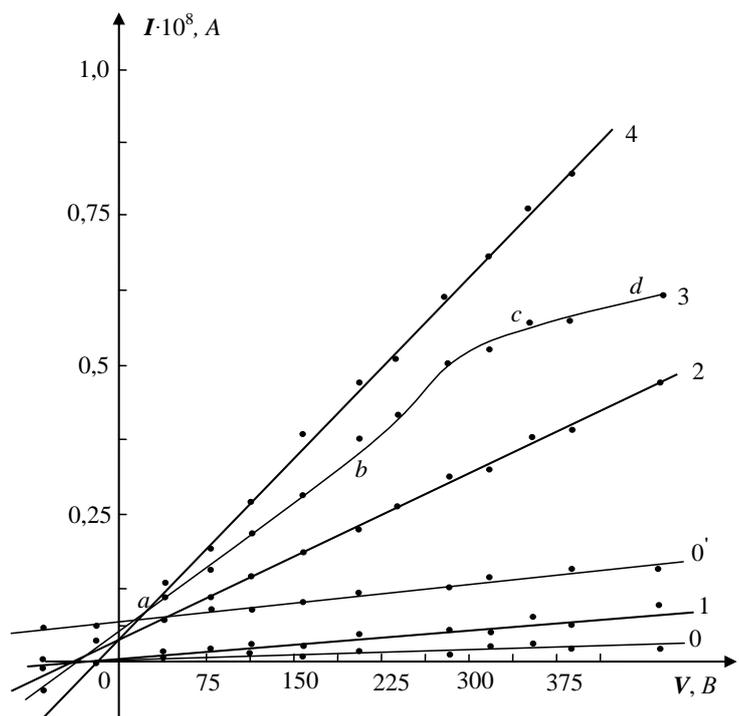
№	Пленкаларнинг электрофизик параметрлари	соф CdTe	легиранган CdTe:In		n-CdS/p-CdTe даги p-CdTe
			қиздиришсиз	Қиздиришдан сўнг	
1.	Қоронғуликдаги қаршилик - $R_{\kappa}, \text{ Ом}$	$(1.0 \pm 0.05)10^{13}$	$(2.0 \pm 0.05)10^{11}$	$(5.0 \pm 0.05)10^{11}$	$(1.0 \pm 0.05)10^{12}$
2.	Ёруғликдаги қаршилик - $R_{\beta}, \text{ Ом}$	$(2.0 \pm 0.05)10^{12}$	$(3.0 \pm 0.05)10^9$	$(2.0 \pm 0.05)10^{11}$	$(2.0 \pm 0.05)10^{11}$
3.	Қисқа туташув фототок кучи - $I_{\kappa\tau}, \text{ А}$	$(1.0 \pm 0.03)10^{-10}$	$(2.0 \pm 0.03)10^{-8}$	$(1.0 \pm 0.03)10^{-8}$	$(1.0 \pm 0.03)10^{-9}$
4.	Фото кучланишнинг максимал қиймати - $V_{\text{АФН}}, \text{ В}$	$(4.0 \pm 0.5)10^2$	$(0.6 \pm 0.1) 10^2$	$(2.0 \pm 0.1)10^3$	$(2.0 \pm 0.5)10^2$

3-расмда назорат намунаси p-CdTe (0, 0' чизиклар) ва текширилаётган n-CdS/p-CdTe гетеросистемадаги p-CdTe (1-4) қатламларнинг хона температурасида олинган қоронғуликдаги (0 ва 1) ҳамда ёритилгандаги (0'; 2-4) типик экспериментал ВАХ лари келтирилган. Илгари маълум технология бўйича шиша тагликда ўстирилган p-CdTe монокатлам $L \approx 10^5$ лк интенсивликдаги табиий ёруғлик билан ёритилганда $V_{\text{АФК}} \approx (0.4-0.6) \cdot 10^3 \text{ В}$, n-CdS/p-CdTe гетеросистемадаги p-CdTe қатлам эса айнан шундай шароитда

$V_{АФК} \approx 50-200$ В фотокучланиш генерация қилди. Расмдан кўринадик, бевосита шиша тагликдаги (0, 0') ва қўшимча ёритилмаган CdS фоторезистордаги (1, 2) АФВ р-CdTe қатламларнинг ВАХ лари чизиқли характерга эга. Бунда р-CdTe моноқатламнинг қоронғуликдаги ва $L=10^3$ лк ёруғликдаги қаршиликлари ($1.0 \cdot 10^{13}$ Ом ва $2.0 \cdot 10^{12}$ Ом) n-CdS/p-CdTe биқатламнинг ана шундай қаршиликлари ($1.0 \cdot 10^{12}$ Ом и $2.0 \cdot 10^{11}$ Ом)дан деярли бир тартибда ортиқ эканлигини қайд этишимиз зарур (1-жадвалга қаранг). Қўшимча ёритишсиз АФВ қатламдан электр токи асосан туннель механизми бўйича ўтади, чунки қисқа туташув токи $I_{кз} = V_{АФК} / R_{нл}$ кўзғатувчи ёруғлик интенсивлигининг берилган қийматида температурага боғлиқ эмас, айна пайтда фотокучланиш эса $V_{АФК} \sim R_{нл} \sim f(T)$.

n-CdS/p-CdTe гетеросистемадаги р-CdTe АФВ қатламнинг ВАХи n-CdS қатлам частотаси $h\nu \geq 2,52$ эВ ва интенсивлиги $L_{nc} \approx 30$ лк бўлган ёруғлик билан қўшимча ёритилганда учта характерли соҳадан иборат: квазичизиқли *ab* ($R \approx 5 \cdot 10^9$ Ом) ва *cd* ($1,8 \cdot 10^{10}$ Ом), ночизиқли ($3,2 \cdot 10^9$ Ом) *bc* (3-расмда 3-чизиқ). Бунда қўшимча ёритиш интенсивлиги ортиши билан ночизиқли *bc* ўтиш соҳаси торайиб, 10^3 лк дан юқори қийматларда иккинчи чизиқли *cd* соҳа билан биргаликда йўқолиб кетади, n-CdS қатлам фотовольтаик р-CdTe қатламини тўлиқ шунтлайди ва системанинг ВАХ тўлиқ n-CdS қатлам фототоки билан аниқланади. Ночизиқли *bc* ва чизиқли *ab, cd* (оғиш бурчаги турлича) ВАХ соҳаларининг вужудга келиш сабаби қўшимча ёритиш ва ташқи кучланиш таъсирида система орқали ток ўтиш жараёнидаги n-CdS/p-CdTe гетероўтишнинг қўшган ҳиссасининг ўзгаришидир.

Поликристалл n-CdS/p-CdTe гетеросистеманинг эквивалент чизиқли электр схемасини кўндаланг фотоўтказувчанлик режимида қуйидагича тасаввур қиламиз. Микро-фотовольтаик ва фоторезистив элементлар гетероўтиш кўприкчалар билан биргаликда элементар берк электр занжирини



3-расм. Шиша тагликдаги (0, 0') ва олдиндан шиша тагликка ўтқазилган CdS поликристалл фоторезистордаги (1-4) АФВ р-CdTe қатламларнинг ВАХ лари. 0 ва 1 чизиқлар қоронғида, 0' ва 2-4 чизиқлар $L=3 \cdot 10^3$ лк ёритилганда, 3 ва 4 чизиқлар эса CdS ни мос ҳолда $L_{nc}=30$ лк ва $5 \cdot 10^2$ лк қўшимча ёритиш остида олинган. $T=300$ К.

ташкил этади. Даврий кетма-кет уланган бундай занжирчалар текширилаётган гетеросистеманинг чизикли эквивалент схемасини ташкил этади. Қўпол равишда бундай системадан ўтаётган ток кучи иккита ташкил этувчилар йиғиндисидан иборат деб ҳисоблаш мумкин:

$$I = I_{\text{ФВК}} + I_{\text{ФР}} = \frac{V_{\text{max}} \pm V_{\text{АФК}}}{N} \left(\frac{1}{R_{\text{ФВК}}} + \frac{1}{R_{\text{ГП}} + R_{\text{ФР}}} \right), \quad (1)$$

Бу ерда $V_{\text{вн}}$ – ташқи қўйилган кучланиш, N – АФВ қатламнинг ток ўтиш йўналиши бўйлаб жойлашган кристалл донлар сони, $R_{\text{ФВК}}$, $R_{\text{ФР}}$ и, $R_{\text{ГП}}$ – фотовольтаик p-CdTe қатлам, фоторезистор ва гетероўтишларнинг элементар қаршиликлари. Ҳақиқатдан, n-CdS қатлам қўшимча ёритилмаган $R_{\text{ГП}} + R_{\text{ФР}} \gg R_{\text{ФВК}}$ ҳолда (1) га мос равишда ВАХ тўлиғича p-CdTe қатламнинг фотоўтказувчанлиги билан аниқланади (3–расмдаги 2–чизик). Қўшимча ёруғлик қўйилган $R_{\text{ГП}} + R_{\text{ФР}} \ll R_{\text{ФВК}}$ шароитда ВАХ да фоторезистор ҳиссаси ҳукмронлик қилади. Интенсивлик L_{nc} ортиши билан n-CdS қатламнинг фотоўтказувчанлиги ҳисобига қисқа туташув ток кучи, демак, $V_{\text{АФК}}$ камаяди, *ав* соҳанинг оғиш бурчаги, яъни структуранинг электр ўтказувчанлиги ортади.

Маълумки, массив n-CdS/p-CdTe гетероўтиш ВАХида худди 3–расмдаги 3–чизик каби ночизикли қоронғулик токи намоён бўлади, ток ўтиш механизми эса туннель–рекомбинацион табиатга эга. Шунга асосан берилган L_{nc} қийматида дастлаб V_{max} ортиши билан гетероўтиш орқали ток экспоненциал қонуниятга кўра ўсади, бироқ у тезда фотоқаршилик $R_{\text{ФР}} \geq R_{\text{ГП}}$ билан чегараланади деб ҳисоблашимиз мумкин. Шу сабабдан, 3–чизик ВАХ нинг дастлабки *ab* соҳаси n-CdS қатлам фотоўтказувчанлиги билан боғлиқ. Бундан кейинги V_{max} ни ортишида n-CdS/p-CdTe гетероўтишдаги туннель–рекомбинацион жараён чегараланади ва токнинг ўсиши тўйинишга учрайди ($R_{\text{ГП}} \geq R_{\text{ФР}}$). Бу эса АФВ p-CdTe қатламини шунтланишининг пасайишига ва $V_{\text{АФК}}$ ни ўсишига олиб келади, ўз навбатида ток кучининг ночизикли ўсишини юзага чиқаради (3–расмда *bc* соҳа). Аммо 3 ВАХ нинг кейинги йўли $R_{\text{ГП}} + R_{\text{ФР}} \leq R_{\text{ФВК}}$ ҳолатда ((1) формулага қаранг) гетероўтиш орқали токнинг чегараланиш шароитида ўтади (*cd* соҳа). ВАХдаги *b* бурилиш нуқтаси $V_{\text{таш}} + V_{\text{АФК}} \approx 200 \text{ В}$ қиймат билан аниқланади, яққаланган гетероўтишда эса ана шундай нуқтага $V_{\text{max}} \approx 0,05 \text{ В}$ мос келади. Агар n-CdS/p-CdTe структура орқали ток оқишининг бундай шароитида 200 В кучланиш тушуви кетма–кет уланган $R_{\text{ГП}} + R_{\text{ФР}}$ элементар қаршиликларда рўй беради деб ҳисобласак, у ҳолда пленка бўйича уларнинг умумий сонини осонгина аниқлаймиз: $N = 200 : 0,05 = 4 \cdot 10^3$. Пленка узунлиги $l = 10 \text{ мм}$ ни эътиборга олиб, кристалл донларнинг ўртача чизикли ўлчами $d_{\text{кд}} \approx 2,5 \text{ мкм}$ эканлигини топамиз. Бу эса пленкани рентгеноструктуравий таҳлил ва сирт электрон микрофотография натижалари билан бир хил тартибдаги катталиқдир.

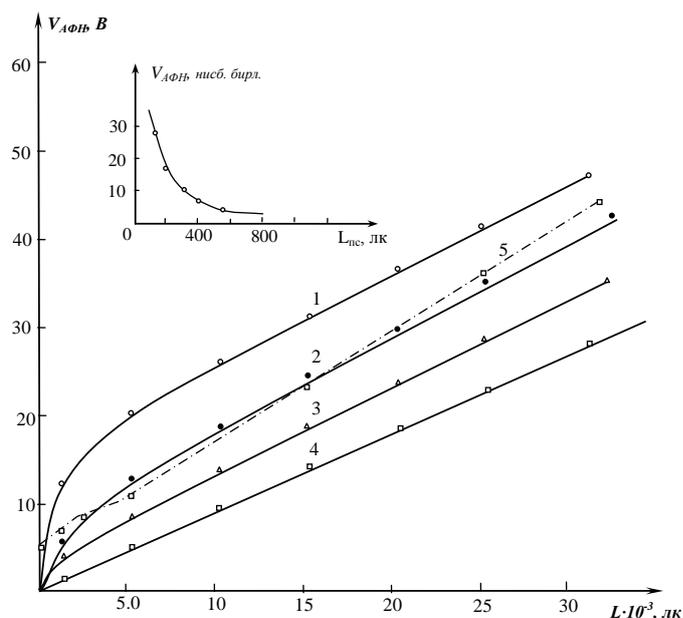
Ниҳоят, шуни таъкидлаш жоизки, қўшимча ёритиш интенсивлигининг етарлича катта $L_{\text{nc}} \geq 10^3 \text{ лк}$ қийматларида n-CdS/p-CdTe гетероўтишнинг ҳажмий зарядлар соҳасида ва n-CdS ҳажмида фототашувчиларнинг нисбатан юқори даражадаги генерацияси юзага келади. Бундай шароитда

текширилаётган системада ток асосан p-CdTe қатламни тўлиқ шунтловчи гетероўтиш билан n-CdS қатлам орқали ўтади ва чизикли ВАХ (3–расмдаги 4– чизик) n-CdS нинг фотоэлектрик хоссалари билан аниқланади.

4–расмда келтирилган шиша тагликдаги (1–чизик) ва фоторезистив CdS тагликдаги (2–4) АФВ CdTe қатламларнинг типик люкс-вольт характеристикалари (ЛВХ) сифат жиҳатдан мос тушади. Бу эса ушбу қатламларда АФК ни шаклланиш механизмлари фарқланмаслигини англатади. Бироқ n-CdS ни кўшимча ёритиш n-CdS/p-CdTe структура ЛВХ чизикларини миқдоран кучли деформациялайди. Расмдан кўринадики, кўзгатувчи ёруғлик L интенсивлигининг кичик қийматларида $V_{\text{АФК}}$ катталиқ L га нозикли боғлиқ, сўнгра $L \sim 10^4$ лк лардан бошлаб чизикли соҳага чиқади. Кўшимча ёритиш $L_{\text{пс}}$ ортиши билан нозикли соҳа торайишга учрайди, $V_{\text{АФК}}$ нинг қиймати L нинг бутун интервали бўйича пропорционал камаяди, демак, $V_{\text{АФК}}(L)$ чизик сифат жиҳатдан ўзгармайди (2-4 чизикларга қаранг). Охирги фикр, биринчидан, CdS фоторезисторни кўшимча ёритиш аномал фотокучланишни генерацияловчи потенциал тўсиқлар асимметриясига таъсир қилмаслигини, иккинчидан, $V_{\text{АФК}}$ шунтловчи қатлам $R_{\text{ш}}(L_{\text{пс}})$ қаршилигига чизикли боғланишда эканлигини билдиради.

Шуни таъкидлаш қизиқки, CdS ни қизил филтёр орқали кўшимча ёритиш ЛВХ нинг бошланғич соҳасида $V_{\text{АФК}}(L)$ боғланишни сифат жиҳатдан ўзгартиради (4–расмдаги 5-чизик) : $L=0$ да $V_{\text{АФК}}$ нинг қиймати нолга тенг эмас. Бу кўшимча ёруғлик шиша таглик ва n-CdS орқали ўтиши, шунингдек фронтал ёритишдаги $V_{\text{АФК}}$ билан кутбланиши бир хил “аралашмавий” фотокучланиш генерациясини юзага чиқариши билан изоҳланади.

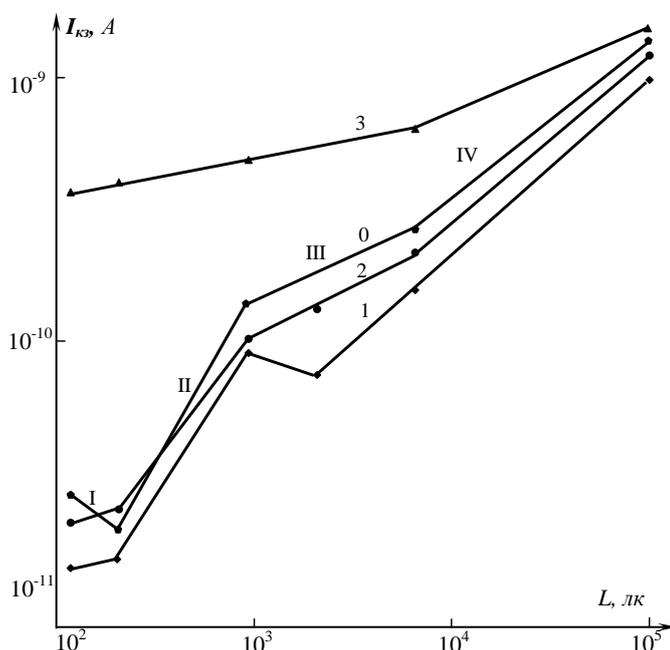
4–расмга тиркамада $V_{\text{АФК}}$ нинг кўшимча ёритиш $L_{\text{пс}}$ интенсивлигига боғланиши нисбий бирликларда берилган. Кўринадики, $V_{\text{АФК}}$ $L_{\text{пс}} \approx 10^2$ лк қийматларданок кучли пасая бошлайди. Бу фотоўтказувчанлик ҳисобига гетероўтиш ва n-CdS қатлам қаршиликларининг камайиши билан боғлиқ. Табиийки, АФК ни кўшимча ёритиш билан емирилиш чизиги p-CdTe қатламда уни кўзгатувчи ёруғлик L интенсивлигига боғлиқ.



4-расм. CdTe пленка (1) ва n-CdS/p-CdTe гетероструктура (2- $L_{\text{пс}}=0$; 3- $L_{\text{пс}}=1$ лк; 4- $L_{\text{пс}}=10$ лк) нинг люкс-вольт характеристикалари. 5- n-CdS қизил свето-филтёр орқали кўшимча ёритилган: $L_{\text{пс}}=10^2$ лк. Расмга тиркамада $V_{\text{АФК}}(L_{\text{пс}})$ боғланиш. $T=300$ К.

5-расмда хона температурасида ташқи кучланишнинг айни бир $V_{\text{ен}}=100 \text{ В}$ қийматида олинган назорат учун намуна (0 чизик) ва n-CdS/p-CdTe гетероструктурадаги (1-3) фотовольтаик p-CdTe қатламларнинг иккиланма логарифмик масштабдаги люксампер характеристикалари (ЛАХ)

кўрсатилган. Агар ЛАХ ни $I_{\text{ф}} \sim L^n$ кўринишда ифодаласак бу ерда L - лк ёки $\text{фот}/\text{см}^2 \cdot \text{с}$ бирликлардаги ёруғлик интинсивлиги, n - ЛАХ кўрсаткичи, у ҳолда 0 чизикдан кўринадики, назорат АФВ пленкасининг ЛАХи 4 та характерли соҳадан иборат: I соҳада ($L \leq 2 \cdot 10^2$ лк) ЛАХ кўрсаткичи $|n| < 1$ бўлган манфий дифференциал фотоўтказувчанлик (МДФЎ) мавжуд; II-юқори чизикли соҳа ($2 \cdot 10^2 < L < 10^3$ лк) $n > 1$ бўлган юқори сезгирлик соҳасидир; $L > 10^3$ лк да ЛАХ дастлаб $n \approx 0.35$ бўлган субчизикли III соҳага, сўнгра $n \approx 1.0$ чизикли боғланишли IV соҳага ўтади. Бундай $I_{\text{ф}} \approx f(L)$ боғланиш икки ва ундан ортик чуқур сатҳли рекомбинация марказларига эга яримўтказгич пленкаларда илгари кузатилган.



5-расм. n-CdS/p-CdTe гетероструктурадаги p-CdTe ЛАХ си: 1- CdS кўшимча ёритишсиз; CdS ни кўшимча ёритишда: 2 - $L=500$ лк; 3- $L=3 \cdot 10^3$ лк. 0- CdTe назорат намунаси.

Фоторезистор CdS ёритилмагандаги n-CdS/p-CdTe гетеросистеманинг ЛАХ си умумий тарзда оддий фотовольтаик CdTe пленканинг 4 босқичли ЛАХ структурасини сақлайди (5-расмдаги 1 чизик). Бу эса шиша ва n- CdS тагликлардаги p-CdTe қатламларнинг фотоэлектрик хоссалари бир-бирига яқинлигини тасдиқлайди, бироқ I соҳадаги МДФЎ йўқолади ва у $n \approx 0.2$ бўлган паст сезгирликли соҳа билан алмашади. ЛАХ нинг юқори сезгирликли II соҳаси деярлик ўзгармайди, III соҳа эса тораяди ва ҳатто янги МДФЎ юзага келади, $n \approx 1.0$ чизикли IV соҳа бу ерда $L=2 \cdot 10^3$ лк қийматдан бошланади.

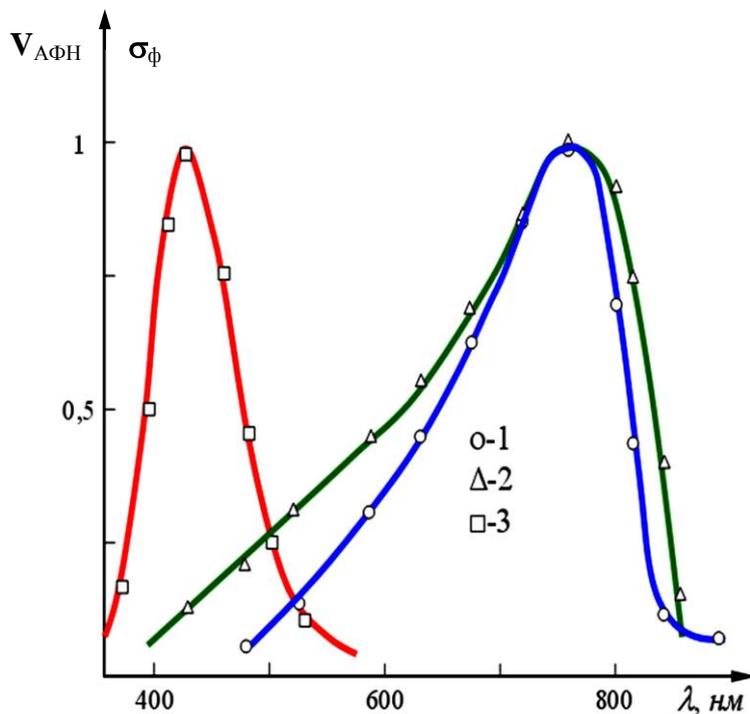
Шундай қилиб, n-CdS/p-CdTe гетеросистемадаги юпқа поликристалл фотоўтказувчан n-CdS пленка АФВ CdTe қатлам ЛАХ га $L < 2 \cdot 10^2$ лк ва $10^3 < L < 2 \cdot 10^3$ лк соҳаларда кучли таъсир кўрсатади. Шиша таглик томондан n-CdS ни $L=10^2$ лк билан кўшимча ёритилган ҳолда фотосезгирлик сезиларли ортади ва III соҳада МДФЎ йўқолади (5-расмдаги 2 чизик). Бу ердан n-CdTe / p-CdS гетеросистеманинг ЛАХсидаги МДФЎ соҳаси ВАХ даги нозичикли соҳа (3-расмдаги 3 чизик) каби CdTe даги чуқур сатҳли нуқтавий хусусий нуқсонлар билан бир қаторда системанинг гетероўтиш чегарасининг таъсири билан аниқланади, деган хулосага келиш мумкин. CdS ни кучли $L_{\text{пс}}=10^3$ лк

кўшимча ёритилганда n-CdS/p-CdTe системанинг ЛАХ си юқори сезгирликли икки субчизикли соҳалардан ташкил топади (5-расмдаги 3 чизик).

Диссертациянинг "Пленкали n-CdS/p-CdTe гетероструктурадаги CdTe қатламнинг оптик спектрларини тадқиқ этиш" номли тўртинчи бобида фотовольтаик CdTe қатламнинг ўтказиш, фотоўтказувчанлик, қисқа туташув токи ва паст температурали люминесценция спектрларини экспериментал тадқиқот натижалари баён қилинган. Пленкали n-CdS/p-CdTe гетероструктурадаги майда донли ($h, d_{cr} \leq 1 \text{ мкм}$) поликристалл p-CdTe қатламнинг фронтал равишда (CdTe эркин сирти томондан) оқим қуввати $\sim 4,8 \text{ мВт/мм}^2$ Ag^+ -лазер билан қўзғатилгандаги паст (4,2 К) температурали чегаравий фотолюминесценция спектри қизил чегараси E_g га нисбатан қисқа тўлқинлар соҳасига $\Delta E_r \approx 30 \text{ мэВ}$ силжиган ва ярим кенглиги $\Delta_A = 6-8 \text{ мэВ}$ интенсивлиги энг катта хусусий ($e-h$) нурланиш полосаси, унинг $LO+nLA$ -фонон қайтарилиши ($\Delta_B \approx 40 \text{ мэВ}$) ва $\hbar\omega \approx 1.50 \text{ эВ}$ частота яқинидаги кенг ($\Delta_D \approx 100 \text{ мэВ}$) сирт-интерфейс полосасидан ташкил топиши кўрсатилган. Фоторезистив CdS қатламини хусусий ютилиш соҳасида $L_{pc} \approx 5 \cdot 10^2$ лк интенсивликда орқадан кўшимча ёритиш $e-h$ ва у билан боғлиқ B -, D -люминесценция полосаларини тўлиқ йўқотади. Уларнинг ўрнига бўйлама экситон частотаси $\hbar\omega \approx 1.59 \text{ эВ}$ ва ярим кенглиги ($\Delta_{ex} \approx 25 \text{ мэВ}$) бўлган поляритон нурланишининг асимметрик дублет чизиғи ҳамда максимум частотаси $\hbar\omega \approx 1.535 \text{ эВ}$

донор-акцептор жуфтларнинг кенг ($\Delta_{DAS} \approx 40 \text{ мэВ}$) чизиғи ялт этиб пайдо бўлади. Бу чизикларнинг максимал интенсивлиги А-чизикниқига қараганда икки тартибда кичикдир.

6-расмда n-CdS/p-CdTe гетероструктурада p-CdTe қатлам (1 чизик) ва CdTe моноқатлам (2) лар фотокучланиши $V_{\text{АФК}}$ нинг спектрал боғланиши, шунингдек CdS пленка кўндаланг солиштирма фотоўтказувчанлик $\sigma_{\text{ф}}$ спектри (3) 1 га нормаланган ҳолда келтирилган ($T=300 \text{ К}$). Бунда 1 чизикнинг узун ва қисқа тўлқинли соҳалари ўзига диққатни тортади. n-CdS/



6-расм. n-CdS/p-CdTe гетероструктурадаги p-CdTe қатлам (1), CdTe моноқатлам (2) $V_{\text{АФН}}$ фотокучланишининг ва n-CdS пленка солиштирма фотоўтказувчанлигининг (3) 1 га нормаланган спектрлари. T-300 К.

p-CdTe гетероструктурада $V_{\text{АФК}}$ нинг қисқа тўлқин томондан анча сезиларли камайиши шунтловчи CdS қатламнинг фотоўтказувчанлигини пайдо бўлиши билан тушунтирилади. Таъкидлаймизки, таглик томондан интенсивлиги $\sim 10^3$ лк табиий ёруғлик билан кўшимча ёритиш p-CdTe қатлам генерациялаган АФК ни тўлиқ йўқотди. $V_{\text{АФК}}$ хусусий чегарасининг катта частоталар соҳасига силжиши ва Урбах думсимон спектрини пайдо бўлиши CdS билан CdTe сирт олди соҳасида варизон структурани ва ҳолатлар зичлигининг думсимон қисмини шаклланишидан далолат беради. Спектрнинг ушбу соҳасини батафсил ўрганиш $V_{\text{АФК}}$ ни пленка чуқурлиги бўйича тақсимланиши хақида маълумот олишга имкон яратади.

Ишда монокристаллар ва йирик донли поликристаллардан фарқли равишда n-CdS/p-CdTe гетероструктурада p-CdTe қатламда экситонлар ва донор-акцептор жуфтларнинг нурланиши учрамаслиги кўрсатилган. Бу ҳолнинг сабаблари қуйидагилар билан изоҳланади. Биринчидан, кристалл донларнинг ўлчамлари Дебай экранлашиш узунлиги $\ell_{Di} = (2\epsilon\epsilon_0\phi_i/e^2|N_D - N_A|)^{1/2}$ (яъни $d \approx \ell_{Di}$, бу ерда ϵ , ϵ_0 – диэлектрик киритувчанлик ва электр доимийси, e – электрон заряди, N_D ва N_A – донор ва акцепторлар концентрацияси, ϕ_i – донлар чегарасидаги сирт потенциал тўсиқ баландлиги) тартибидаги катталик ва дон квазинейтрал ҳажмининг фотолюминесценция шаклланишидаги роли сезиларли эмас. Иккинчидан, кристалл донларнинг сирт олди потенциал тўсиқлари ҳосил қилган ҳажмий зарядлар соҳасидаги ички жойлашган электростатик майдонлар фотогенерацияланаётган электрон-тешик жуфтларини фазовий ажратадилар, бунинг натижасида сирт олди элементар фотокучланишлари, шунингдек улар билан боғлиқ иссиқ фототашувчилар хусусий (яъни зоналараро $e-h$ рекомбинация) люминесценциясининг генерацияси вужудга келади. Бунда

$$\tau_r \leq \tau_0, \tau_M \quad (2)$$

шарт бажарилади, τ_r , τ_0 , τ_M – нурланишли, нурланишсиз ва максвелл яшаш вақтлари.

Мувозонатсиз электроннинг тўлиқ яшаш вақти

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_0}, \quad \frac{1}{\tau_0} = \frac{1}{\tau_{ex}} + \frac{1}{\tau_{DA}} + \frac{1}{\tau_M} + \frac{1}{\tau_p} + \dots \quad (3)$$

ифодалар билан аниқланади, бу ерда τ_{ex} , τ_{DA} – электроннинг берилган энергетик ҳолатдан экситон ёки донор-акцептор жуфт ҳосил қилиб кетиш вақтлари, τ_p – импульс бўйича релаксация вақти ва ҳ.к. У ҳолда табиийки,

$$\tau_r \ll \tau_{ex}, \tau_{DA} \quad (4)$$

шарт бажарилганда фотолюминесценция спектрида биринчи яқинлашишда экситон ва донор-акцептор жуфт нурланиш каналлари мавжуд бўлмайди, улар $e-h$ люминесценция ва унинг йўлдошларининг кучли фонида экспериментал кузатилмай қолаверади. Айнан шу ҳолат шиша ва CdS фоторезистор тагликлардаги майда донли CdTe қатлам люминесценциясида рўёбга чиқади (7- расм, а ва б). Расмдаги а ва б чизиклардан кўринадики, n-CdS/p-CdTe

гетероструктурадаги *CdTe* қатламнинг қўшимча ёритишсиз люминесценция спектри (б) 750-780 нм соҳада моноқатлам спектри (а) билан сифат жиҳатдан мос тушади: ярим спектрал кенглиги $\Delta\lambda_A \approx 7.5$ нм бўлган зона-зона асосий нурланиш (А-) чизиғи ва унинг *LO*-фонон такрорланиши шаклидаги узун тўлқин қаноти (В-чизик)дан ташкил топган. Мухими *a* ва *b* чизиклар учун $\Delta\lambda_A$ кататаликлар, шунингдек уларга мос келувчи моно- ва биқатламлар генерациялайдиган $V_{AФК}$ фотокучланишнинг максимал қийматлари 2 марта фарқланишини қайд этиш лозим. А-чизик интенсивлигининг спектрал максимуми В-, С- чизикларникидан деярли бир тартибда ортиқ бўлиб, частотага қараб ўзгариши

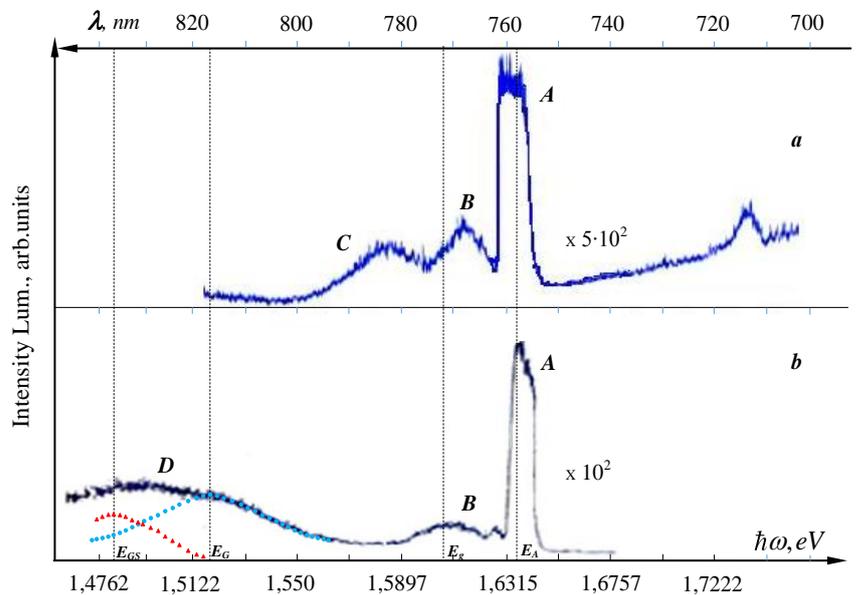
$$I(\omega) \sim (\hbar\omega - E_g - E_{LO})^{1/2} \exp\left(-\frac{\hbar\omega - E_g - E_{LO}}{kT}\right) \quad (5)$$

эмпирик қонуният билан ифодаланади, бу эса оддий ўтказувчанлик зонасининг ҳолатлар зичлигини (1-кўпатма) ва уларни Больцман статистикаси бўйича эгалланиш даражасини (2- кўпатма) акс эттиради.

Фотовольтаик *CdTe* қатламнинг *CdS* ёритилмагандаги люминесценция спектри (б) *CdTe* моноқатлам спектри (а) дан фарқли равишда қайноқ люминесценция соҳасига эга эмас, бироқ 790-850 нм кенгликдаги қўшимча “чегаравий” D-нурланиш чизиғига эга. Табиий ҳолда кутиш мумкинки, қайноқ люминесценцияни сўниши ва D-чизикни вужудга келиши n-CdS/p-CdTe гетероструктурада p-CdTe сирт олди қатламида ёруғлик ютилиши билан боғлиқ, бу эса гетероўтиш электр майдонида фототашувчилар генерациясига ва ажралишига олиб келади ҳамда n-CdS/p-CdTe-ҚЭнинг фото-

ЭЮК сини ҳосил бўлишига бош сабабчидир. Гетероўтишнинг ички электростатик майдони p-CdTe қатлам кристалл донларининг квазинейтрал соҳаларидан электронларни сўриб олади, натижада А-чизик интенсивлиги ва ярим кенглиги камаяди. Гетероўтиш соҳасида асосан n-CdS ўтказувчанлик зонасидаги эркин электронлар ва p-CdTe қатлам валент зонаси тешиклари ўртасида

новертикал рекомбинация, шунингдек гетероўтишнинг сирт ҳолатлари орқали деярли тўғри рекомбинация боради. Айнан шу жараёнлар D-чизик



7-расм. Шиша таглик (а) ва *CdS* фоторезистор (б) тагликдаги фотовольтаик *CdTe* қатламларнинг фотолюминесценция спектрларини таққослаш. T=4.2 К.

шаклланишининг икки турлича механизмлари бўлиб, улар билан аниқланувчи парциал спектрларга 7, б расмдаги доирачалар ва учбурчакли чизиклар мос келади. Бу чизикларнинг максимумлари $E_G \approx 1,52$ эВ, $E_{GS} \approx 1,48$ эВ энергияларда, яъни CdTe тақиқланган зонаси E_g кенглигидан 0,086 эВ, 0,126 эВ қийматларга пастда ётади ва $E_g - \Delta E_c$ и $E_c - E_s - \Delta E_c$ тартибидаги катталикларни аниқлайди. Демак, n-CdS/p-CdTe гетероструктурадаги p-CdTe қатламнинг CdS ёритилмагандаги люминесценция спектри гетероўтишнинг реал параметрларини бевосита аниқлашга имкон беради: ΔE_c —ўтказувчанлик зоналарининг узилиши ва E_s —сирт ҳолат энергияси қийматларини.

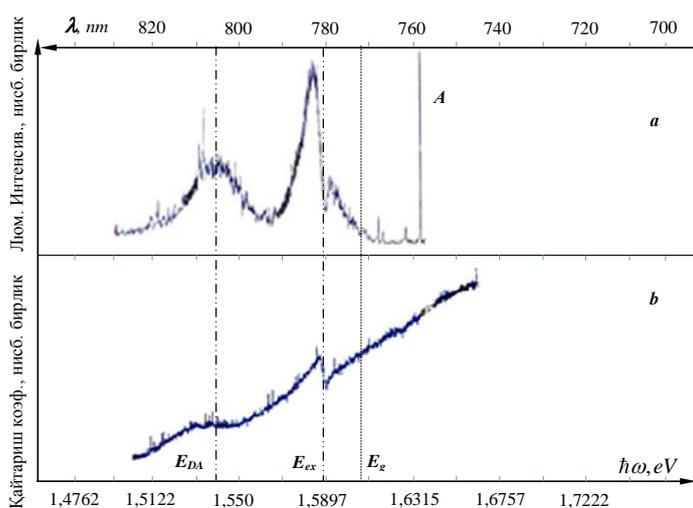
Агар фотогенерацияда мувозонатсиз заряд ташувчилар учун (2) ва (4) шартларга тескари бўлган

$$\tau_r \geq \tau_M, \tau_{ex}, \tau_{DA}, \quad (6)$$

шартлар бажарилса, люминесценция спектрининг шаклланишидаги вазият ўзгаради. Фототок ташувчилар кристалл донлар ҳажмидан асосан нурланишсиз кетадилар, масалан, электр ўтказувчанлик, экситонлар ва донор–акцептор жуфтлар ҳосил қилиш ёки сирт рекомбинацияси ҳисобига. У ҳолда ҳажмий зарядлар соҳасида ажраган эркин электронлар ва тешиклар нурланиш рекомбинациясининг фотолюминесценцияга бевосита кучли ҳиссаси (А-чизик) кескин пасаяди ва шунинг билан майда донли юпка яримўтказгич

пленкада экситонлар ва донор–акцептор жуфтларнинг кучсиз спектрал чизикларини кузатиш имконияти туғилади. Бу ерда ана шундай имкониятни пленкали n-CdS/p-CdTe гетероструктурада амалга оширишнинг нотривиал методларидан фотовольтаик p-CdTe қатлам қаршилигини n-CdS қатлам фотоўтказувчанлиги билан уни қўшимча ёритиш ёрдамида шунтлаш усули таклиф этилган. n-CdS қатлам шиша таглик томондан энергияси $\hbar\omega > E_g$ фотонлар билан ёритилганда, унинг хусусий фотоўтказувчанлиги уйғонади ва маълум L_{nc}

интенсивликда n-CdS нинг қаршилиги фотовольтаик p-CdTe қатлам қаршилигидан оз бўлиб қолиши мумкин. Бунда қўшимча ёритишсиз А-чизикни шакллантирувчи қайноқ фототок ташувчилар энди асосан максвелл релаксацияси, табиийки, экситонлар ва донор–акцептор жуфтлар ҳосил қилиш билан йўқоладилар. Ана шундай вазиятга мос келган n-CdS/p-CdTe



8-расм. n-CdS/p-CdTe гетероструктурада n-CdS қатлам орқадан $L_{nc}=500$ лк интенсивликда қўшимча ёритилгандаги фотовольтаик p-CdTe қатламнинг фотолюминесценция спектри (a) ва CdTe нинг фронтал ёритишдаги кўзгули қайтариш спектри (b). $T=4.2$ К.

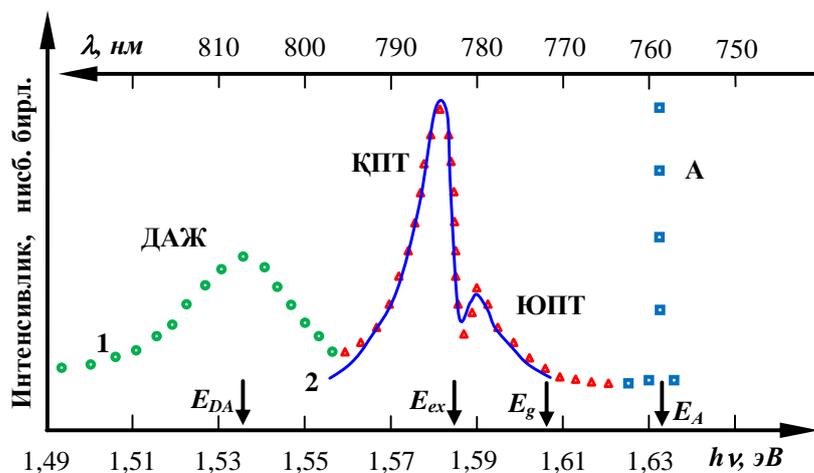
гетероструктурадаги p-CdTe қатламнинг фотолюминесценция (а) ва кўзгули қайтариш (б) спектрлари 8-расмда намоиш қилинган.

Соф CdTe монокристалларда $T=4.2$ К да $A_{n=1}$ экситон резонансининг энергетик ҳолати $E_T=1.596$ эВ ($\lambda_T=777$ нм) дир. 8 а, б расмдан кўринадикки, ушбу резонансга тадқиқ қилинаётган кўшимча ёритилган n-CdS/p-CdTe гетероструктурадаги поликристалл p-CdTe қатламда $E_T=1.586$ эВ ($\lambda_T=782.5$ нм) энергия мос келади. Спектр 4.2 К температурада олинганлигига қарамадан $A_{n=1}$ экситон резонансининг 10 мЭВга узун тўлқинлар соҳасига силжиши механик экситонлар $\hbar\Gamma$ сўнишининг донлар чегаравий потенциалларида сочилишга боғлиқ катта қиймати ва гетероўтиш таъсири билан тушунтирилиши мумкин.

Экситон люминесценциясининг дублет структураси (8, а расм) поляритон люминесценцияси модели доирасида яхши талқин этилади. Максимуми $\hbar\omega_k=1.584$ эВ энергияда бўлган интенсивлиги юқорироқ узун тўлқинли компонентага қуйи тармоқ поляритонларининг нурланиши мос келади, максимуми $\hbar\omega_{\omega_0}=1.590$ эВ энергияли интенсивлиги камроқ қисқа тўлқинли йўлдошга юқори тармоқ поляритонлари асосий улуш қўшади. Шунини қайд этиш жоизки, бунга ўхшаш спектр илгари таркиби стехиометрияга яқин CdTe кристалларда $T\approx 77$ К температурада кузатилган.

9-расмда n-CdS/p-CdTe гетероструктурада p-CdTe қатламнинг $T=4.2$ К даги (учбурчакли чизик) ва Ж.Р. Паносян³ ишидан олинган ўта тоза CdTe кристаллнинг $T=77$ К даги (туташ чизик) экспериментал фотолюминесценция спектрлари таққосланган.

Кўринадикки, бу контурлар ҳар хил структураларга ва температураларга тегишли бўлишига ва уларнинг спектрал оралиғи 1.570 эВ дан 1.595 эВ гача, яъни деярли 25 мЭВ ни ташкил этишига қарамадан сифат жиҳатдан яхши мос келади. Поляритон люминесценция спектрининг бундай кучли кенгайиши поляритонлар $T=77$ К да соф CdTe кристаллида фонлар ва $T=4.2$ К да n-CdS/p-CdTe гетероструктурада майда донли p-CdTe юпқа қатламнинг ички



9-расм. n-CdS фоторезистор хусусий ютилиш соҳасида $L_{nc}=500$ лк интенсивлик билан ёритилгандаги фотовольтаик поликристалл p-CdTe қатлам (1 чизик, $T=4.2$ К) ва ўта тоза CdTe кристалл (2 чизик, $T=77$ К) фотолюминесценция спектрларининг фрагментлари.

³ Паносян Ж.Р. Излучательная рекомбинация в кристаллах теллурида кадмия // Тр. ФИ РАН.-1973. -68.-С.147-202.

жойлашган потенциаллари билан жуда кучли таъсирлашади деган фикр уйғотади.

«Чегаравий люминесценция»нинг максимуми $\hbar\omega_{DA} = 1.535 \text{ эВ}$ ($\lambda_{DA} = 805$ нм) частотада бўлган симметрик контури $\hbar\Delta\omega_{DA} \approx 30 \text{ мэВ}$ ярим кенгликка эга (9-расм, 1 чизик) ва кристаллардан, шунингдек n-CdS қўшимча ёритилмаган ҳолдан (7,б расм, D-чизик) фарқли равишда LO такрорланишлар ҳисобига носимметрик кенгайишга эга эмас. Ушбу контур учун фаоллашув энергияси $E_g - \hbar\omega_{DA} = 1.606 - 1.535 = 0.071 \text{ эВ}$ бўлган донор-акцептор жуфтларнинг ички квант ўтишлари жавобгардир. Донор-акцептор жуфтларнинг шунга ўхшаш контурлари CdTe кристаллар учун бошқа ишларда ҳам кўп кузатилганлигини таъкидлаймиз.

Шундай қилиб, n-CdS/p-CdTe гетероструктурада n-CdS ни $L_{nc} \approx 5 \cdot 10^2$ лк интенсивликда қўшимча ёритиш ёрдамида фотовольтаик p-CdTe майда донли қатламнинг поляритонлар ва донор-акцептор жуфтлар нурланишини кузатишга муваффақ бўлинди. Уларни кичик $L_{nc} \leq 5 \cdot 10^2$ лк интенсивликларда юқори омлик поликристалл пленканинг ички жойлашган электростатик майдонларида ажратилган фототок ташувчиларнинг кучли «зона-зона» нурланиши фонида пайқаш мумкин бўлмади. n-CdS қатламни қўшимча ёритиш унинг фотовольтаик p-CdTe қатламни шунтловчи қаршилигини ва демак, ажратилган фототок ташувчиларнинг кристалл донлар ҳажмидаги максвелл релаксация вақтларини камайтиради, бунинг ҳисобига эса улар нурланишли рекомбинациялашиб улгурмасдан гетероўтиш томонидан сўриб олинади. Бу қўшимча ёритишсиз кузатилаётган А-, В-, С-нурланиш чизикларини сўнишига ва эркин экситонлар ҳамда донор-акцептор жуфтлар чизикларини пайдо бўлишига олиб келади. Тадқиқ этилган фоторезистив ва фотовольтаик хоссаларга эга бўлган юпка пленкали n-CdS/p-CdTe гетероструктура фотоприемник сифатида амалий қўлланишгагина эмас, балки турли хил яримўтказгичли микро- ва наноструктураларда фотоэлектрик, оптик ҳодисаларни ўрганишнинг янги методларини ишлаб чиқиш учун ҳам истиқболлар очади.

ХУЛОСА

Юпка пленкали n-CdS/p-CdTe гетероструктура олишнинг термовакуумли технологиясини ишлаб чиқиш ва фаол p-CdTe қатламнинг фотоэлектрик, оптик хусусиятларини тадқиқ этиш натижаларига кўра куйидаги **асосий хулосалар**ни чиқариш мумкин:

1. CdTe ва 3-7 масс.% даги In аралашмасини алоҳида тигеллардан қолдиқ газларнинг $10^{-3} - 10^{-5}$ мм. рт. ст. босимида $250 - 300$ °C температура-ли шиша тагликка вакуумли буғлатиш усули билан аномал фотовольтаик пленка олиш технологияси ишлаб чиқилган. Бунда In буғлатилиши CdTe буғлатилишига нисбатан 2-3 минутга кечиктирилади ва 3-5 минут олдин

тугатилади, термик қайта ишлов ҳаво атмосферасида CdCl_2 буғлари иштирокида 250°C температурада 2–4 мин давомида ўтказилади.

2. CdTe асосида фоторезистив ва фотовольтаик хоссали $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$ пленкали гетероструктура олишнинг дастлаб $300\text{--}350^\circ\text{C}$ температурали шиша тагликка $40\text{--}50^\circ$ бурчак остида $0.1\text{--}0.3$ мкм қалинликдаги $n\text{-CdS}$ қатламни буғлатиб ўтқозиш, сўнгра $0.5\text{--}0.8$ мкм қалинликдаги $p\text{-CdTe}$ қатламни $250\text{--}280^\circ\text{C}$ таглик температурасида $130\text{--}140^\circ$ бурчак остида $10^{-3}\text{--}10^{-5}$ мм. рт. ст. вакуумда буғлатиш йўли билан олиш технологияси ишлаб чиқилган.

3. Олинган $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$ гетероструктура $p\text{-CdTe}$ қатламнинг $V_{\text{АФК}}$ қийматини $n\text{-CdS}$ қатлам фотоўтказувчанлиги туфайли танлаб бошқаришга ва демак, уни оптик модулятор, фототранзистор, хотира элементининг фотопереключатели сифатида қўллашга имкон бериши аниқланган. $n\text{-CdS}$ ни $T=300\text{ K}$ да $h\nu \geq 2,5$ эВ энергияли ва $L_{\text{nc}} \approx 10^2$ лк интенсивликдаги ёруғлик билан қўшимча ёритилганда $p\text{-CdTe}$ қатламдаги 400 В фотокучланишни деярли тўлиқ йўқотади..

4. Электрон-микроскопик тадқиқотлар асосида термик ишлов бериш кристалл донлар ўлчамларининг сезиларли ўзгаришига олиб келиши кўрсатилган, хусусан, $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$ гетероструктура кўндаланг қирқимини микрофотографиясидан кўринадики, қиздиришдан сўнг дон ўлчами бошқа донлар ҳисобига ортиши, чегараларининг текислашуви ва чок бурчакларнинг силликашуви рўй беради. Дон кўндаланг ўлчамларининг ўртача қиймати $T_n=250^\circ\text{C}$ бўлган пленкаларда $1,2$ мкм, $T_n=350^\circ\text{C}$ да эса $1,6$ мкм ни ташкил этади.

5. $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$ гетеросистемадаги фотовольтаик $p\text{-CdTe}$ қатламнинг ВАХ си қўшимча ёритишсиз CdTe моноқатлам ВАХси каби монотон чизиқли характерга эга, $n\text{-CdS}$ қатламни частотаси $h\nu \geq 2,52$ эВ ва интенсивлиги $L_{\text{пс}} < 100$ лк бўлган ёруғлик билан қўшимча ёритилганда эса учта характерли – чизиқли $R \approx 5 \cdot 10^9$ Ом ва $1,8 \cdot 10^{10}$ Ом, ночизиқли $3,2 \cdot 10^9$ Ом соҳалардан ташкил топиши аниқланган. Бунда қўшимча ёритиш интенсивлиги $L_{\text{пс}}$ ортиши билан ночизиқли ўтиш соҳаси торайиб, 1000 лк дан юқори қийматларда иккинчи чизиқли соҳа билан биргаликда йўқолиб кетади. Ночизиқли ўтиш соҳасининг юзага чиқишига сабаб $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$ гетероструктура орқали туннель-рекомбинацион токининг чегараланиш эффектидир.

6. $n\text{-CdS}$ ни қўшимча ёритиш $L_{\text{пс}}$ интенсивлиги ортиши билан $p\text{-CdTe}$ қатламдаги $V_{\text{АФК}}$ нинг қиймати тез камайиши, $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$ гетероструктуранинг $V_{\text{АФК}}(L)$ ЛВХ сифат жиҳатдан ўзгармаслиги кўрсатилган. Бу эса CdS фоторезисторни қўшимча ёритиш аномал фотокучланишни генерацияловчи микро потенциал тўсиқлар асимметриясига таъсир қилмаслигини билдиради.

7. Пленкали $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$ гетероструктурадаги поликристалл $p\text{-CdTe}$ қатламнинг фронтал равишда оқим қуввати $\sim 4,8$ мВт/мм² Ar^+ -лазер билан кўзғатилгандаги паст ($4,2\text{ K}$) температурали чегаравий

фотолюминесценция спектри қизил чегараси E_g га нисбатан қисқа тўлқинлар соҳасига $\Delta E_r \approx 30 \text{ мЭВ}$ силжиган ва ярим кенглиги $\Delta_A = 6 - 8 \text{ мЭВ}$, интенсивлиги энг катта хусусий ($e-h$) нурланиш полосаси, унинг $LO + nLA$ -фонон қайтарилиши ($\Delta_B \approx 40 \text{ мЭВ}$) ва $\hbar\omega \approx 1.50 \text{ эВ}$ частота яқинидаги кенг ($\Delta_D \approx 100 \text{ мЭВ}$) сирт-интерфейс полосасидан ташкил топиши илк марта кўрсатилган.

8. $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$ гетероструктурада $n\text{-CdS}$ қатламни $L_{nc} \approx 5 \cdot 10^2 \text{ лк}$ қўшимча ёритиш ёрдамида фотовольтаик $p\text{-CdTe}$ қатлам фотолюминесценция спектрида поляритонлар ва донор-акцептор жуфтлар нурланиш чизиқлари илк марта аниқланган. $n\text{-CdS}$ қатламни қўшимча ёритиш унинг фотовольтаик $p\text{-CdTe}$ қатламни шунтловчи қаршилигини ва демак, ажратилган фототок ташувчиларнинг кристалл донлар ҳажмидаги максвелл релаксация вақтларини камайтиради, бунинг ҳисобига эса улар нурланишли рекомбинациялашиб улгурмасдан, гетероўтиш томонидан сўриб олинади. Бу қўшимча ёритишсиз кузатилаётган А-, В-, С-нурланиш чизиқларининг сўнишига ва эркин экситонлар ҳамда донор-акцептор жуфтлар чизиқларининг пайдо бўлишига олиб келади.

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

ФЕРГАНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

МАМАТОВ ОЛМОСБЕК МАХАММАТДОВИДОВИЧ

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ И ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ
СВОЙСТВ ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИХ ПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР НА
ОСНОВЕ *n-CdS/p-CdTe***

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

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

Фергана-2021

**Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам
зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров
Республики Узбекистан за номером В2020.3.PhD/FM523.**

Диссертация выполнена в Ферганском политехническом институте.

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

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

Официальные оппоненты: **Отажонов Салим Мадрахимович**
доктор физико-математических наук

Кўчқаров Қудратулла Мамарасулович
доктор физико-математических наук (DSc)

Ведущая организация: **Андижанский государственный университет**

Защита диссертации состоится «___» _____ 2021 года в ___ часов на заседании Научного совета PhD.03/27.02.2020.ФМ.106.01 при Ферганском политехническом институте. Адрес: 150107, г. Фергана, ул. Ферганская, дом 86. Тел: (+99873) 241-12-06, факс (+99873) 241-12-06, e-mail: uzferfizika@mail.ru, online через систему ZOOM.

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

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2021 года.

(реестр протокола рассылки № _____ от «___» _____ 2021 г.)

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

Б.З. Полвонов
ученый секретарь Научного совета по присуждению
ученой степени доктора философии,
PhD ф.-м.н., доцент

Р.Я. Расулов
председатель научного семинара при Научном совете
по присуждению ученой степени доктора философии,
д.ф.-м.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мировой энергетике быстро развивается технология изготовления тонкоплёночных солнечных элементов как альтернатива солнечным модулям из кремниевых пластинок. Поликристаллический CdTe является наиболее перспективным фотоэлектрическим материалом, используемым сегодня в производстве тонкоплёночных солнечных модулей. Коэффициент полезного действия лабораторных образцов солнечных элементов на основе гетероструктуры n-CdS/p-CdTe постоянно увеличивается и в настоящее время составляет 22,1% при солнечном излучении AM1.5⁴. Она имеет почти 2/3 части теоретического значения коэффициента полезного действия 28–30% на этих структурах. Поэтому повышение эффективности CdTe модулей является чрезвычайно актуальной научно-технической задачей. Для увеличения эффективности фотопреобразования следует уменьшить потери, связанные с отражением и поглощением солнечного излучения, несовершенством технологии, а также необходимо проводить более глубокие исследования наиболее важных характеристик солнечных элементов.

В мире особое внимание ведущих научных центров обращено на широкие исследования по разработке технологии и изучении механизмов токопрохождения тонкоплёночных солнечных элементов на основе поликристаллической пленки CdTe. Усовершенствование технологии получения плёночных CdTe-солнечных элементов и более глубокое изучение их физических характеристик является актуальной и востребованной задачей солнечной энергетике. При этом основное внимание обращено исследованиям роли межзеренных границ, примесно-дефектного состава приграничных и внутренних областей кристаллических зерен в формировании электрических, фотоэлектрических свойств и спектров люминесценции мелкозернистой пленки CdTe.

В последние годы в Республике Узбекистан существенное внимание уделяется актуальным приоритетным научным направлениям фундаментальных и прикладных исследований, в частности, развитию инновационных технологий и разработок в области использования возобновляемых источников энергии. В этом направлении по технологии получения и исследованиям свойств поликристаллических пленок CdTe достигнуты определенные результаты. Согласно Стратегии действия по дальнейшему развитию Республики Узбекистан⁵, особое внимание обращено задачам создания эффективных механизмов практического применения научных и инновационных достижений. В этом аспекте очень важным является усовершенствование технологии и методов глубокого исследования оптических параметров полупроводников и тонкоплёночных полупровод-

⁴ <https://www.researchgate.net/publication/302502393>

⁵ Указ Президента Республики Узбекистан ПФ-4947 от 7 февраля 2017 года « О Стратегии действия по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» .

никовых структур в области солнечной энергетики, фотоники и оптоэлектроники. Данная диссертация посвящена усовершенствованию технологии получения пленочной гетероструктуры n-CdS/p-CdTe и исследованию фотоэлектрических, оптических свойств, а также новых механизмов формирования спектров фотолюминесценции слоя p-CdTe, результаты которых служат для оптимизации технологии создания солнечных элементов, детекторов ионизирующих излучений, высоковольтных фотогенераторов и других оптоэлектронных приборов.

Настоящее диссертационное исследование в определенной степени служит решению задач, предусмотренных в Постановлениях Президента № ПП-4348 от 30 мая 2019 года «О дополнительных мерах по созданию благоприятных условий для дальнейшего развития электротехнической промышленности и повышению инвестиционного и экспортного потенциала отрасли», № ПП-3855 от 14 июля 2018 года «О дополнительных мерах по повышению эффективности коммерциализации результатов научной и научно-технической деятельности», № ПП-3012 от 26 мая 2017 года «О программе мер по дальнейшему развитию возобновляемой энергетики, повышению энергоэффективности в отраслях экономики и социальной сфере на 2017–2021 годы», № ПП-5032 от 19 марта 2021 года «О мерах развития научных исследований и повышения качества образования в области физики», а также в аналогичных нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан. Диссертация выполнена в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий Республики Узбекистан III «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение, транспорт, машино- и приборостроение; развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники, электронного приборостроения».

Степень изученности проблемы. Использование тонкопленочного CdTe и гетероструктуры CdS/CdTe в качестве фотопреобразовательного материала фотовольтаики началось с пионерских работ Адировича Э.А. и его учеников. Благодаря оригинальным работам зарубежных ученых R.H. Vube, A. Fahrenbruch, T. Okamoto, K. Durose, M.D. Potter, M. Tuteja, Косяченко Л.А., Хрипунова Г.С., Рудь Ю.В. и др. скоро выяснилось, что пленочные солнечные элементы на основе n-CdS/p-CdTe имеют достаточные перспективы, широкие возможности для усовершенствования, оптимизации технологии производства и снижения себестоимости. В настоящее время CdTe-солнечных элементов находятся в стадии разработки и создания пилотных линий, производственные мощности которых составляют более 1,2 МВт при участии фирм «Matsushita», «First Solar», «BP Solarex» и прочих. При этом коэффициент полезного действия CdTe-солнечных элементов составляет до 16%, модулей – до 9%.

В развитие фотовольтаики пленочных структур на основе CdTe и гетероструктуры CdS/CdTe определенный вклад внесли узбекские ученые

Ш.М Мирсагатов, Т.М. Разыков, Н.Х. Юлдашев и их ученики. В частности, Ш.А. Мирсагатовым и др. получены поликристаллические структуры теллурида кадмия методом химического осаждения паров и были проведены комплексные исследования физических свойств $n\text{-CdS}/n\text{-CdS}_x\text{Te}_{1-x}/p\text{-CdTe}$ -гетероструктур. Т.М. Разыковым и его учениками разработана новая технология получения поликристаллических пленок на основе халькогенидных полупроводников методом химического молекулярно-пучкового осаждения и изучались основные рабочие параметры тонкопленочных $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$ -солнечных элементов. Н.Х. Юлдашевым и его учениками созданы оригинальные способы получения методом термовакуумного испарения мелкозернистых CdTe:Ag , CdTe:In тонких пленок с аномальными фотовольтаическими и фотоэлектретными свойствами, а также исследованы их низкотемпературные спектры фотопроводимости и фотолюминесценции.

В последнее время повышается интерес к поликристаллическим ультратонким пленочным CdTe -солнечным элементам, улучшение стабильности которых требует детального понимания свойств материалов и физики устройства. Межзеренные границы, приповерхностные области и точечные дефекты в тонких мелкозернистых пленках играют существенную роль в формировании электрофизических, фотовольтаических и оптических свойств. Однако эти вопросы в научной литературе совершенно малоизучены. Практически отсутствуют работы по оптимизации термовакуумной технологии получения ультратонких пленочных гетероструктур $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$ и изучению их физических свойств, в частности, спектров люминесценции с целью повышения эффективности и целенаправленного усовершенствования технологии их получения.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в Ферганском политехническом институте, частично в рамках научных проектов «Экситон-поляритонная люминесценция полупроводниковых кристаллов и квантово-размерных структур при фотовозбуждении и каналировании ионов», Грант № 10/2000 Фонда Фундаментальных Исследований ГКНТ РУз за 2000-2004 гг; «Кинетика экситонной люминесценции в полупроводниковых кристаллах при резонансном фотовозбуждении и каналировании ионов», Грант № 80-06 Фонда Поддержки Фундаментальных Исследований АН РУз за 2006 -2008 гг; Грант по контракту ККРНТ № 28 «Поляритонный принцип организации квантовых каналов связи» за 2012-2013гг.

Целью исследования является разработка термовакуумной технологии получения пленочной гетероструктуры $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$ с фоторезистивными и фотовольтаическими свойствами и исследование фотоэлектрических, оптических свойств активного слоя $p\text{-CdTe}$.

В соответствии с поставленной целью решались следующие **основные задачи**:

разработка термовакuumной технологии получения мелкозернистых пленок CdTe:In и пленочной гетероструктуры n-CdS/p-CdTe с аномальными фотовольтаическими свойствами;

проведение рентгеноструктурного и электронно-микроскопического исследования параметров субструктуры кристаллических зерен гетероструктуры n-CdS/p-CdTe;

анализ электрофизических и фотоэлектрических свойств фотовольтаической пленки p-CdTe в гетероструктуре n-CdS/p-CdTe;

исследование спектров низкотемпературной фотолюминесценции фотовольтаической пленки p-CdTe в гетероструктуре n-CdS/p-CdTe при дополнительной подсветке фоторезистивного слоя n-CdS и без неё.

Объектом исследования являются мелкозернистые пленки CdTe:In и тонкопленочная гетероструктура n-CdS/p-CdTe, полученные методом термического испарения в вакууме.

Предметом исследования являются термовакuumные технологические процессы получения тонкопленочных структур CdTe:In, n-CdS/p-CdTe и электрофизические, фотоэлектрические, оптические явления в них.

Методы исследований. Для решения поставленных задач применены современная термовакuumная методика технологии получения тонких полупроводниковых пленок, методы рентгеноструктурного и электронно-микроскопического исследования, известные измерительные методики по определению вольт-амперных, люкс-амперных, люкс-вольтовых характеристик и других фотоэлектрических и оптических спектров полупроводниковых материалов.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

разработана технология получения мелкозернистой фотовольтаической пленки CdTe:In методом термического испарения в вакууме, позволяющая увеличить силу тока короткого замыкания на два порядка, а значение аномального фотонапряжения - почти на порядок, чем у нелегированных образцов;

разработана термовакuumная технология получения пленочной гетероструктуры n-CdS/p-CdTe, позволяющая селективно управлять значением аномального фотонапряжения слоя p-CdTe с помощью подсветки n-CdS со стороны подложки из спектральной области её собственного поглощения;

установлено, что вольт-амперная и люкс-амперная характеристики слоя p-CdTe в гетероструктуре n-CdS /p-CdTe с подсветкой $L_{nc} \leq 10^2$ лк фоторезистора n-CdS приобретают нелинейные участки с отрицательным дифференциальным сопротивлением, которые исчезают при достаточно больших $L_{nc} \geq 10^3$ лк, что связано с эффектом шунтирования слоя p-CdTe фотопроводимостью n-CdS;

впервые установлено, что спектр краевой фотолюминесценции слоя p-CdTe в гетероструктуре n-CdS/p-CdTe состоит из доминирующей полосы собственного излучения с коротковолновым смещением красной границы относительно E_g , её фононного повторения и широкой поперечно-

интерфейсной полосы.

впервые обнаружены линии излучения экситонов с дублетной структурой и донорно-акцепторных пар с симметричным контуром фотовольтаического слоя p-CdTe в гетероструктуре n-CdS/p-CdTe с помощью подсветки слоя n-CdS, что связано мелкозернистостью слоя p-CdTe и шунтированием его аномального фотовольтаического сопротивления фотопроводимостью слоя n-CdS.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

Разработаны технологии получения мелкозернистой фотовольтаической пленки CdTe:In и тонкоплёночной гетероструктуры n-CdS/p-CdTe с аномальными фоторезистивным и фотовольтаическим свойствами методом термического испарения в вакууме. Выданы рекомендации по оптимальным технологическим параметрам выращивания пленки CdTe:In и гетероструктуры n-CdS/p-CdTe, выбору относительных масс исходных компонентов, термической обработки и специальных технологических приемов. На разработку способа получения фотовольтаической пленки на основе CdTe:In получен Патент изобретения Агентства интеллектуальной собственности Республики Узбекистан (№ IAP 05384, 28.04.2017).

Достоверность результатов исследований обеспечивается использованием современных методов измерения физики полупроводников и совпадением полученных результатов с известными результатами опубликованных в реферируемых журналах работ. Спектры низкотемпературной фотолюминесценции тонких поликристаллических пленок CdTe, CdTe:In и мелкозернистого p-CdTe в пленочной гетероструктуре n-CdS/p-CdTe снимались в Санкт-Петербургском Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе на спектрометре с ДФС-24, а рентгенограммы и электронная микрофотография поверхности и поперечного скола пленок получены в Новосибирском государственном университете.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследований заключается в разработке оригинальных технологических режимов получения пленочной гетероструктуры n-CdS/p-CdTe с фотовольтаическим и фоторезистивным свойствами методом термовакuumного испарения, а также в обнаружении и интерпретации новых спектральных линий её фотолюминесценции и особенностей фотоэлектрических характеристик, что открывает новые возможности материаловедения и оптической спектроскопии полупроводниковых структур.

Практическая ценность работы заключается в том, что результаты диссертационной работы дают возможность усовершенствовать технологии создания детекторов ионизирующих излучений, пленочных солнечных элементов, высоковольтных фотогенераторов и других оптоэлектронных приборов на основе пленочной гетероструктуры n-CdS/p-CdTe, в частности, для неразрушающего контроля и диагностики полупроводниковых пленочных структур.

Внедрение результатов исследования. На основе результатов разработки термовакuumной технологии получения мелкозернистых пленок

CdTe:In и пленочной гетероструктуры n-CdS/p-CdTe и исследований их физических свойств;

получен Патент изобретения Агентства интеллектуальной собственности Республики Узбекистан (№ IAP 05384, 28.04.2017) для разработки способа получения аномально фотовольтаической пленки CdTe:In, используемого в области технологии получения материалов оптоэлектроники и гелиотехники на основе халькогенидов кадмия. Разработанная технология обеспечивала увеличение мощности фотовольтаической пленки, применяемой в качестве фотогенератора напряжения, на три порядка;

предложенная разработка оригинальных технологических режимов получения пленочной гетероструктуры n-CdS / p-CdTe с фотовольтаическими и фоторезистивными свойствами методом термовакуумного испарения, выявление новых спектральных линий и механизмов их образования в ее фотолюминесценции были опробированы в АО "FOTON" (Справка №241 от 14.06.2021 г.) АК Узэлтехсаноат. Полученные научные результаты могут быть использованы на предприятиях Узэлтехсаноат. Показано, что применение этого научного новшества открывает новые возможности для материаловедения и оптической спектроскопии полупроводниковых структур.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на 8 международных и 1 республиканской научно-практической конференциях.

Публикации результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 16 научных трудов, из них 7 статей в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных работ.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованной литературы. Текст диссертации изложен на 125 страницах, включая 2 таблицы и 43 рисунка.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении кратко изложены актуальность и востребованность темы диссертации, определена связь исследований с основными приоритетными направлениями развития науки и технологий в Республике Узбекистан, проведен обзор научной литературы по теме диссертации и степени изученности проблемы, сформулированы цели и задачи, выявлены объект, предмет 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 технологии получения и исследования фотовольтаических свойств пленочных гетероструктур CdS/CdTe»** приводится анализ результатов текущей литературы по вопросам технологии получения пленочных гетероструктур CdS/CdTe для солнечных элементов и краткие сведения о зонной структуре CdS, CdTe и о механизмах электропроводности поликристаллических пленок на их основе. Рассмотрены известные механизмы токопрохождения, характерные особенности спектров фототока и краевой фотолюминесценции гетероструктуры CdS/CdTe. На основе критического анализа этих материалов сформулированы цели и задачи диссертации.

Вторая глава **«Разработка технологии получения фотовольтаических пленочных структур на основе CdTe:In и n-CdS/p-CdTe методом термовакuumного испарения»** посвящена разработке термовакuumной технологии получения чистых и легированных примесями In косонапыленных тонких поликристаллических пленок и пленочной гетероструктуры n-CdS/p-CdTe с АФВ свойствами для исследования их физических свойств. Анализируется влияние термической обработки на временную кинетику очувствления, природу и механизма образования фотонапряжения в пленках. При этом обнаружено, что АФВ свойства слоя CdTe в гетероструктуре существенно модулируются при возбуждении фотопроводимости под действием подсветки слоя CdS. Также приведены результаты исследования кристаллической структуры слоя CdTe в пленочной гетероструктуре n-CdS/p-CdTe методами рентгеноструктурного анализа и электронной микрофотографии.

Фотовольтаические пленки CdTe:In и гетероструктура n-CdS/p-CdTe изготавливались методом испарения в вакууме с помощью вакуумных установок ВУП-4 и ВУП-5М на стеклянных подложках в научной лаборатории Ферганского политехнического института. Процесс легирования тонких косонапыленных слоев CdTe осуществлялся непосредственно во время их выращивания методом термического испарения в вакууме 10^{-4} - 10^{-5} Торр. путем препарирования порошкообразного материала CdTe особой чистоты с маркой «для полупроводников» и In в виде слитка из отдельных тиглей с температурами 923-973 К и 573-593 К, соответственно. Исходная масса напыляемой примеси In составляла 3-7 масс. % от массы основного

полупроводникового соединения CdTe. Испарение In задерживалось на 2-3 мин. и прекращалось на 3-5 мин. раньше, чем испарение основного материала. Температура стеклянной подложки варьировалась в пределах 473-523 К. Свежеприготовленные поликристаллические образцы CdTe:In с толщиной $d \approx 0.8-1.5$ мкм и площадью 5×20 мм² (скорость конденсации v_k 1.0-1.5 нм/с, угол напыления 30-60°) оказались более низкоомными и относительно слабо выражались АФВ свойствами ($V_{АФН} = 50-100$ В). Однако после термообработки в вакууме или на чистом воздухе сопротивление образцов в 2-3 раза увеличивалось, и в то же время при комнатной температуре они генерировали максимальное фотонапряжение до значений $(2-4) \cdot 10^3$ В, т.е. на порядок больше, чем у специально нелегированных образцов CdTe (где $V_{АФН} = 200-600$ В), а фототок короткого замыкания увеличивался более чем на два порядка и достигал $I_{к.з.} \approx 10^{-8}$ А. Электрофизические и АФВ свойства отожженных пленок CdTe:In существенно стабилизируются.

Для получения резкой гетероструктуры n-CdS/p-CdTe с АФВ свойством известный метод изготовления АФВ-пленок с помощью термовакuumного испарения оказался непригодным. Слой CdTe, выращенный таким способом на фотопроводящем слое CdS, порой не обнаруживал заметные АФВ свойства. Оказалось, что определяющими факторами для изготовления интегральной гетеросистемы n-CdS/p-CdTe являются относи-

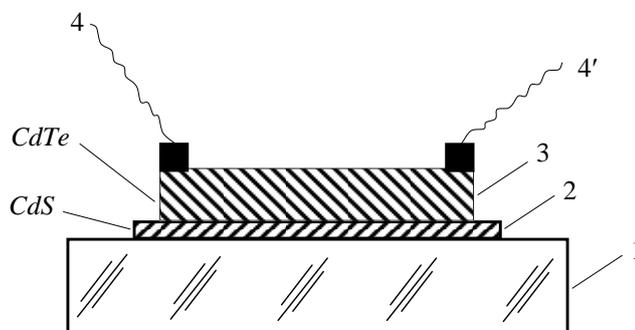


Рис.1. Схематический вид пленочной гетероструктуры n-CdS/p-CdTe на прозрачной стеклянной подложке 1: 2- фоторезистор CdS, 3-фотовольтаический слой CdTe, 4-токосъемные омические контакты.

тельное сопротивление, направления роста кристаллических зерен и толщины слоев. При этом оптимальные условия технологии получения заключались в том, что указанная гетероструктура формировалась нами в едином технологическом цикле методом своеобразного последовательного напыления порошкообразного CdS и CdTe с маркой «для полупроводников» на прозрачные стеклянные подложки (1 на рис.1) в вакууме с давлением остаточных газов $\approx 10^{-4} - 10^{-5}$ Торр.

Сначала на поверхность подложки с температурой 573 – 723 К под углом $\alpha = 60-80^\circ$ через специальные маски осаждался слой CdS (2) площадью 20×5 мм² и толщиной 0,2-0,4 мкм. Затем проводили очувствление его последующим отжигом в вакууме при $T = 773- 823$ К в течение 10-15 мин. Темновое сопротивление пленки CdS с электронной проводимостью достигало значений $R \approx 10^{12}$ Ом, а кратность изменения сопротивления под

действием освещения – до $K \approx 10^2 - 10^3$ отн. ед.

Во второй стадии выращивания структуры, не разрушая достигнутый вакуум, непосредственно на поверхность фоторезистивной пленки CdS также через маски осаждали слой p-CdTe (3) толщиной $d_{пл} = 0,5 - 0,8$ мкм со скоростью $1,5 - 2,0$ Å/с под углом $\alpha = 130 - 150^\circ$ при температуре подложки $T_{п} = 423 - 573$ К. Следовательно, по нашим оптимальным условиям технологии получения тонких сэндвич слоев направления молекулярных пучков CdS и CdTe расходились на угол $\Delta\alpha \approx 70 - 90^\circ$.

Изготовленный по описанной выше технологии фотоприемник при фронтальном освещении со светом длиной волн $600 \leq \lambda \leq 800$ нм и интенсивностью $L \approx 10^5$ лк при комнатной температуре генерировал фотонапряжение $V_{АФН} \approx 200$ В. Самым замечательным здесь является то, что при дополнительной тыловой (т.е. со стороны подложки) подсветке в спектральной области $\lambda < 500$ нм уже при $L_{nc} \approx 1$ лк значение $V_{АФН}$ заметно падает, а при $L_{nc} \approx 10^5$ лк практически исчезает.

Результаты электронно-микроскопических исследований показали, что отжиг пленок приводит к изменению размеров кристаллитов. Из представленных на рис. 2 а, б микрофотографий поперечного излома гетероструктуры n-CdS/p-CdTe, где слой p-CdTe получался при $T_{п} = 250$ и 350°C видно, что после отжига происходит увеличение размеров зерен за счет других зерен, спрямление границ и приглаживание углов стыка к равновесным. Среднее

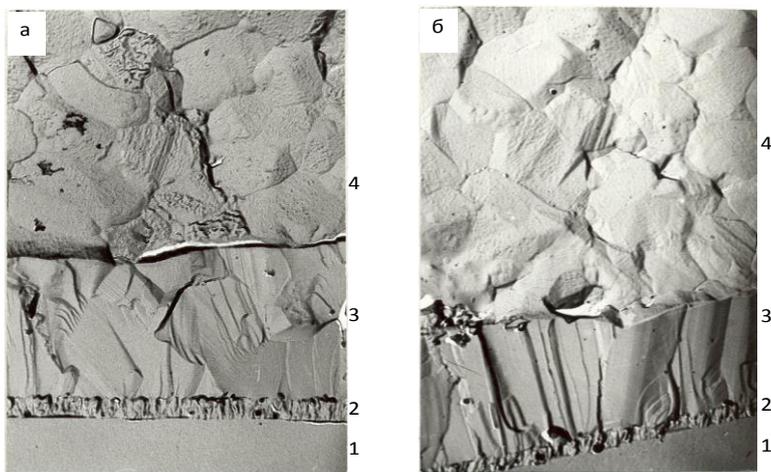


Рис. 2. Электронная микрофотография поперечного излома пленочной гетероструктуры n-CdS/p-CdTe, а- $T_{п} = 250^\circ\text{C}$; б- $T_{п} = 350^\circ\text{C}$. 1- подложка, 2-слой CdS, 3-поперечный излом CdTe, 4-его поверхность.

значение размера зерна для пленок, полученных при $T_{п} = 250^\circ\text{C}$, составляет порядка 1200 нм, а для пленок, полученных при $T_{п} = 350^\circ\text{C}$ - 1600 нм. Размеры отдельных зерен для этих пленок составляют порядка 1,5-2 мкм. Изучение поперечного строения пленок показало, что столбчатая структура распространяется в ряде случаев на всю толщину пленки. Однако следует отметить, что хотя визуально наблюдаемое по фрактограммам поперечное строение является монолитным, но на самом деле согласно результатам рентгеноструктурного анализа среднее значение областей когерентного рассеяния намного меньше.

В третьей главе «Исследование электрофизических и фотоэлектрических свойств фотовольтаических пленочных структур n-CdS/p-CdTe» приведены результаты экспериментов по изучению электрофизических и фотоэлектрических свойств изготовленных пленочных структур CdTe:In и n-CdS/p-CdTe с поперечной фотопроводимостью. Установлены некоторые особенности ВАХ, ЛАХ и ЛВХ изготовленных структур в темноте и при освещении, которые связываются с наличием в пленках существенно развитых потенциальных барьеров и собственных точечных дефектов. Показано, что световая ВАХ слоя p-CdTe в гетероструктуре n-CdS/p-CdTe при подсветке n-CdS светом с $h\nu \geq 2,52$ эВ и $L_{\text{пс}} \approx 30$ лк при комнатной температуре состоит из трех характерных участков, причем с ростом интенсивности подсветки нелинейный переходной участок сглаживается и исчезает при $L_{\text{пс}} \approx 10^2$ лк. Подсветка также сильно влияет на ЛАХ и ЛВХ p-CdTe в гетероструктуре n-CdS/p-CdTe.

Сравнение типичных значений основных электрофизических параметров исследованных пленок CdTe, CdTe:In и p-CdTe в гетероструктуре n-CdS/p-CdTe, измеренных по известным методикам, описанных в §2.2, приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Электрофизические параметры пленок CdTe, CdTe:In, p-CdTe.

№ п/н	Электрофизические параметры пленок	чистый CdTe	легированный CdTe:In		p-CdTe в n-CdS/p-CdTe
			до отжига	после отжига	
1.	Темновое сопротивление - $R_{\text{тем}}, \text{ Ом}$	$(1.0 \pm 0.05)10^{13}$	$(2.0 \pm 0.05)10^{11}$	$(5.0 \pm 0.05)10^{11}$	$(1.0 \pm 0.05)10^{12}$
2.	Световое сопротивление - $R_{\text{св}}, \text{ Ом}$	$(2.0 \pm 0.05)10^{12}$	$(3.0 \pm 0.05)10^9$	$(2.0 \pm 0.05)10^{11}$	$(2.0 \pm 0.05)10^{11}$
3.	Сила фототока короткого замыкания - $I_{\text{кз}}, \text{ А}$	$(1.0 \pm 0.03)10^{-10}$	$(2.0 \pm 0.03)10^{-8}$	$(1.0 \pm 0.03)10^{-8}$	$(1.0 \pm 0.03)10^{-9}$
4.	Значение максимального фотонапряжения - $V_{\text{АФН}}, \text{ В}$	$(4.0 \pm 0.5)10^2$	$(0.6 \pm 0.1) 10^2$	$(2.0 \pm 0.1)10^3$	$(2.0 \pm 0.5)10^2$

На рис. 3 представлены типичные темновые (кривые 0; 1) и световые (0'; 2-4) экспериментальные ВАХ контрольного образца p-CdTe (0, 0') и слоя p-CdTe (1-4) в исследуемой гетеросистеме n-CdS/p-CdTe, которые снимались при комнатной температуре. Монослой p-CdTe, выращенный на стеклянной подложке по известной технологии, генерировал $V_{\text{АФН}} \approx (0.4-0.6) \cdot 10^3 \text{ В}$ при освещенности $L \approx 10^5 \text{ лк}$ естественного света, в то время слой p-CdTe в гетеросруктуре n-CdS/p-CdTe показал $V_{\text{АФН}} \approx 50-200 \text{ В}$ при тех же условиях.

Как видно из рисунка, вольтамперные характеристики АФВ слоя p-CdTe как на стеклянной подложке (0, 0'), так и на фоторезисторе CdS без подсветки последнего (1, 2) носят линейный характер. Заметим, что темновое

и световое (при $L=10^3$ лк) сопротивления монослоя p -CdTe ($1.0 \cdot 10^{13}$ Ом и $2.0 \cdot 10^{12}$ Ом) почти на порядок превосходят аналогичные сопротивления бислоя n -CdS/ p -CdTe ($1.0 \cdot 10^{12}$ Ом и $2.0 \cdot 10^{11}$ Ом). Механизм прохождения электрического тока через АФВ слой в условиях отсутствия подсветки является в основном туннельным, т.к. фототок короткого замыкания при заданном значении освещенности возбуждающего света не зависит от температуры: $I_{кз} = V_{АФВ} / R_{нл}$, причем $V_{АФВ} \sim R_{нл} \sim f(T)$.

Вольтамперная характеристика АФВ слоя p -CdTe в системе n -CdS/ p -CdTe при подсветке CdS светом с $h\nu \geq 2,52$ эВ и $L_{пс} \approx 30$ лк состоит из трех характерных участков: квазилинейные av (с $R \approx 5 \cdot 10^9$ Ом) и cd ($1,8 \cdot 10^{10}$ Ом), сверхлинейный ($3,2 \cdot 10^9$ Ом) vc (кривая 3 на рис.3). Причем с ростом интенсивности $L_{пс}$ подсветки участок vc сглаживается и вместе с участком cd исчезает при достаточно больших значениях $L_{пс} \approx 10^2$ лк (кривая 4), т.е. когда CdS полностью шунтирует АФВ слоя p -CdTe и ВАХ определяется фототоком через слой CdS. Причиной появления переходной нелинейной vc и линейных av , cd (с разными наклонами) участков ВАХ, по-видимому, является изменение вклада гетероперехода n -CdS/ p -CdTe в процесс токопрохождения через структуру под действием подсветки и внешнего напряжения.

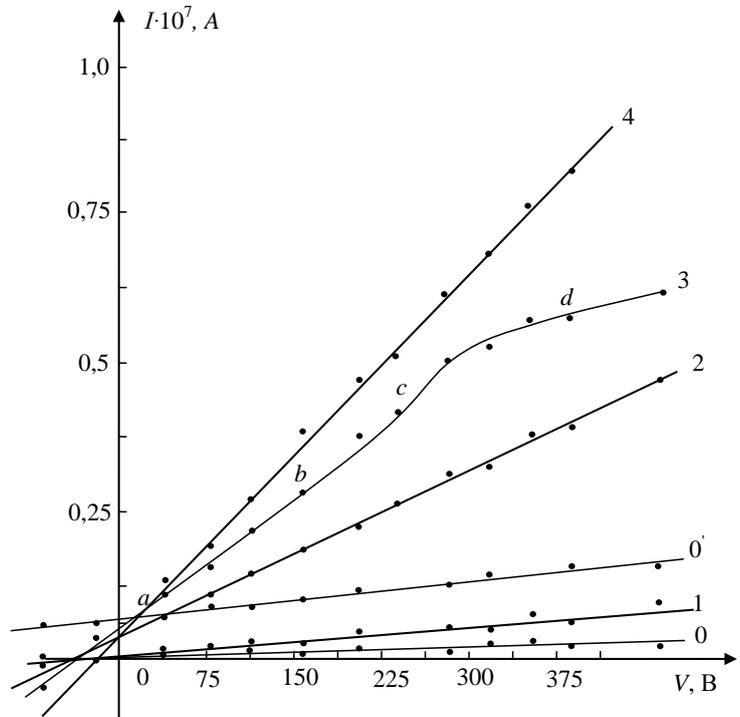


Рис.3. Вольт-амперная характеристика АФВ-пленки из p -CdTe, выращенной на стеклянной подложке (кривые 0 и 0') и на поликристаллической фотопроводящей пленке (1-4) из CdS, предварительно осажденной на стеклянной подложке. Кривые 0 и 1 — темновые, 0' и 2-4 — световые ($L=3 \cdot 10^3$ лк) ВАХ. Кривые 3 и 4 снимались под действием подсветки CdS с $L_{пс}=30$ лк и $5 \cdot 10^2$ лк, соответственно. $T=300$ К.

Так, эквивалентную электрическую схему поликристаллической гетероструктуры n -CdS/ p -CdTe в поперечном режиме фотопроводимости представим так, что согласно которой микро-фотовольтаические и фоторезистивные элементы вместе с гетеропереходными мостиками составляют элементарную замкнутую электрическую цепочку. Периодически последовательно соединенные такие цепочки образуют линейную эквивалентную схему исследуемой гетеросистемы. Можно полагать, что сила тока такой системы складывается из двух составляющих

$$I = I_{\text{ФВС}} + I_{\text{ФР}} = \frac{V_{\text{вн}} \pm V_{\text{АФН}}}{N} \left(\frac{1}{R_{\text{ФВС}}} + \frac{1}{R_{\text{ГП}} + R_{\text{ФР}}} \right), \quad (1)$$

где $V_{\text{вн}}$ – внешнее приложенное напряжение, N – число кристаллических зерен АФВ слоя вдоль линии прохождения тока, а $R_{\text{ФВС}}$, $R_{\text{ФР}}$, $R_{\text{ГП}}$ – элементарные сопротивления. Действительно, без подсветки n-CdS в случае $R_{\text{ГП}} + R_{\text{ФР}} \gg R_{\text{ФВС}}$ согласно (1) ВАХ полностью определяется фотопроводимостью слоя p-CdTe (кривая 2 на рис.3). При включении подсветки в условиях $R_{\text{ГП}} + R_{\text{ФР}} \ll R_{\text{ФВС}}$ в ВАХ доминирует вклад фоторезистора. С ростом $L_{\text{пс}}$ ток короткого замыкания и, следовательно, $V_{\text{АФН}}$ уменьшается, а наклон участка *ав*, т.е. электропроводность структуры увеличивается за счет фотопроводимости слоя n-CdS.

Известно, что одиночный гетеропереход n-CdS/p-CdTe обнаруживает нелинейный темновой ВАХ, как и кривая 3 на рис.3, а механизм прохождения тока является туннельно-рекомбинационным. Поэтому мы можем считать, что для заданного значения $L_{\text{пс}}$ сначала с ростом $V_{\text{вн}}$ ток через гетеропереход растет экспоненциальным законом, однако скоро он лимитируется фотосопротивлением $R_{\text{ФР}} \geq R_{\text{ГП}}$. Тогда начальный участок *ab* ВАХ 3 полностью обусловлен фотопроводимостью слоя n-CdS. При дальнейшем росте $V_{\text{вн}}$ туннельно-рекомбинационный процесс на гетеропереходе n-CdS/p-CdTe лимитируется и увеличение тока испытывает насыщение ($R_{\text{ГП}} \geq R_{\text{ФР}}$). А это приводит к ослаблению шунтирования АФВ слоя и росту $V_{\text{АФН}}$, что в свою очередь вызывает нелинейный рост тока (участок *bc* на рис.3.). Однако дальнейший ход ВАХ при $R_{\text{ГП}} + R_{\text{ФР}} \leq R_{\text{ФВС}}$ (см. формулу (1)) протекает в условиях лимитирования тока через гетеропереход (участок *cd*). Точка *в* на ВАХ (начало лимитирования) определяется значением $V_{\text{вн}} + V_{\text{АФН}} \approx 200 \text{ В}$, а в случае одиночного гетероперехода аналогичной точке соответствует $V_{\text{вн}} \approx 0,05 \text{ В}$. Если будем считать, что при данном условии протекания тока через структуры n-CdS/p-CdTe падение напряжения 200 В происходит на последовательно включенных элементарных сопротивлениях $R_{\text{ГП}} + R_{\text{ФР}}$, то легко получим их общее количество вдоль пленки: $N = 200 : 0,05 = 4 \cdot 10^3$. А зная длину пленки $l = 10 \text{ мм}$, находим средний линейный размер кристаллических зерен $d_{\text{кз}} \approx 2,5 \text{ мкм}$, что по порядку величины вполне совпадает с результатами рентгеноструктурного анализа и электронно-микроскопическими фотографиями поверхности пленок.

Следует заметить, что при достаточно больших значениях подсветки $L_{\text{пс}} \geq 10^3 \text{ лк}$ наступает относительно высокий уровень генерации фотоносителей в областях объемных зарядов гетероперехода n-CdS/ p-CdTe и в объеме n-CdS. При таких условиях ток в исследуемой системе проходит в основном через слой n-CdS с гетеропереходом, шунтирующий слой p-CdTe и линейная ВАХ (кривая 4 на рис.3) определяются фотоэлектрическими свойствами n-CdS.

Типичные люкс-вольтовые характеристики (ЛВХ) АФВ слоя CdTe на стеклянной подложке (кривая 1) и на фоторезистивной подложке CdS (2-4),

представленные на рис. 4 качественно совпадают. А это означает, что механизмы формирования АФН в этих слоях не отличаются. Однако подсветка n-CdS количественно сильно деформирует кривые ЛВХ структуры n-CdS / p-CdTe. Как видно из рисунка, при малых значениях L интенсивности возбуждающего света $V_{\text{АФН}}$ сверхлинейно зависит от L , а затем уже при $L \sim 10^4$ лк выходит на линейный участок. С ростом $L_{\text{пс}}$ нелинейный участок претерпевает сужения, а значение $V_{\text{АФН}}$ пропорционально уменьшается по всему интервалу L , следовательно, кривая $V_{\text{АФН}}(L)$ качественно не меняется (см. кривые 2-4). Последнее означает, что, во-первых, подсветка фоторезистора n-CdS не влияет на асимметрию потенциальных барьеров, генерирующих фотонапряжение, во-вторых, $V_{\text{АФН}}$ линейно зависит от сопротивления шунтирующего слоя $R_{\text{ш}}$ ($L_{\text{пс}}$).

Интересно заметить, что подсветка n-CdS через красный светофильтр качественно меняет зависимость $V_{\text{АФН}}(L)$ в начальном участке ЛВХ (кривая 5 на рис.4): при $L=0$ значение $V_{\text{АФН}} \neq 0$. Это объясняется тем, что подсветка с проходит через подложки и n-CdS, а также вызывает генерацию «примесного» АФН, совпадающего по полярности с АФН при фронтальном освещении.

На вставке к рис.4 приведена зависимость $V_{\text{АФН}}$ в относительных единицах от интенсивности подсветки $L_{\text{пс}}$. Видно, что уже при $L_{\text{пс}} \approx 10^2$ лк $V_{\text{АФН}}$ начинает сильно падать. Это связано с уменьшением сопротивлений гетероперехода и n-CdS (т.е. $R_{\text{пл}}(L_{\text{пс}})$) за счет фотопроводимости. Естественно, кривая разрушения АФН с подсветкой существенно зависит от интенсивности L возбуждающего АФН света в слое p-CdTe.

На рис. 5 показаны люкс-амперные характеристики (ЛАХ) для контрольного образца (кривая 0) и фотовольтаического слоя p-CdTe в гетероструктуре (1-3) в двойном логарифмическом масштабах при одном и том же значении внешнего напряжения $V_{\text{вн}}=100$ В, которые снимались при комнатной температуре.

Если ЛАХ представить как $I_{\text{ф}} \sim L^n$, где L -интенсивность освещения (в единицах лк или фот/см²·с), n -показатель ЛАХ, то, как видно из кривой 0, ЛАХ контрольной АФВ пленки состоит из 4-х характерных участков:

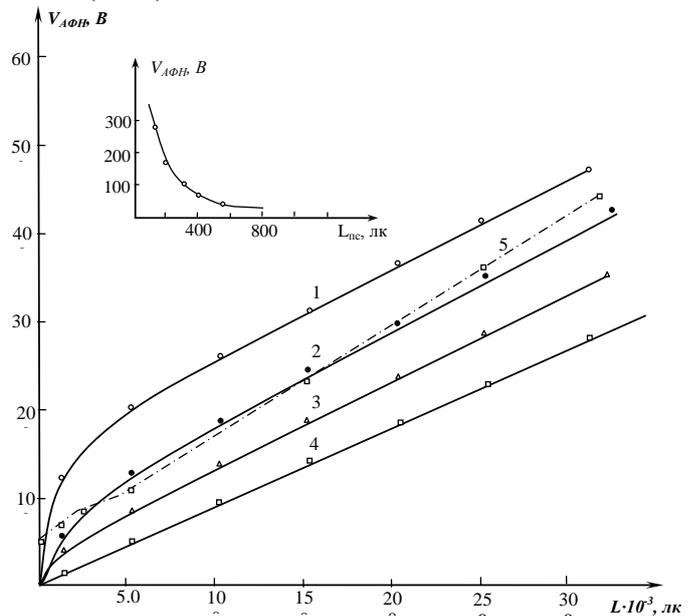


Рис.4. Люкс-вольтовые характеристики пленок CdTe (кривая 1) и гетероструктуры n-CdS / p-CdTe (2- $L_{\text{пс}}=0$; 3- $L_{\text{пс}}=1$ лк; 4- $L_{\text{пс}}=10$ лк). Кривая 5-подсветка ФР через красный светофильтр: $L_{\text{пс}}=10^2$ лк. На вставке зависимость $V_{\text{АФН}}(L_{\text{пс}})$. $T=300$ К.

на участке I, где $L \leq 2 \cdot 10^2$ лк, имеет место отрицательная дифференциальная фотопроводимость (ОДФП) с показателем ЛАХ $|n| < 1$; II-сверхлинейный участок, где L $2 \cdot 10^2 \div 10^3$ лк представляет собой высокочувствительную область с $n > 1$. В области $L > 10^3$ лк, ЛАХ сначала переходит в сублинейную (III участок с $n \approx 0.35$), где $10^3 < L < 10^4$ лк), а затем линейную (IV участок) зависимость. Известно, что такая зависимость $I_{\phi} \approx f(L)$ характерна фоточувствительным полупроводниковым пленкам с двумя или более центрами рекомбинации с глубокими уровнями.

ЛАХ системы n- CdS /p- CdTe, без подсветки фоторезистора CdS в общих чертах сохраняет 4-х ступенчатую структуру ЛАХ для обычной фотовольтаической пленки CdTe (кривая 1 на рис.4), что также подтверждает схожесть фотоэлектрических свойств p- CdTe на стекле и на n- CdS. Однако на участке 1 ОДФП исчезает и он заменяется слабочувствительной областью с $n \approx 0.2$. Высокочувствительная область II ЛАХ остается почти без изменения, а область III сужается ($10^3 < L < 2 \cdot 10^3$ лк) и появляется даже ОДФП, почти линейная область IV здесь начинается со значения $L = 2 \cdot 10^3$ лк.

Таким образом, тонкая поликристаллическая фотопроводящая пленка n-CdS сильно влияет на ЛАХ АФВ слоя из CdTe при слабой интенсивности ($L < 2 \cdot 10^2$ лк) и в области $10^3 < L < 2 \cdot 10^3$ лк. В случае подсветки со стороны стеклянной подложки через слой n-CdS с $L = 10^2$ лк фоточувствительность заметно растет и в области III исчезает ОДФП (кривая 2). Отсюда можно заключить, что ОДФП на участке ЛАХ системы n-CdTe / p-CdS также, как и сверхлинейный участок ВАХ (рис.3, кривая 3), по-видимому, обусловлены наряду глубокими уровнями собственных дефектов CdTe ещё и гетеропереходной границей структуры. При достаточно сильных подсветках CdS с $L_{\text{пс}} = 10^3$ лк ЛАХ системы n-CdS /p- CdTe состоит из двух высокочувствительных сублинейных областей (рис.5, кривая 3).

В четвертой главе диссертации «Исследование оптических спектров слоя CdTe в пленочной гетероструктуре n-CdS/p-CdTe» излагаются результаты экспериментального исследования спектров пропускания, фотопроводимости, тока короткого замыкания и низкотемпе-

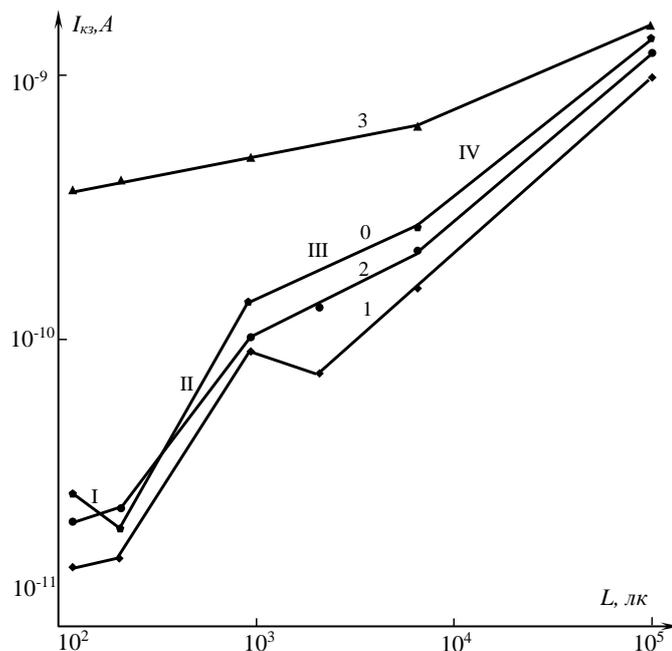


Рис.5. ЛАХ гетероструктуры n-CdS /p- CdTe: 1- без подсветки CdS; 2 - подсветка CdS, $L=500$ лк; 3- подсветка CdS, $L=3 \cdot 10^3$ лк. 0- CdTe контрольная.

ратурной люминесценции фотовольтаического слоя CdTe. Показано, что спектр низкотемпературной (4,2 К) краевой фотолюминесценции тонкого и мелко-зернистого ($h, d_{cr} \leq 1 \text{ мкм}$) поликристаллического слоя CdTe в пленочной гетероструктуре n-CdS/p-CdTe при фронтальном возбуждении (со стороны свободной поверхности CdTe) Ar⁺-лазером мощности потока $\sim 4,8 \text{ мВт/мм}^2$ состоит из доминирующей полосы собственного ($e-h$) излучения с полушириной $\Delta_A = 6-8 \text{ мэВ}$ и коротковолновым смещением красной границы $\Delta E_r \approx 30 \text{ мэВ}$ относительно E_g , её $LO+nLA$ -фононного повторения ($\Delta_B \approx 40 \text{ мэВ}$) и широкой полосы ($\Delta_D \approx 100 \text{ мэВ}$) поверхностно-интерфейсной люминесценции вблизи частоты $\hbar\omega \approx 1.50 \text{ эВ}$. Тыловая подсветка фоторезистивного слоя CdS в области собственного поглощения с интенсивностью $L_{\text{пс}} \approx 5 \cdot 10^2 \text{ лк}$ почти полностью уничтожает $e-h$ - и связанные с ней В-, D-полосы люминесценции. Вместо их возгораются асимметричная дублетная линия излучения поляритонов с продольной экситонной частотой $\hbar\omega \approx 1.59 \text{ эВ}$ ($\Delta_{ex} \approx 25 \text{ мэВ}$) и широкая линия мелких донорно-акцепторных пар ($\Delta_{DAS} \approx 40 \text{ мэВ}$) на частоте $\hbar\omega \approx 1.535 \text{ эВ}$, максимальная интенсивность которых на два порядка ниже интенсивности А-линии.

На рис.6 приведены нормированные к единице спектральные зависимости фотонапряжения $V_{\text{АФН}}$ слоя p-CdTe в гетероструктуре n-CdS/p-CdTe (кривая 1) и монослойной пленки CdTe (2), а также спектр поперечной удельной фотопроводимости $\sigma_{\text{ф}}$ пленки CdS (3) при T=300 К. Обращают на себя внимание длинноволновой и коротковолновой участки кривой 1. Существенное уменьшение $V_{\text{АФН}}$ в гетероструктуре n-CdS/p-CdTe с коротковолновой стороны объясняется появлением фотопроводимости

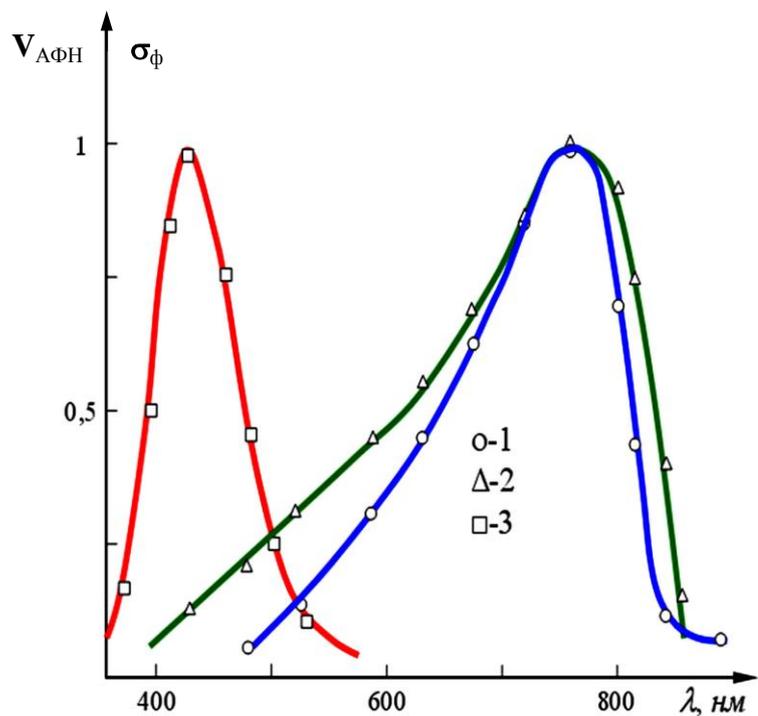


Рис.6. Спектр фотонапряжения $V_{\text{АФН}}$ слоя p-CdTe в гетероструктуре n-CdS/p-CdTe (1), монослой CdTe (2) и спектр удельной фотопроводимости CdS (3), нормированные к единице. T=300 К.

шунтирующего слоя CdS. Заметим, что подсветка со стороны подложки естественным светом интенсивностью $\sim 10^3 \text{ лк}$ полностью разрушала генерируемое в слое CdTe АФН. Смещение собственного края $V_{\text{АФН}}$ в область больших частот и появление урбаховского хвоста говорит об образовании

варизонной структуры и хвоста плотности состояний в приграничной области CdTe с CdS. Подробное изучение этой области спектра позволяет получить информацию о распределении $V_{\text{АФН}}$ по глубине пленки.

В работе показано, что в отличие от монокристаллов и крупноблочных поликристаллов, в спектрах НТФЛ мелкозернистых ($d_{cr} \leq 1 \text{ мкм}$) пленок CdTe в гетероструктуре n-CdS/p-CdTe не проявляются каналы излучения экситонов и ДАП. Это объясняется тем, что, во-первых, размер кристаллических зерен d_{cr} есть величина порядка дебаевской длины экранирования $\ell_{Di} = (2\epsilon\epsilon_0\phi_i/e^2|N_D - N_A|)^{1/2}$ (т.е. $d \approx \ell_{Di}$, где ϵ , ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость и электрическая постоянная, e -заряд электрона, N_D и N_A – концентрации доноров и акцепторов, ϕ_i - высота поверхностного потенциального барьера на границе зерен) и небольшой квазинейтральный объем зерна играет несущественную роль в формировании НТФЛ пленок. Во-вторых, приповерхностные потенциальные барьеры кристаллических зерен пленки создают внутренние встроенные электростатические поля в области объемных зарядов (ООЗ), что приводит к пространственному разделению фотогенерированных электронно-дырочных пар в нем. В результате этого возникает генерация приповерхностного фотонапряжения, а также коррелированной с ними собственная фотолуминесценция (т.е. межзонная $e-h$ рекомбинация) горячих фотоносителей при условии

$$\tau_r \leq \tau_0, \tau_M \tag{2}$$

где τ_r , τ_0 , τ_M – излучательное, безызлучательное и максвелловское времена жизни. Поскольку полное время жизни неравновесного электрона определяется как

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_0}, \quad \frac{1}{\tau_0} = \frac{1}{\tau_{ex}} + \frac{1}{\tau_{DA}} + \frac{1}{\tau_M} + \frac{1}{\tau_p} + \dots, \tag{3}$$

где τ_{ex} , τ_{DA} - времена ухода электрона из данного энергетического состояния с образованием экситонов и ДАП, τ_p - время релаксации по импульсу и т.д, то естественно, что при выполнении условия

$$\tau_r \ll \tau_{ex}, \tau_{DA} \tag{4}$$

в спектрах НТФЛ в первом приближении будет отсутствовать экситонное и ДАП-каналы излучения, которые остаются экспериментально не обнаруженными на сильном фоне $e-h$ люминесценции и её спутников. Этот случай и реализуется при наблюдении спектров люминесценции мелкозернистого слоя CdTe на подложках стекла и фоторезистора CdS (рис.7 а и б).

Как видно из кривых а и б, спектр люминесценции слоя CdTe в пленочной гетероструктуре n-CdS/p-CdTe без подсветки (кривая б) в области 750-780 нм качественно совпадает со спектром монослоя и состоит из основной линии излучения зона-зона (А-линия) с полушириной $\Delta\lambda_A \approx 7.5 \text{ нм}$ и длинноволнового крыла в виде её однократного LO-фононного повторения (В-линия). Интересно заметить, что $\Delta\lambda_A$ для кривых а и б различаются почти 2.0 раза, также как и соответствующие максимальные значения

фотонапряжения $V_{\text{АФН}}$, генерируемые моно- и бислоями. Спектральный максимум интенсивности A -линии превышает интенсивности B - и C - линии почти на порядок и с частотой меняется как

$$I(\omega) \sim (\hbar\omega - E_g - E_{LO})^{1/2} \exp\left(-\frac{\hbar\omega - E_g - E_{LO}}{kT}\right), \quad (5)$$

что отражает частотные зависимости плотности состояний простой зоны проводимости (1-множитель) и степени их заселенности (2-множитель).

Спектр люминесценции АФВ слоя CdTe на CdS без подсветки (кривая b), в отличие от спектра люминесценции монослоя CdTe (a), не содержит область горячей люминесценции (ГЛ), зато имеет дополнительно широкую D -линию «краевого» излучения 790-850 нм. Естественно ожидать, что тушение ГЛ и индуцирование D -линии возникает в результате поглощения света в приповерхностном слое p -CdTe гетероструктуры n -CdS/ p -CdTe, где происходит генерация фотоносителей и разделение их под действием

электрического поля гетероперехода, что является главной причиной образования фото-ЭДС солнечного элемента n -CdS/ p -CdTe. Внутреннее электростатическое поле гетероперехода вытягивает свободные электроны из квазинейтральных областей кристаллических зерен слоя p -CdTe, в результате чего ослабляется интенсивность и уменьшается полуширина A -линии.

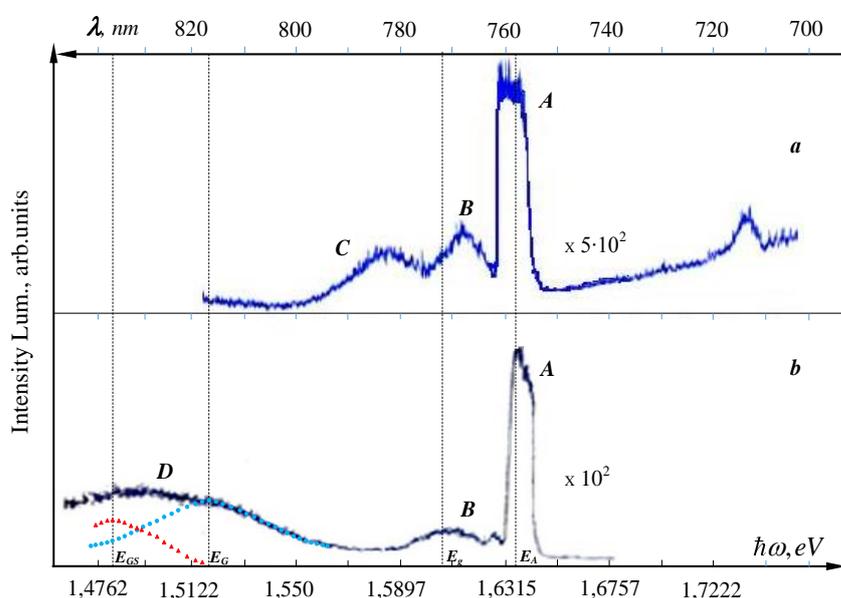


Рис.7. Сравнение спектров фотолюминесценции АФВ-слоя CdTe на стеклянной подложке (a) и на фоторезисторе CdS без подсветки (b). T=4.2 К.

В области гетероперехода в основном идет непрямая рекомбинация между свободными электронами зоны проводимости n -CdS и дырок валентной зоны p -CdTe, а также почти прямая рекомбинация с участием граничных состояний гетероперехода. Это и есть разные два механизма формирования D -линии, спектральная форма которой получается сложением двух или более отдельных спектральных линий (см. линии из кружочков и треугольников рис. 7, b), максимумы которых лежат на энергии $E_G \approx 1,52$ эВ и $E_{GS} \approx 1,48$ эВ, т.е. на расстоянии 0,086 эВ и 0,126 эВ ниже E_g запрещенной зоны CdTe и определяют по порядку значения величины $E_g - \Delta E_c$ и $E_c - E_s - \Delta E_c$. Значит, изучение D -линии фотолюминесценции слоя p -CdTe в гетероструктуре n -CdS/ p -CdTe без подсветки n -CdS позволяет непосредственно определить реальные параметры гетероперехода: ΔE_c –

разрыва зон проводимости и E_S —энергии поверхностного состояния.

Если для неравновесных носителей при фотогенерации реализуется случай, обратный (2) и (4) условие

$$\tau_r \geq \tau_M, \tau_{ex}, \tau_{DA}, \quad (6)$$

то ситуация формирования спектра люминесценции меняется. Фотоносители тока из объема кристаллических зерен уходят в основном безызлучательно, например, за счет электропроводности, образования экситонов и ДАП или поверхностной рекомбинации. Тогда непосредственный мощный вклад в НТФЛ излучательной рекомбинации разделенных ООЗ свободных электронов и дырок (А-линия) ослабляется и тем самым появляется возможность обнаружения слабых спектральных линий экситонов и ДАП в мелкозернистых полупроводниковых тонких пленках. Здесь предлагается один из нетривиальных методов реализации такой возможности в пленочной гетероструктуре n-CdS/p-CdTe-метод шунтирования сопротивлению фотовольтаического слоя p-CdTe фотопроводимостью слоя n-CdS с помощью его подсветки.

При тыловой (со стороны подложки) подсветке слоя n-CdS светом с энергией фотонов $\hbar\omega > E_g$ возбуждается её собственная фотопроводимость и при определенной интенсивности L_{nc} сопротивление n-CdS может стать меньше сопротивления фотовольтаического слоя p-CdTe. Тогда горячие фотоносители, формировавшие А-линию без подсветки, теперь уходят в основном за счет максвелловской релаксации, и, естественно, также образованием экситонов и ДАП. Это и демонстрируется на рис.8 спектрами фотолюминесценции (а) и зеркального отражения (б) слоя p-CdTe в гетероструктуре n-CdS/p-CdTe при подсветке n-CdS.

В чистых монокристаллах CdTe энергетическое положение экситонного резонанса $A_{n=1}$ при $T=4.2$ К равно $E_T=1.596$ эВ ($\lambda_T=777$ нм). Как видно из рисунка 8 а, б, данному резонансу в исследуемой поликристаллической пленке CdTe в гетероструктуре n-CdS/p-CdTe с подсветкой соответствует энергия $E'_T=1.586$ эВ ($\lambda'_T=782.5$ нм). Смещение экситонного резонанса на 10 мэВ в длинноволновую область спектра может быть объяснено большим значением затухания механических экситонов $\hbar\Gamma$,

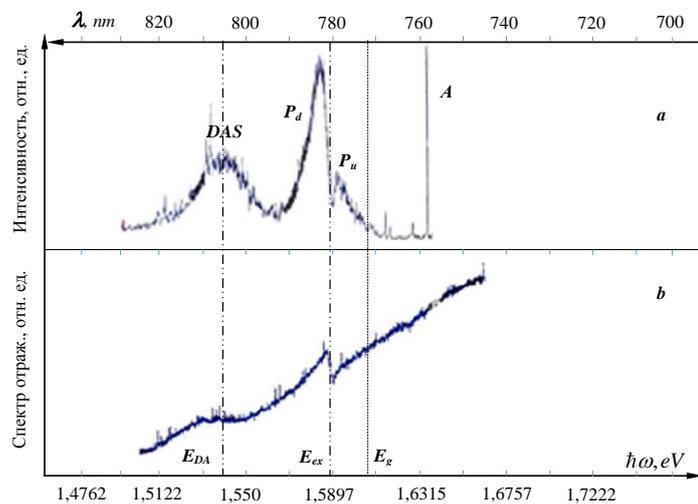


Рис. 8. Сравнение спектра фотолюминесценции АФВ-слоя CdTe в гетероструктуре n-CdS/p-CdTe с тыловой подсветкой CdS интенсивностью $L_{nc}=500$ лк (а) и спектра зеркального отражения (б) CdTe при фронтальном освещении. $T=4.2$ К.

обусловленным рассеяниями экситонов на потенциалах ГЗ слоя p-CdTe, а также его мелкозернистой структурой и влиянием гетероперехода, хотя спектр получен при температуре 4.2 К.

Дублетная структура экситонной люминесценции (кривая на или рис.8 а) хорошо описывается в рамках модели поляритонной люминесценции. Более интенсивному длинноволновому компоненту с максимумом на частоте $\hbar\omega_H=1.584$ эВ соответствует излучение поляритонов нижней ветви, а определяющий вклад в менее интенсивный коротковолновый спутник с максимумом на частоте $\hbar\omega_B=1.590$ эВ вносят излучение поляритонов верхней ветви. Частота провала $\hbar\omega_L=1.588$ эВ («продольная частота») определяет минимальную энергию продольных экситонов. Заметим, что наблюдение аналогичного спектра поляритонной люминесценции сообщалось ранее в кристаллах CdTe с составом, близким к стехиометрическому при температуре $T\approx 77$ К (т.е. при больших значениях $\hbar\Gamma$).

На рис. 9 сравниваются контуры экспериментальных спектров поляритонной люминесценции из работы Ж.Р. Паносьяна⁶ для сверхчистого кристалла CdTe при $T=77$ К (сплошная линия) и НТФЛ мелкозернистой поликристаллической пленке CdTe в гетероструктуре n-CdS/p-CdTe, снятый при $T=4.2$ К с подсветкой интенсивностью $L_{nc}=500$ лк в области собственного поглощения CdS (линия из треугольников).

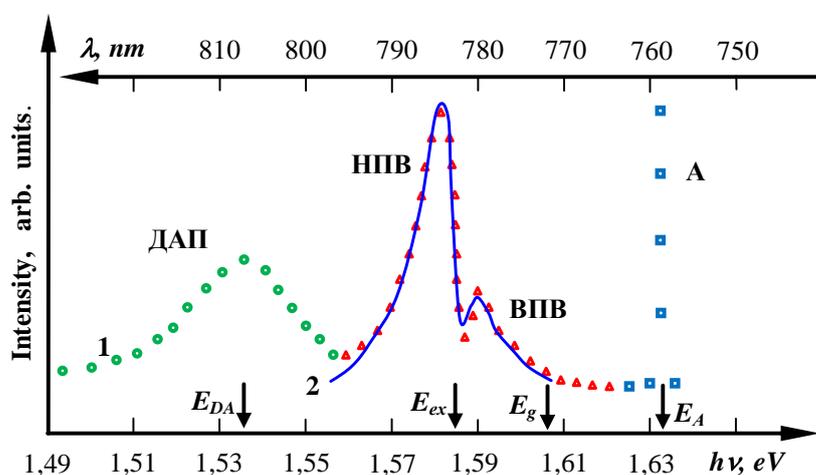


Рис.9. Фрагменты спектров фотолюминесценции поликристаллического АФВ-слоя CdTe на фоторезисторе CdS с подсветкой в области собственного поглощения CdS интенсивностью $L_{nc}=500$ лк (кривая 1, $T=4.2$ К) и чистого кристалла CdTe (кривая 2, при температуре $T=77$ К).

Видно качественно хорошее совпадение этих контуров, несмотря на то, что они принадлежат разным структурам и температурам, а их спектральный интервал довольно широко простирается от 1.570 эВ до 1.595 эВ, т.е. составляет почти 25 мэВ. Такое сильное уширение спектра поляритонной люминесценции говорит о том, что поляритоны испытывают колоссально сильное взаимодействие с фононами в чистом кристалле CdTe при $T=77$ К и с внутренними встроенными потенциалами в тонкой мелкозернистой пленке p-CdTe в гетероструктуре n-CdS/p-CdTe при $T=4.2$ К.

⁶ Паносьян Ж.Р. Излучательная рекомбинация в кристаллах теллурида кадмия // Тр. ФИ РАН.-1973. -68.-С.147-202.

Симметричный контур «краевой люминесценции» с максимумом на частоте $\hbar\omega_{DA} = 1.535 \text{ эВ}$ ($\lambda_{DA} = 805 \text{ нм}$) имеет полуширину $\hbar\Delta\omega_{DA} \approx 30 \text{ мэВ}$ (рис.9, линия 1) и в отличие от кристаллов, а также в отличие от случая без подсветки CdS (рис.7,б, D-линия), не содержит неоднородного уширения за счет LO повторений. За данный контур ответственны переходы внутри ДАП, энергия активации которой равна $E_g - \hbar\omega_{DA} = 1.606 - 1.535 = 0.071 \text{ эВ}$. Заметим, что аналогичный контур излучения ДАП ранее наблюдался для кристаллов $CdTe$ и в других работах.

Таким образом, с помощью подсветки CdS с $L_{nc} \approx 5 \cdot 10^2 \text{ лк}$ в гетероструктуре $n-CdS/p-CdTe$ удалось обнаружить линии излучения поляритонов и мелких ДАП АФВ слоя $CdTe$. При малых $L_n \leq 5 \cdot 10^2 \text{ лк}$ интенсивностях их нельзя четко выделить на фоне более сильного излучения «зона-зона» фотоносителей, разделенных встроенными электростатическими полями высокоомной поликристаллической мелкозернистой пленки. Подсветка слоя CdS уменьшает его шунтирующее АФВ сопротивление $p-CdTe$, а значит, и максвелловское время релаксации разделенных фотоносителей в объеме КЗ, благодаря чему они вытягиваются полем гетероперехода, прежде чем рекомбинировать излучательно. Это и приводит к тушению линии излучения А, В, С, обнаруживаемых без подсветки, и возгоранию линии свободных экситонов и мелких ДАП под действием подсветки фоторезистора CdS . Исследованная токопленочная гетероструктура $n-CdS/p-CdTe$ с фоторезистивными и фотовольтаическими свойствами открывает новые перспективы не только практического приложения её в качестве фотоприемника, но и для разработки новых методов изучения фотоэлектрических, оптических явлений в различных полупроводниковых микро- и наноструктурах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам разработки термовакуумной технологии получения тонкопленочной $n-CdS/p-CdTe$ гетероструктуры и исследования фотоэлектрических, оптических свойств активного слоя $p-CdTe$ можно сделать следующие **основные выводы**:

1. Разработана технология получения anomalно фотовольтаической пленки методом вакуумного испарения $CdTe$ и легирующей примеси In в количестве 3-7 масс.% из различных тиглей при давлении остаточных газов $10^{-3} - 10^{-5} \text{ мм. рт. ст.}$ на стеклянную подложку с температурой $250 - 300 \text{ }^\circ\text{C}$, причем напыление In задерживают на 2-3 мин и прекращают на 3-5 мин раньше, чем напыление $CdTe$, а термообработку проводят в атмосфере воздуха в присутствии паров $CdCl_2$ при температуре $250 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 2-4 мин.

2. Разработана технология получения пленочной гетероструктуры $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$ с фоторезистивным и АФВ свойствами на основе CdTe путем предварительного напыления слоя $n\text{-CdS}$ толщиной 0.1-0.3 мкм на стеклянную подложку с температурой 300–350 °С под углом 40–50° с последующим напылением слоя $p\text{-CdTe}$ толщиной 0.5-0.8 мкм при температуре подложки 250–280 °С под углом 130–140° в вакууме $10^{-3} - 10^{-5}$ мм. рт. ст.
3. Установлено, что полученная гетероструктура $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$ позволяет селективно управлять значением $V_{\text{АФН}}$ слоя CdTe за счет фотопроводимости слоя $n\text{-CdS}$ и использовать её в качестве оптического модулятора, фототранзистора, фотопереклювателя элементов памяти. Подсветка $n\text{-CdS}$ при $T=300\text{ K}$ светом с $h\nu \geq 2,5\text{ эВ}$ интенсивностью $L_{\text{пс}} \approx 10^2\text{ лк}$ практически снимает АФН $\approx 400\text{ В}$ в слое CdTe , генерированное другим источником естественного света при освещенности $L \approx 10^3\text{ лк}$.
4. Результаты электронно-микроскопических исследований показано, что отжиг пленок приводит к изменению размеров кристаллитов, в частности, из микрофотографий поперечного излома гетероструктуры $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$ видно, что после отжига происходит увеличение размеров зерен за счет других зерен, спрямление границ и приглаживание углов стыка. Среднее значение поперечных размеров зерна для пленок с $T_n=250^\circ\text{C}$, составляет порядка 1,2 мкм, а для пленок с $T_n=350^\circ\text{C}$ – 1,6 мкм.
5. Установлено, что ВАХ АФВ слоя $p\text{-CdTe}$ в гетеросистеме $n\text{-CdS} / p\text{-CdTe}$ без подсветки, также как и ВАХ монослоя CdTe носит монотонный линейный характер, а при подсветке $n\text{-CdS}$ светом с $h\nu \geq 2,52\text{ эВ}$ и $L_{\text{пс}} < 10^2\text{ лк}$ состоит из трех характерных участков: квазилинейные с $R \approx 5 \cdot 10^9\text{ Ом}$ и $1,8 \cdot 10^{10}\text{ Ом}$, сверхлинейный ($3,2 \cdot 10^9\text{ Ом}$). Причем с ростом интенсивности $L_{\text{пс}}$ подсветки нелинейный участок сглаживается и исчезает вместе со вторым линейным участком при достаточно больших значениях $L_{\text{пс}} > 10^2\text{ лк}$, т.е. $n\text{-CdS}$ полностью шунтирует $p\text{-CdTe}$ и ВАХ определяется фототоком через слои $n\text{-CdS}$. Причиной появления переходного нелинейного участка является эффект лимитирования туннельно-рекомбинационного тока через гетероструктуры $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$.
6. Показано, что с ростом интенсивности $L_{\text{пс}}$ подсветки $n\text{-CdS}$ сильно уменьшается значение АФН в слое $p\text{-CdTe}$, причем ЛВХ $V_{\text{АФН}}(L)$ гетероструктуры $n\text{-CdS}/p\text{-CdTe}$ качественно не меняется. Это означает, что значения $V_{\text{АФН}}$ пропорционально уменьшаются по всему интервалу интенсивности L , следовательно, подсветка фоторезистора $n\text{-CdS}$ не влияет на асимметрию микропотенциальных барьеров, генерирующих фотонапряжение.
7. Впервые установлено, что спектр низкотемпературной (4,2 К) краевой фотолюминесценции тонкого и мелкозернистого ($h, d_{\text{cr}} \leq 1\text{ мкм}$)

фотовольтаического слоя CdTe в пленочной гетероструктуре n-CdS/p-CdTe при фронтальном возбуждении Ag^+ -лазером мощности потока $\sim 4,8 \text{ мВт/мм}^2$ состоит из доминирующей полосы собственного ($e-h$) излучения с полушириной $\Delta_A = 8-10 \text{ мэВ}$ и коротковолновым смещением красной границы $\Delta E_r \approx 25 \text{ мэВ}$ относительно E_g , её $LO+nLA$ -фононного повторения ($\Delta_B \approx 30 \text{ мэВ}$) и широкой полосы ($\Delta_D \approx 100 \text{ мэВ}$) поверхностно-интерфейсной люминесценции на частоте $\hbar\omega \approx 1.49 \text{ эВ}$.

8. Впервые в гетероструктуре n-CdS/p-CdTe обнаружены линии излучения поляритонов и мелких донорно-акцепторных пар фотовольтаического слоя p-CdTe с помощью подсветки $L_{nc} \approx 5 \cdot 10^2 \text{ лк}$ слоя n-CdS, что уменьшает его шунтирующее сопротивление, а значит, и максвелловское время релаксации разделенных фотоносителей в объеме кристаллических зерен, благодаря чему они вытягиваются полем гетероперехода, прежде чем рекомбинировать излучательно. Это и приводит к тушению линий излучения A, B, C, обнаруживаемых без подсветки, и возгоранию линии свободных экситонов и мелких донорно-акцепторных пар.

**SCIENTIFIC COUNCIL of PhD.03/27.02.2020.FM.106.01
ON AWARD OF PHYLOSOFY DOCTOR DEGREE
AT FERGHANA POLITECHNIC INSTITUTE OF UZBEKISTAN**

FERGHANA POLYTECHNIC INSTITUTE

OLMOSBEK MAXAMMATDOVIDOVICH MAMATOV

**DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY AND RESEARCH OF PHYSICAL
PROPERTIES OF PHOTOVOLTAIC FILM STRUCTURES ON A BASIS
n-CdS/p-CdTe**

01.04.07- Condenced matter physics

**DISSERTATION ABSTRACT
of the Doctor of Philosophy (PhD) on Physical and Mathematical sciences**

Ferghana – 2021

The theme of dissertation of doctor philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences was registered at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2020.3.PhD/FM523.

Dissertation has been prepared at Ferghana Polytechnic Institute.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the website of Scientific council (www.ferpi.uz) and on Information and educational portal "ZiyoNet" (www.ziynet.uz).

Scientific supervisor: **Nosirjon Haydarovich Yuldashev**
Doctor of physical-mathematical sciences, professor

Official opponents: **Salim Madrakhimovich Otajonov**
Doctor of physical-mathematical sciences

Qudratullo Mamarasulovich Kuchkarov
Doctor of physical-mathematical sciences (DSc)

Leading organization: **Andijan State University**

Dissertation defense will take place "___" _____ 2021 at ____ at the meeting of the Scientific Council PhD.03 / 27.02.2020.FM.106.01 at the Fergana Polytechnic Institute. Address: 150107, Fergana, Fergana str., 86. Phone: (+99873) 241-12-06, fax (+99873) 241-12-06, e-mail: uzferfizika@mail.ru , oline ZOOM.

The thesis can be found in the library (CIR) of the Institute. (registered under No. _____) Address: 150107, Ferghana, st. Ferghana, 86. Tel: (+99873) 241-12-06,

The abstract of the dissertation sent out on "___" _____ 2021.
(Mailing report No. ___ on "___" _____ 2021)

N.A. Sultanov
Vice-Chairman of scientific council
on award of doctor philosophy,
DSc in physics and mathematics, professor

B.Z. Polvonov
Scientific secretary of scientific council
on award of doctor philosophy,
PhD in physics and mathematics, docent

R.Ya. Rasulov
Chairman of scientific Seminar under Scientific
Council on award of doctor philosophy,
DSc in physics and mathematics, professor

INTRODUCTION (abstract of PhD dissertation)

The aim of research work is to develop a thermal vacuum technology obtaining a film heterostructure n-CdS/p-CdTe with photoresistive, APV properties and study of photoelectric, optical properties of the p-CdTe active layer.

In accordance with the goal it was necessary to solve the following **tasks**:

development of thermal vacuum technology for producing fine-grained CdTe:In films and n-CdS/p-CdTe film heterostructure with anomalous photovoltaic properties;

X-ray and electron microscopic studies of the substructure parameters of crystal grains of the n-CdS/p-CdTe heterostructure;

analysis of the electrophysical and photoelectric properties of the p-CdTe photovoltaic film in the n-CdS/p-CdTe heterostructure;

study of the low-temperature photoluminescence spectra of a p-CdTe photovoltaic film in an n-CdS/p-CdTe heterostructure with and without additional illumination of the n-CdS photoresist layer.

The object of the research work is fine-grained CdTe: In films and a thin-film n-CdS/p-CdTe heterostructure obtained by thermal evaporation in vacuum.

The subject of research is thermal vacuum technological processes for obtaining thin-film structures CdTe:In, n-CdS/p-CdTe and electrophysical, photoelectric, optical phenomena in them.

Research methods. To solve the set of tasks, a modern thermal vacuum technique for the technology of obtaining thin semiconductor films, methods of X-ray diffraction and electron microscopic examination, well-known measuring techniques for determining the CVC, LAX, LVH and other photoelectric and optical spectra of semiconductor materials were used.

The scientific novelty of the research is as follows:

a technology has been developed for obtaining a fine-grained photovoltaic ($d - 1 \mu\text{m}$) film of CdTe: In by the method of thermal evaporation in a vacuum, which makes it possible to increase the short-circuit current strength by two orders of magnitude, and the value of anomalous photovoltage by almost an order of magnitude than that of undoped samples;

a thermal vacuum technology for producing a n-CdS/p-CdTe film heterostructure has been developed, which makes it possible to selectively control the value of the transverse photovoltage of the p-CdTe layer using n-CdS illumination from the side of the substrate from the spectral region of its intrinsic absorption;

it was found that the I - V and LA characteristics of the p-CdTe layer in the n-CdS/p-CdTe heterostructure with illumination $L_{ps} \leq 10^2$ lx of the n-CdS photoresistor acquire nonlinear sections with negative differential resistance, which disappear at sufficiently large $L_{ps} \geq 10^3$ lx, which is associated with the effect of shunting the p-CdTe layer by n-CdS photoconductivity;

it was established for the first time that the spectrum of the edge photoluminescence of the p-CdTe layer in the n-CdS/p-CdTe heterostructure

consists of a dominant self-emission band with a short-wavelength shift of the red boundary relative to E_g , its phonon repetition, and a wide band of surface-interface luminescence.

For the first time, emission lines of polaritons with a doublet structure and donor-acceptor pairs of the p-CdTe photovoltaic layer in the n-CdS/p-CdTe heterostructure were detected using the illumination of the n-CdS layer, which is associated with the fine-grain size of the p-CdTe layer and the shunting of its APV resistance to the photoconductivity of the layer n-CdS.

Implementation of research results. Based on the results of the development of a thermal vacuum technology for producing fine-grained CdTe: In films and n-CdS/p-CdTe film heterostructure and studies of their physical properties;

the Patent of invention of the Intellectual Property Agency of the Republic of Uzbekistan (No. IAP 05384, 28.04.2017) was obtained for the development of a method for obtaining an abnormally photovoltaic CdTe: In film used in the field of technology for obtaining materials for optoelectronics and solar technology based on cadmium chalcogenides. The developed technology provided an increase in the power of the photovoltaic film used as a photovoltaic voltage generator;

the proposed development of original technological modes for obtaining a n-CdS / p-CdTe film heterostructure with photovoltaic and photoresistive properties by the method of thermal vacuum evaporation, the identification of new spectral lines and mechanisms of their formation in its photoluminescence was tested at FOTON JSC (Reference No. 241 dated 06/14/2021 y) Association Uzeltekhsanoat. The obtained scientific results can be used at the enterprises of Uzeltekhsanoat. It is shown that the application of this scientific innovation opens up new possibilities for materials science and optical spectroscopy of semiconductor structures.

Approbation of research results. The main results of the dissertation work were reported and discussed at 8 international and 1 republican scientific and practical conferences.

Publication of research results. 16 scientific papers have been published on the topic of the dissertation, including 7 articles in journals recommended by the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for the publication of the main scientific results of dissertations.

The structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion, and a list of used literature. The thesis text is presented on 125 pages, including 2 tables and 42 figures.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (1 часть; part 1)

1. Ахмадалиев Б.Ж., Каримов М.А., Маматов О.М., Полвонов Б.З., Юлдашев Н.Х. Способ получения аномально фотовольтаических пленок. // Патент РУз № IAP 05384 от 10.03.2017
2. B.J. Akhmadaliev, B.Z. Polvonov, O.M. Mamatov, N.Kh. Yuldashev. Low-Temperature Photoluminescence of Fine-Grained CdTe Layer in n-CdS/p-CdTe Film Heterostructure. // International Journal of Modern Physics and Application. , -USA, 2017,-Vol. 4, No. 5, pp. 28-33. Article ID 1650077. (№2. JIF, IF: 2.004).
3. Mamatov O. M., Yuldashev N. Kh. Feature of technology for obtaining by thermovacuum evaporation method of film n-CdS / p-CdTe heterostructures with photovoltaic and photoresistive properties. // European Sciences Review. – Vienna, 2021. – No. 1 - 2. – PP. 97 - 100. (Global impact factor =1.44. 05.00 00, №3).
4. Mamatov O.M. Preparation by thermovacuum evaporation of film heterostructure n-CdS / p-CdTe with anomalous photoelectric properties. // Scientific Technical Journal. 2020.V.3, №5. PP. 6-10 (05.00.00, №20).
5. Ахмадалиев Б.Ж., Маматов О.М., Маматхонова Г.Ш., Полвонов Б.З., Юлдашев Н.Х. Некоторые спектральные характеристики пленочной гетероструктуры $n-CdS/p-CdTe$ с фоторезистивными и фотовольтаическими свойствами. // Естественные и технические науки, №6, 2014, С. 17-19 (JIF, IF:0.417).
6. Маматов О.М., Полвонов Б.З., Юлдашев Н.Х. Вольт - амперные характеристики гетероструктуры $n-CdS/p-CdTe$ в поперечном режиме фотопроводимости. // Научно-Технический журнал ФерПИ. - Фергана, 2013, №1, С. 7-12 (05.00.00, №20).
7. Маматов О.М., Юлдашев Н.Х. Исследование фотовольтаических и фоторезистивных свойств тонкого слоя CdTe в пленочной гетероструктуре n-CdS/p-CdTe. // Научно-Технический журнал ФерПИ. -Фергана, 2019, №4, С. 9-16 (05.00.00, №20).

II бўлим (2 часть; part 2)

8. Маматов О.М. Фотоэлектрические свойства активного слоя CdTe в пленочной гетероструктуре n-CdS/p-CdTe // Scientific Publishing Center «InterConf».USA, November 26-29, 2020. PP. 1256-1259.
9. Akhmadaliev B. J., Mamatov O. M., Polvonov B. Z., Yuldashev N. Kh. Photoluminescence of fine-grained CdTe layer in $n-CdS/p-CdTe$ film heterostructure. // Материалы IV Международной конференции по Оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых

микро- и наноструктурах. Ферганский политехнический институт, 25-26 мая 2018. Фергана. С.87-93.

10. Ахмадалиев Б.Ж., Маматов О.М., Полвонов Б.З., Урмонов С.Р., Юлдашев Н.Х. Фотолюминесценция мелкозернистой поликристаллической пленки CdTe в гетероструктуре n-CdS/p-CdTe // Материалы международной научно-практической конференции “Наука и инновационные технологии-основа развития Кыргызской Республики”, Ошский технологический университет. Ош, 11-12 октября 2019 (Известия ОшТУ, 2019 №3. С.187-194).
11. Маматов О.М., Мамадиева Д.Т., Насиров М.Х., Юлдашев Н.Х., Юлчиев И.И. Фоторезистивные и фотовольтаические свойства пленочной гетероструктуры n-CdS/p-CdTe // Материалы международной научно-практической конференции “Наука и инновационные технологии-основа развития Кыргызской Республики”, Ошский технологический университет. Ош, 11-12 октября 2019 (Известия ОшТУ, 2019 №3. С.195-201).
12. Маматов О.М., Юлдашев Н.Х.. Фотовольтаические и фоторезистивные свойства поликристаллического слоя CdTe в пленочной гетероструктуре n-CdS/p-CdTe. //The international final conference of the RENES project of the European Union ERASMUS + programm 574055-EPP-1-2016-1-IT-RPPKA2-CBHE-JP «Development of Master programm in renewable energy sources and sustainabe environment», September, 26-27th, 2019/ The Turin Polytechnical university in Tashkent. PP. 46-53.
13. Маматов О.М., Полвонов Б.З., Юлдашев Н.Х.. Особенности фотолюминесценции мелкозернистого поликристаллического слоя CdTe в пленочной гетероструктуре n-CdS/p-CdTe. // Материалы Республиканской научно-практической конференции «Физика возобновляемых источников энергии и устойчивой окружающей среды». Каршинский государственный университет. Карши, 23-24 апреля 2019. С.31-33.
14. Маматов О.М., Мамадиева Д.Т., Юлдашев Н.Х., Юлдашева Ё.Н. Фотоэлектрические характеристики пленочной гетероструктуры n-CdS/p-CdTe. // Материалы V Международной конференции по Оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро- и наноструктурах. Ферганский политехнический институт, 13-14 ноября 2020. Фергана. С.223-225.
15. Маматов О.М., Юлдашев Н.Х. Некоторые вопросы технологии изготовления пленочных гетероструктур n-CdS/p-CdTe с фоторезистивными и фотовольтаическими свойствами. // Материалы V Международной конференции по Оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро- и наноструктурах. Ферганский политехнический институт, 13-14 ноября 2020. Фергана. С.221-223.
16. Юлдашев Н.Х. Маматов О.М. Исследование фотовольтаических свойств поликристаллических пленок CdTe, CdTe:In с глубокими

уровнями // Scientific Collection «InterConf» : Scientific horizon in the context of social crises (February 6-8, 2021). PP. 926-930.

Илмий раҳбар

Н.Х. Юлдашев

Талабгор

О.М. Маматов

Авторефератнинг ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги нусхалари
Фарғона политехника институти муассислигидаги “**Scientific technical
journal**” журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилди.
(06.05.2021й.)

Босишга рухсат этилди: 2021 й. Нашриёт босма табағи–3,5.
рақамли босма усули. Times гарнитураси.
Шартли босма табағи–1,75. Бичими 64x108 1/16. Адади 100.

“Poligraf Super Servis” МЧЖ
150100. Фарғона шаҳар, Авиасозлар кўчаси 2-уй

