

**ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ, ИОН ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР  
ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ, САМАРҚАНД ДАВЛАТ  
УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ  
DSc.27.06.2017. FM./T.34.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ  
ҚОРАҚАЛПОҚ ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ**

**УТЕНИЯЗОВ АБАТБАЙ КУРБАНИЯЗОВИЧ**

**КАДМИЙ ТЕЛЛУРИДИ АСОСИДАГИ ИНЖЕКЦИОН  
ФОТОҚАБУЛҚИЛГИЧЛАРДАГИ ЭЛЕКТРОН ЖАРАЁНЛАР**

**01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси**

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)  
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

**Тошкент – 2018**

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

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

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

**Утениязов Абатбай Курбаниязович**

Қадмий теллуриди асосидаги инжекцион фотоқабулқилгичлардаги  
электрон жараёнлар ..... 3

**Утениязов Абатбай Курбаниязович**

Электронные процессы в теллурид кадмиевых инжекционных  
фотоприемниках ..... 17

**Uteniyazov Abatbay Kurbaniyazovich**

Electronic processes research in telluride cadmium injection  
photoreseivers ..... 31

**Эълон қилинган ишлар рўйхати**

Список опубликованных работ  
List of published works ..... 34

**ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ, ИОН ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР  
ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ, САМАРҚАНД ДАВЛАТ  
УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ  
DSc.27.06.2017. FM./T.34.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ  
ҚОРАҚАЛПОҚ ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ**

**УТЕНИЯЗОВ АБАТБАЙ КУРБАНИЯЗОВИЧ**

**КАДМИЙ ТЕЛЛУРИДИ АСОСИДАГИ ИНЖЕКЦИОН  
ФОТОҚАБУЛҚИЛГИЧЛАРДАГИ ЭЛЕКТРОН ЖАРАЁНЛАР**

**01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси**

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)  
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

**Тошкент – 2018**

**Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2017.2PhD/FM101 рақам билан рўйхатга олинган.**

Диссертация ЎзР ФА Физика-техника институтида бажарилган.

Диссертация автореферати икки тилда (ўзбек, рус) веб-саҳифанинг [fti.uz](http://fti.uz) ҳамда «Ziyo Net» ахборот-таълим портали [www.ziyounet.uz](http://www.ziyounet.uz) манзилларига жойлаштирилган.

**Илмий раҳбар:** **Мирсагатов Шавкат Акрамович**  
физика-математика фанлари доктори, профессор

**Расмий оппонентлар:** **Мамадалимов Абдугафур Тешабаевич**  
физика-математика фанлари доктори, академик

**Аюханов Рашид Ахметович**  
физика-математика фанлари доктори

**Етакчи ташкилот:** **Тошкент ахборот технологиялари университети**

Диссертация ҳимояси Физика-техника институти, Ион-плазма ва лазер технологиялари институти ва Самарқанд давлат университети ҳузуридаги DSc.27.06.2017. FM./T.34.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2018 йил «\_\_» \_\_\_\_\_ соат \_\_\_\_ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100084, Тошкент шаҳри, Бодомзор йўли кўчаси, 26-уй. Тел./факс: (99871) 235-42-91; e-mail: [info.fti@uzsci.net](mailto:info.fti@uzsci.net), Физика-техника институти мажлислар зали.).

Диссертация билан Физика-техника институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин. ( \_\_ рақам билан рўйхатга олинган.). Манзил: 100084, Тошкент шаҳри, Бодомзор йўли кўчаси, 26-уй. Физика-техника институти. Тел./факс: (99871) 235-30-41.

Диссертация автореферати 2018 йил «\_\_» \_\_\_\_\_ да тарқатилди.  
(2018 йил «\_\_» \_\_\_\_\_ даги \_\_\_\_ рақамли реестр баённомаси.)

**Н.Р. Авезова**

Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш раиси т.ф.д., катта илмий ходим

**А.В. Каримов**

Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш илмий котиби ф.-м.ф.д., профессор

**И.Г. Атабаев**

Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш қошидаги илмий семинар раиси ф.-м.ф.д., профессор

## КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертациясининг аннотацияси)

**Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати.** Жаҳон амалиётида жадал ривожланаётган ярим ўтказгичлар физикаси соҳасида спектрнинг кўзга кўринадиган ва ультрафиолет соҳасида юқори сезгирликка эгаллиги билан фарқ қилувчи фотоқабулқилгич тузилмаларини ишлаб чиқишга алоҳида эътибор қаратилмоқда. Шу жумладан янги яримўтказгич материалларни топиш ва улар асосида фотоэлементлар ва фотоқабулқилгичлар сингри юқори самарадорликка эга бўлган замонавий асбобларни яратиш,  $A^2B^6$  бирикмалар асосида ярим ўтказгичли фотосезгир тузилмаларни олиш технологиясини яратиш биринчи галдаги вазифалардан бири ҳисобланади.

Бугунги кунда жаҳонда фотоқабулқилгичлардаги, шу жумладан *p*-CdTe асосидаги тузилмаларидаги электрон ва инжекция жараёнларини ўрганишга катта эътибор қаратилмоқда. Бу борда, мақсадли илмий изланишларни куйидаги йўналишларда олиб бориш муҳим ҳисобланади: донадорлиги устунсимон кўринишдаги кучли компенсацияланган катта қаршиликли CdTe юпқа қатламларини олиш ва улар асосида металл-оксид-ярим ўтказгич (МОЯЎ)-тузилмаларини яратиш; Al – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – *p*-CdTe – MoO<sub>3</sub> – Mo кўринишдаги МОЯЎ-тузилмаларининг электрофизикавий ва оптик хусусиятларини ўрганиш ва уларни инжекцияли фотоқабулқилгич сифатида фойдаланиш мумкинлигини тадқиқ қилиш; ярим ўтказгичли фотоқабулқилгич тузилмаларнинг хона ҳароратида ишлай олиш қобилиятини таъминлаш йўллари излаб топиш.

Ўзбекистон Республикасини бундан кейин ривожлантириш Стратегиясига мос ҳолда замонавий фаннинг сўнгги ютуқларини амалиётга тадбиқ қилишга ва шу аснода миллий товарларимизнинг ички ва ташқи бозорлардаги рақобатбардошлилигини таъминлашга алоҳида аҳамият берилмоқда. Жумладан яримўтказгичли электроника элементлари соҳасида импорт ўрнини босиш масалалари муҳим вазифалардан бири ҳисобланади. Бу борада ички кучайтириш хусусиятига эга бўлган инжекцияли фотоқабулқилгичларни яратиш ва унда кечадиган электрон жараёнларни аниқлаш муҳим аҳамиятга эга.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сонли «Ўзбекистон Республикасини янада ривожланиши бўйича ҳара-катлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони, 2017 йил 13 февралдаги ПҚ-№2772-сонли «2017-2021 йилларда электроника саноатини ривожлантиришнинг устувор йўналишлари тўғрисида»ги ва 2017 йил 17 февралдаги ПҚ-№2789-сонли «Фанлар академиясининг фаолиятини, илмий тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги Қарорлари ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга хизмат қилади.

**Тадқиқотнинг Республиканинг фан ва технологияларни ривожлантириш устувор йўналишларига мослиги.** Диссертация Ўзбекистон Республикасининг фан ва технологияларни ривожлантиришнинг III. «Энергетика, энерго-ресурс тежамкорлиги, транспорт, машина ва асбобсозлик, замонавий

электроника, микроэлектроника, фотоника ва электрон асбобсозликни ривожлантириш» устувор йўналишига мувофиқ бажарилган.

**Муаммонинг ўрганилганлик даражаси.** Инжекцияли фотоқабулқилгичлар кенг оммага маълум бўлган оптоэлектрон асбобларнинг бири ҳисобланади. Ҳар қандай инжекцияли фотоқабулқилгичнинг ишлаши,  $p-n$ - ва  $p-i-n$ -тузилмаларга тўғри йўналишда кучланиш берилганда кузатиладиган фототокнинг инжекцияли кучайишига асосланган. Бундай асбобларни ишлаб чиқишга В.И. Стафеевнинг ишлари асос бўлган. Ҳозирги кунда Ge, Si ва GaAs ярим ўтказгичлар асосида ишлаб чиқилган инжекцияли фотоқабулқилгичлар маълум бўлиб, улар фақат паст ҳароратлардагина самарали ишлай оладилар, яъни улар хона ҳароратида ишлай олмайдилар. Шу нуқтаи назардан  $A^2B^6$  гуруҳига мансуб ярим ўтказгичлар, жумладан кадмий теллуриди (CdTe) мақбул ҳисобланади.

Инжекцияли фотоқабулқилгичларни яратиш бўйича тадқиқотлар бугунги кунда ҳам давом этмоқда. Мисол учун М.К. Баҳадырхановнинг, А.Т. Мамадалимовнинг ва А.В. Каримовларнинг<sup>1</sup> кремний ва галлий арсениди асосида база материалининг параметрларига боғлиқ ҳолда спектрал диапазонини бошқариш мумкин бўлган янги типдаги инжекцияли фотоқабулқилгичларни яратишга бағишланган ишлари маълум.  $A^2B^6$  ярим ўтказгич брикмалар, жумладан CdTe асосида инжекцияли фотоқабулқилгичларни яратиш бўйича тадқиқотлар илк бор профессор Ш.А. Мирсағатов гуруҳида бошланган. Масалан, Ш.А. Мирсағатов<sup>2</sup> ва И.Б. Сапаев томонидан  $n^+CdS - nCdS - pSi$ -гетеротузилма асосида инжекцияли фотоқабулқилгичлар яратилган. Инжекцияли фотоқабулқилгичларни ишлаб чиқиш бўйича кейинги ишлар содда технологик ечимларни излаб топшга ва уларнинг спектрал сезгирлик диапазонини кенгайтиришга қаратилган бўлиши лозим.

**Тадқиқотнинг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги.** Диссертация иши ЎзР ФА «Физика – Қуёш» ИИЧБ Физика-техника институти ФА-Ф032 «ЎзР ФА фундаментал тадқиқотлар фонди» 2010-2015 й.й.; ДИТЛ ФА-А3-Ф024 «Газ алангали қозонлар учун аланга ёнганлигини назорат қилишнинг компакт тизимини ишлаб чиқиш» (2015-2017 й.й.) илмий тадқиқотлари доирасида бажарилган.

**Тадқиқотнинг мақсади** донадорлиги устунсимон тузилишга эга бўлган  $p$ -CdTe юпқа қатламлари асосида ички кучайтириш хусусиятига эга бўлган инжекцияли фотоқабулқилгични яратиш ва унда кечадиган электрон жараёнларни аниқлашдан иборат.

Мақсадга эришиш учун қуйидаги **тадқиқот масалалари** қўйилди:

устунсимон донадорликка эга бўлган кучли компенсацияланган катта қаршиликли CdTe юпқа қатламларини олиш ва улар асосида МОЯЎ-

<sup>1</sup> Степень изученности проблемы по теме диссертационной работы были выполнены на базе: Karimov A.V., Karimova D.A. Three-junction Au/AlGaAs(n)/GaAs(p)/Ag photodiode. Science in Semiconductor Processing. Vol.6, Issues 1-3, 2003, p.p.-137-142, Инжекционно-полевой фотодиод/ Патент РУз № IAP 03974 от 09.06.20.09. Официальные известия. – 2009. - № 7.

<sup>2</sup> Mirsagatov Sh.A., Sapaev I.B. Injection photodiodes based on a  $p$ -Si –  $n$ -CdS –  $n^+$ -CdS // Semiconductors, 2014, vol. 48, № 10, pp. 1363-1369. и других источников.

тузилмасини яратиш;

Al – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – *p*-CdTe МОЯЎ-тузилмасининг электрофизикавий ва фото-электрик хусусиятларини ва уларни инъекцияли фотоқабулқилгич сифатида қўллаш мумкинлигини тадқиқ қилиш;

*p*-CdTe асосидаги инъекцияли фотоқабулқилгичларнинг электрофизикавий хусусиятларига ультратовушли нурлантириш таъсирини тадқиқ қилиш.

**Тадқиқотнинг объекти** кучли компенсацияланган катта қаршиликли *p*-CdTe юпқа қатламлари асосида олинган, базаси турли қалинликка эга бўлган Al – *p*-CdTe – Мо-тузилмалардан иборат.

**Тадқиқот предмети** Al – *p*-CdTe – Мо-тузилмалардаги электрон жараёнлар, ҳамда уларнинг вольтампер ва спектрал характеристикаларининг шаклланиш механизмларидан иборат.

**Тадқиқот услублари.** Тадқиқотларни амалга оширишда солиштирма қаршиликли ўлчашнинг стандарт бир зондли ва тўрт зондли услублари, вольтампер, вольтфарада ва спектрал характеристикаларни ўлчашнинг синалган услублари, ДРОН-3М (излучение CuK $\alpha$ ,  $\lambda = 0.15418$  нм) рентгенли дифрактометрида рентгенфаза тадқиқот услубларидан фойдаланилган.

**Ишнинг илмий янгилиги** қуйидагилардан иборат:

Al – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – *p*-CdTe – МоО<sub>3</sub> – Мо-тузилмадаги ток ўтказиш механизмлари МОЯЎ-тузилмаларга хос бўлган, тўртта соҳадан иборат бўлган хажмий зарядлар билан чекланган тоқлар механизми билан аниқланиши топилган. Биринчи соҳа чизикли, иккинчи соҳа чуқур жойлашган қамраб олувчиларнинг тўлиши билан боғлиқ квадрат, учинчи соҳа рекомбинация жараёнида электронларнинг икки сатҳли комплекслар томонидан секинлаштирилиши билан боғлиқ тоқнинг кескин ошиши ва саёз қамраб олувчиларнинг тўлдирилиши ҳисобига квадрат боғлиқликка ўтадиган кўринишга ўтиши аниқланган;

база соҳаси қалинлигининг камайиши спектрнинг киритмалар соҳасида фототашувчилар генерациясида қатнашувчи киритмалар микдорининг камайиши ҳисобига хусусий ютиш соҳасида фотоезгирликнинг ошишига олиб келиши тажрибада кўрсатилган;

ультратовушли таъсир сирт потенциалининг  $\psi_s \approx 0.17$  eV дан  $\psi_s \approx 0.25$  eV гача ошишига сабаб бўладиган нуқсонларнинг тартибланишига олиб келиши натижасида тўғри ток ортиб, тескари ток камайиши тасдиқланган;

Al–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–*p*-CdTe–МоО<sub>3</sub>–Мо-тузилмада бирламчи фототоқнинг кучайиш коэффициенти ёритилганликнинг кичик интенсивлигида ва кучланишнинг тўғри йўналишларида юқори қийматлар қабул қилиши асосланган.

**Тадқиқотнинг амалий натижалари** қуйидагилардан иборат:

Al – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – *p*-CdTe – МоО<sub>3</sub> – Мо кўринишидаги МОЯЎ-тузилма асосида тайёрланган ички кучайтиришга эга бўлган инъекцияли фотоқабулқилгич спектрнинг ( $\lambda=400\div 1000$  нм) тўлқин узунликлари оралиғидаги оптик сигналларни қабул қилиш учун қўлланилган;

диссертация ишида олинган экспериментал натижалар спектрнинг кўзга кўринувчи қисмидаги жуда кичик ёритилганлик интенсивлигига эга бўлган сигналларни қабул қилувчи қурилмаларни яратишда асос бўлиб хизмат қилган.

**Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги** замонавий илмий ва техно-

логик усуллар, тадқиқотларнинг стандарт ва синалган услублари, ўлчашнинг ва олинган натижаларга ишлов беришнинг эркин комплекс услублари қўлланилганлиги билан тасдиқланган.

**Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.**

Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти шундан иборатки, олиб борилган тадқиқотлар инъекцияли фотодиодлар ва уларда содир бўладиган электрон жараёнлари тўғрисидаги физикавий тушунчаларнинг кенгайишига имкон беради.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти шундан иборатки, устунсимон донаторликка эга бўлган  $p$ -CdTe юпқа қатламлари асосида инъекцияли фотоқабулқилгичларни ишлаб чиқаришда қўлланилиши мумкин.

**Тадқиқот натижаларининг амалиётга жорий қилиниши.**

Донаторлиги устунсимон тузилишга эга бўлган  $p$ -CdTe юпқа қатламлари асосида ички кучайтиришга эга бўлган инъекцияли фотоқабулқилгични яратиш ва унда кечадиган электрон жараёнларни аниқлаш асосида:

кадмий теллуриди асосида ярим ўтказгичли тузилмаларни олишнинг оптимал технологик режимлари Ф-2-37 рақамли «Ярим ўтказгичларда лазерли индукцияланган нуқсонлар ҳосил бўлишининг ночизикли жараёнлари» (2012-2016 йй.) фундаментал лойиҳада металл-ярим ўтказгич чегарасидаги сирт зарядларнинг фотосезгир тузилмаларнинг ток характеристикаларига таъсирини бартараф қилишда қўлланилган (Ўзбекистон Республикаси Фан ва технологиялар агентлигининг 2017 йил 7 ноябрдаги ФТА-02.11/1043-сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш инъекцияли фотоқабулқилгичлар ва фотодиодларнинг эксплуатация жараёнидаги ишончилигини назорат ва башорат қилишнинг экспресс услубини ишлаб чиқиш имконини берган;

сирт потенциалини бошқаришнинг физикавий усуллари Т15МН-001 рақамли «Қопланган тиббиёт асбобларига металлоценлар ва фуллерид металлларнинг физик ва антибактериал хусусиятларини тадқиқ қилиш ва медицина асбобларида қўллаш имкониятларини аниқлаш» (2015-2017 йй.) халқаро лойиҳада гетероўтишли тузилмаларда сирқиш тоқларини камайтириш учун қўлланилган (Беларусь Миллий ФА Иссиқлик ва масса алмашинуви институтининг 2017 йил 21 декабрдаги 32/Асп - сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш гетеротузилмалардаги сирқиш тоқларини ўн баравар камайтириш имконини берган.

**Тадқиқот натижаларининг апробацияси.** Диссертация ишининг асосий натижалари 4 та халқаро ва 6 та республика илмий-амалий конференцияларида баён этилган ва муҳокамадан ўтказилган.

**Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги.** Диссертация мавзуси бўйича 17 та илмий иш чоп қилинган бўлиб, уларнинг 7 таси Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг диссертация ишларининг илмий натижаларини чоп этиш тавсия қилинган илмий нашрларда.

**Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми.** Диссертация таркиби кириш, тўртта боб, хулоса ва фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловадан иборат. Диссертация 121 та матнли бетда баён этилган бўлиб, 50 та расм, 6 та жадвал ва 93 номдаги фойдаланилган адабиётлар рўйхатини ўз ичига олган.



## ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

**Кириш қисмида** ўтказилган тадқиқотларнинг долзарблиги ва зарурияти асослаб берилган. Тадқиқотларнинг республикадаги фан ва технологияларни ривожлантиришнинг устувор йўналишлари билан боғлиқлиги кўрсатилган. Муаммонинг ўрганилганлик даражаси келтирилган, мақсад ва вазифалар шакллантирилган, тадқиқотнинг объектлари, предметлари ва усуллари аниқланган. Илмий янгилик баён қилинган, олинган натижаларнинг ишончлилиги асослаб берилган. Натижаларнинг илмий ва амалий аҳамияти очиб берилган. Ишнинг апробацияси, диссертациянинг ҳажми ва тузилиши ҳақида қисқача маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг **«Муаммонинг ечилганлик даражаси ва хона ҳароратида ишлай оладиган инжекцион фотоқабулқилгичларни олиш усуллари ривожлантиришнинг келажаги»** деб номланган биринчи бобида адабиётларда келтирилган маълумотлар асосида инжекцион фотоқабулқилгич (ИФҚ)ларни яратиш соҳасидаги муаммолар ва уларнинг ечлганлик даражаси таҳлил қилинган. У ерда хусусан, ИФҚларнинг электрик, фотоэлектрик, люминесцент ва оптик хоссаларини эффектив бошқариш учун тўғриловчи контактлик металл – ярим ўтказгич (М – Я) ёки оралик оксид қатламлик металл – оксид – ярим ўтказгич (М – О – ЯЎ) кўринишидаги ИФДларни тадқиқ қилиш зарур. Бундай тузилмалар етарлича юқори даражадаги инжекцияни таъминлаб бера олади ва ярим ўтказгич юзасида нотурғун заряд ташувчиларнинг рекомбинациясини камайтиради. Бу эса ўз навбатида фотодиод (ФД)лар параметрларининг, хусусан ток бўйича сезгирлигининг юқори бўлишига ва спектрал сезгирлигини ультрафиолет (УФ) соҳа томонга кенгайтишига олиб келади. Мавжуд экспериментал ва назарий маълумотлар таҳлили асосида тадқиқотнинг вазифалари шакллантирилган.

**«Йирик донаторликли кучли компенсацияланган р-типдаги ўтказувчанликка эга бўлган кадмий теллуриди асосида инжекцион фотоқабулқилгичларни ишлаб чиқариш технологиси»** деб номланган иккинчи боби асосан ИФҚларни олишга бағишланган. Бу бобда ишлаб чиқилган технологик усуллар асосида устунсимон донаторликка эга бўлган кучли компенсацияланган катта қаршиликли CdTe юпқа қатламларини ва улар асосида МОЯЎ тузилмаларини олиш кўрсатиб берилган, ҳамда рентген тузилиш таҳлили услубида олинган тузилмаларнинг юзалари ўрганилган.

CdTe юпқа қатламларини  $H_2$  оқимида ўстиришда кадмий буғининг стехиометрик таркибдан юқорилиги CdTe юпқа қатламларининг ўсиш тезлигига таъсир қилувчи асосий омил эканлиги экспериментал тарзда ўрнатилган. Бу эса CdTe буғларида Cd атомларининг Te атомларига нисбатан осонроқ учувчанликка эга эканлиги билан тушунтирилади.

Бу нарса яна CdTe синтез қилиш бўйича олинган экспериментал натижалари билан ҳам, яъни синтез қилинган CdTe юпқа қатламларининг кристалл таркиби Te атомларига бойлиги рентген тузилиш тадқиқотлари билан ҳам тасдиқланган. Биз олган CdTe юпқа қатламлар рентген тузилиш таҳлили бўйича қуйидаги таркибга эга: Te атомлари 65% ва Cd атомлари 35%. Бу

ҳолат ўсиш жараёнида Cd атомлари водород билан бирлашиб, енгил учувчи  $H_2Cd$  комплексини ҳосил қилиши ва реактордан газ оқими билан тортиш тизими орқали очиқ ҳавога учиб кетиши билан боғлиқ.

Тадқиқот натижалари шу нарсани кўрсатдики,  $T_{II} = 650^\circ C$  ҳароратларда ўстирилган CdTe юпқа қатламларининг микрокристаллари катта қаршилиққа ( $\rho = 10^9 \div 10^{11}$  Ом·см) ва аралаш – гексогонал ва куб тузилишга эга экан. Бундай қатламлардаги заряд ташувчиларнинг ҳаракатчанликлари  $\mu = 4 \div 6$  см<sup>2</sup>/В·с ни ташкил қилади ва улар етарли даражада юқори фотосезгирликка эга. CdTe юпқа қатламларининг тузилишига ва мукамаллигига таъсир қилувчи асосий омил, бу кадмий ва теллурнинг реактордаги босими ҳисобланади. Ўз навбатида бу омиллар технологик параметрлар – манбанинг ҳарорати ( $T_M$ ), тагликнинг ҳарорати ( $T_T$ ) ва реактордаги водород оқимига боғлиқ. Бундан ташқари, тагликнинг ҳарорати  $T_T = 650^\circ C$ , манбанинг ҳарорати  $T_M = 950^\circ C$  ва водороднинг реактордаги тезлиги  $v_{H_2} = 2$  л/соат, бўлганда олинган CdTe юпқа қатламлари мукамалроқ эканлиги ўрнатилган. юпқа қатлам юзасини металлографик тадқиқотлар уларнинг 20 ÷ 60 мкм қалинликдаги монокристалл доналардан ташкил топганини кўрсатди.  $T_T = 650^\circ C$  ( $T_M = const$ ,  $v_{H_2} = const$ ) шароитларда олинган юпқа қатламлар ялтироқ юзага эга.

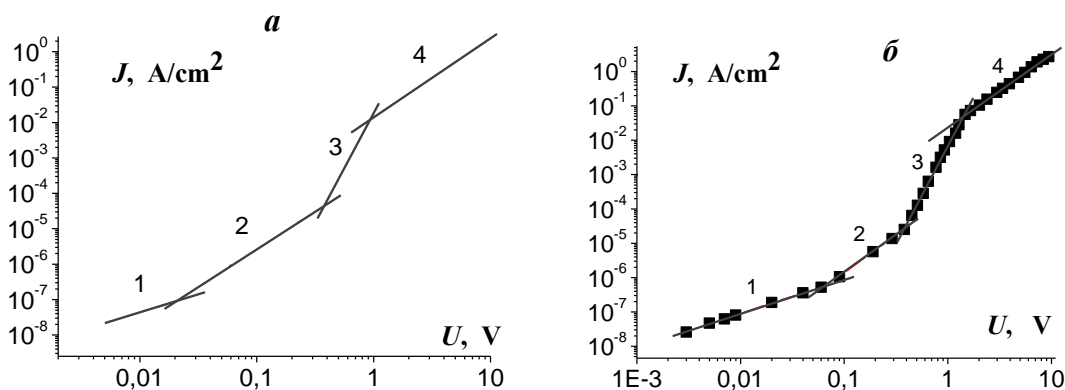
Олинган юпқа қатлам асосида вакуумда ( $\sim 10^{-5}$  Torr) алюминийни пуркаш йўли билан МОЯЎ тузилма яратилди. Фронтал алюминий контактнинг қалинлиги  $\sim 40 \div 50$  nm ва юзаси  $S \approx 0.07 \div 0.1$  см<sup>2</sup> ни ташкил қилади. Пастки (орқа) контакт бўлиб Мо-таглик хизмат қилади. *p*-CdTe юпқа қатламнинг солиштирма қаршилиги  $\rho \approx 10^9 \div 10^{11}$  Ω·см бўлиб, асосий бўлмаган заряд ташувчилар – электронларнинг яшаш вақти  $\tau \sim 10^{-7} \div 10^{-6}$  s ни ташкил қилади. Рентген тузилиш таҳлили шу нарсани кўрсатдики, барча CdTe юпқа қатламларда (111) кўрсаткичли рефлекслар энг интенсив эканлигини, натижада, йўналтирувчи юзага эга эканлигини ва уларга сфалерит тузилиш мослигини кўрсатди. Бошқа (220), (311), (400) рефлекслик «чўққи»ларнинг мавжудлиги координацияловчи сони 12 бўлган марказлашган қирралик куб панжарага эга эканлигидан далолат беради. Рентген фазали таҳлил технологик жараёнда МОЯЎ-тузилма, яъни Al – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – *p*-CdTe (металл – Al, оксид – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ярим ўтказгич – CdTe) ҳосил бўлишини кўрсатди.

**«Al – *p*-CdTe – Мо-тузилманинг электрофизикавий характеристикаларини тадқиқ қилиш»** деб номланган учинчи бобда Al – *p*-CdTe – Мо-тузилмада кечадиган ток ташиш механизмлари ва унинг электрофизикавий характеристикаларига ультратовуш нурлантириш (УТН)нинг таъсири кўриб чиқилган, бу эса ўз навбатида бундай тузилмаларда кечадиган физикавий жараёнларни тушуниб олишга имкон берди.

Al – *p*-CdTe – Мо-тузилмаларнинг хусусиятлари ва характеристикалари бўйича тадқиқотлар ўтқазилган мақсадида уларнинг намуналари бир хил технологик шароитларда турли база (*p*-CdTe) қалинлиги билан тайёрланди. Аввалига *p*-CdTe юпқа қатламлар 40 ÷ 50 μm қалинликда олинди, чунки бундай қалинликларда олинган юпқа қатламлар мукамал тузилишга эга бўлиб, юпқа қатламлар бундай қалинликларда олинганда юпқа қатламларни турли

қалинликлардаги олиш улардаги нуқсонларнинг тақсимотиға таъсир қилмайди. Кейин юпқа қатламлар емиртириш ва сайқаллаш йўли билан оптимал ( $8 \div 10 \text{ }\mu\text{m}$ ) қалинликка келтирилди, чунки базанинг қалинлиги  $w \leq 5 \text{ }\mu\text{m}$  бўлганда Al – p-CdTe – Mo-тузилманинг тўғрилаш хусусияти кескин камайиб кетади. Масалан, унинг тўғрилаш коэффициентини (кучланишнинг маълум бир қийматидаги тўғри ва тескари тоқларнинг нисбати ( $K = \frac{I_{\text{прв}}}{I_{\text{ров}}}$ )) базанинг қалинлиги  $w = 8 \div 10 \text{ }\mu\text{m}$  бўлганда тўрт – беш даражани ташкил қилса,  $w \approx 5 \text{ }\mu\text{m}$  бўлганда эса кучланишнинг бир хил қийматларида атиги икки даражани ташкил қилади. Бу эса ўстирилаётган қатлам кристалл тузилиши нуқсонларининг, шу жумладан турли комплекс ва суқилиб киришларнинг сони молибден тагликдан  $d \leq 5 \text{ }\mu\text{m}$  ва ундан кам бўлган масофада тагликка яқинлашган сари кескин ортиб кетиши билан изоҳланади.

Al – p-CdTe – Mo-тузилмаларнинг ВАХлари кучланиш ва тоқнинг кенг ораликдаги қийматлари учун тўғри (Mo-тагликка тоқ манбаининг «+» кутби уланганда) ва тескари (Mo-тагликка тоқ манбаининг «-» кутби уланганда) йўналишларда ўлчанди. 1-расмда база қалинлиги икки хил ( $8 \text{ }\mu\text{m}$  (a) ва  $10 \text{ }\mu\text{m}$  (б)) бўлган Al – p-CdTe – Mo-тузилманинг тоқнинг тўғри йўналиши учун ВАХлари иккиланган логарифмда келтирилган. Бу ердаги № 1 намуна базасининг қалинлиги 8 мкм (a) ва шунингдек № 2 намуна базасининг қалинлиги эса 10 мкм (б). 1-расмдан кўринадики, ВАХларнинг иккала эгри чизиқлари ҳам  $J = A \cdot U^\alpha$  кўринишдаги кўрсаткичли боғлиқлик билан ифодаланиши мумкин.



a – № 1 намуна  $w = 8 \text{ }\mu\text{m}$ , б – № 2 намуна  $w = 10 \text{ }\mu\text{m}$ .

**1-расм. Al – p-CdTe – Mo-тузилманинг қоронғиликда хона ҳарратида ( $T = 300 \text{ K}$ ) ўлчанган тўғри ВАХи иккиланган логарифмик масштабда**

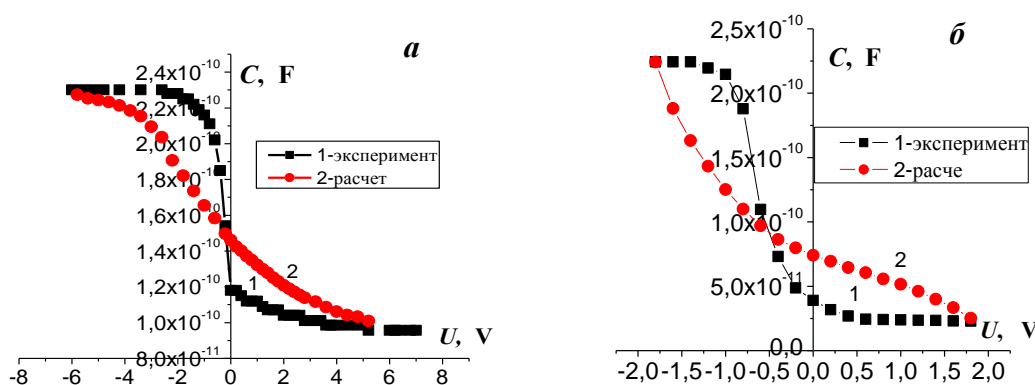
Al – p-CdTe – Mo-тузилма иккита намуналари ВАХларининг таҳлили уларнинг қуйидагича ифодалаш мумкин бўлган тўртта асосий қисмдан иборат эканини кўрсатди. Бунда №1 намуна учун: 1)  $J = A \cdot U^{\alpha_1}$ ,  $\alpha_1 = 0.97 \approx 1.0$ ; 2)  $J = A \cdot U^{\alpha_2}$ ,  $\alpha_2 \approx 2$ ; 3)  $J = A \cdot U^{\alpha_3}$ ,  $\alpha_3 \approx 6.43$  ва 4)  $J = A \cdot U^{\alpha_4}$ ,  $\alpha_4 = 2.01 \approx 2$ ; № 2 намуна учун: 1)  $J = A \cdot U^{\alpha_1}$ ,  $\alpha_1 \approx 0.98 \approx 1.0$ ; 2)  $J = A \cdot U^{\alpha_2}$ ,  $\alpha_2 = 2.04 \approx 2.0$ ; 3) –  $J = A \cdot U^{\alpha_3}$ ,  $\alpha_3 \approx 5.71$  ва 4) –  $J = A \cdot U^{\alpha_4}$ ,  $\alpha_4 \approx 2$ .

Рекомбинацион жараёнларда тоқ зичлигининг кичик қийматларида нуқтавий нуқсонлар қатнашиши, катта қийматларида эса, рекомбинация тезлиги

тўлиқ тўйинишга чиққанда, яъни  $U \approx N_R/\tau_i$  бўлганда, тадқиқ қилинаётган намуналардаги рекомбинацион жараёнлар, ичида электронлар ушланиб қоладиган мураккаб комплекслар билан аниқланиши ўрнатилган.

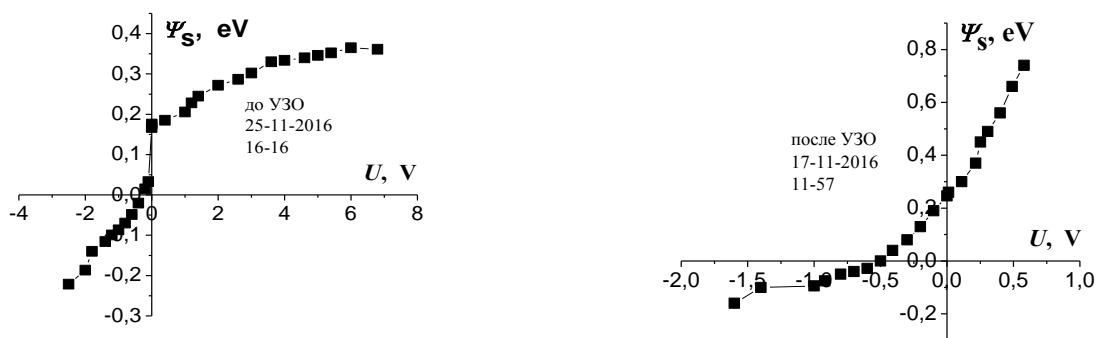
Ультратовуш билан нурлантириш қуввати  $P = 1 \text{ W/cm}^2$  ва частотаси 2.5 MHz бўлган тўлқин узунликларда олиб борилган. Экспериментал вольт-фарада характеристика (2a ва 2б-расм, 1-эгри чизик)  $f = 1 \text{ kHz}$  частотада олинган. Ҳисоблаш йўли билан олинган  $C(U)$ -характеристика (2a ва 2б-расм, 2-эгри чизик) С.3и кўрсатган услубда олинган.

$C(U)$ -характеристикани ҳисоблашда, экспериментал ВФХдан аниқланган оксид қатлами сигимининг ( $C_i$ ) қийматлари ва ярим ўтказгичнинг турғун коваклари концентрацияси ( $p_0$ ) нинг қуйидаги қийматларидан фойдаланилди. Нурлантиришдан олдин:  $C_i \approx 2.3 \cdot 10^{-10} \text{ F}$ ,  $p_0 \approx 3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  ва нурлантиришдан кейин:  $C_i \approx 2.24 \cdot 10^{-10} \text{ F}$ ,  $p_0 \approx 2 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ .



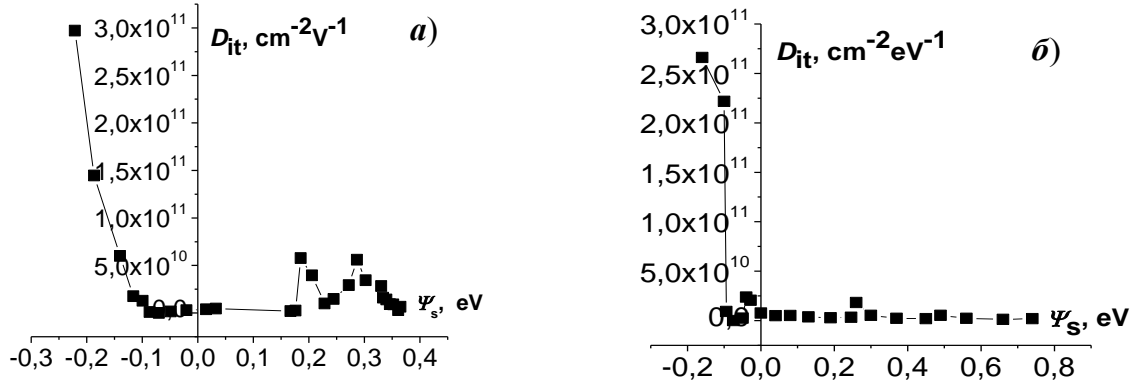
2-расм. Al – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – p-CdTe – Mo-тузилманинг УТНгача (a) ва ундан кейинги (б) экспериментал (1) ва ҳисобланган (2)  $C(U)$ -характеристикалари

3a ва 3б-расмларнинг таҳлилидан кўринадикки, термодинамик мувозанат ҳолатида (силжитиш кучланиши бўлмаганда) иккита муҳит орасида рухсат этилган ҳудуд чеккасининг букилиши кузатилади, буни юза потенциалнинг қуйидаги, УТНдан олдинги ва кейинги катталиклари ҳам тасдиқлайди: мос равишда УТНдан олдин  $\psi_s \approx 0.17 \text{ eV}$  ва кейин  $\psi_s \approx 0.25 \text{ eV}$ . Бу нарса кўрса-тадики, ҳақиқатан ҳам УТН икки муҳит орасида ярим ўтказгич тақиқланган ҳудудининг пастки ярмидаги юза ҳолатларининг қуйишига, яъни йўқолишига олиб келар экан. Бу нарса яна потенциал тўсиқ баландлигининг УТН таъсирида пасайиши ( $\sim 0,68 \text{ eV}$  дан  $\sim 0,55 \text{ eV}$  гача) билан ҳам тасдиқланади.



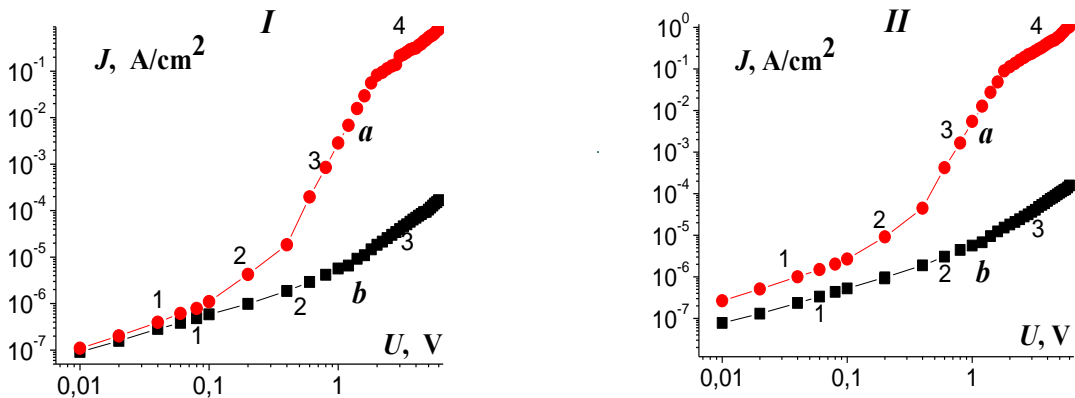
3-расм. Сирт потенциали  $\psi_s$  нинг силжитиш кучланиши  $U$  га УТНдан олдинги (a) ва кейинги (б) боғлиқлиги

Яна бу бобда УТНдан олдинги ва кейинги сирт ҳолатлари эффектив зичлигининг сирт потенциалига боғлиқлиги  $-D_{it}(\psi_S)$  таҳлил қилинган. 4-расмдан кўринадики, сирт ҳолатлари зичлиги етарлича кичик экан. Унинг қиймати  $\psi_S = 0$  бўлганда УТНдан олдин  $D_{it} = 3.4 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$  ва УТНдан кейин эса  $\sim 7.6 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$  га тенг. Юқорида келтирилган экспериментал натижалар алюминием (Al) ва кадмий теллуриди (CdTe) орасида ҳосил бўлган  $\text{Al}_2\text{O}_3$  оксид қатлами етарлича мукамал эканлигини кўрсатади.



4-расм. Оксид қатлами билан  $p$ -CdTe чегарасидаги сирт ҳолатлари эффектив зичлигининг сирт потенциалига УТНдан олдинги (а) ва кейинги (б) боғлиқлиги

Маълумки,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  оксид қатлами тадқиқ қилинаётган  $\text{Al} - \text{Al}_2\text{O}_3 - p\text{-CdTe}$  – Мо-тузилмадаги асосий элементларидан бири бўлганлиги учун унинг хусусиятларининг ўзгариши, жумладан диэлектрик – оксид қатламидаги нуқсонлар ва киритмалар (сирт ҳолатлари) бутун тузилманинг электрофизикавий ва фотоэлектрик хусусиятларига ўз таъсирини кўрсатиши керак. Бундай нуқтаи-назарни тасдиқлаш учун тузилманинг ВАХлари (5-расм) кучланишнинг тўғри ва тескари йўналишларида УТНдан олдин ва кейин тадқиқ қилинди. Тадқиқот натижалари тузилмадаги токнинг тўғри ва тескари йўналишларда оқиш қонуниятларига деярли таъсир қилмаслигини кўрсатди. Бунда УТНдан кейин тўғри ток тахминан 25-30% га ошиши, тескари ток эса 6-9% га камайиши, тўғрилаш коэффициенти ( $K$ ) 1.4 барабар ортиши кузатилган.

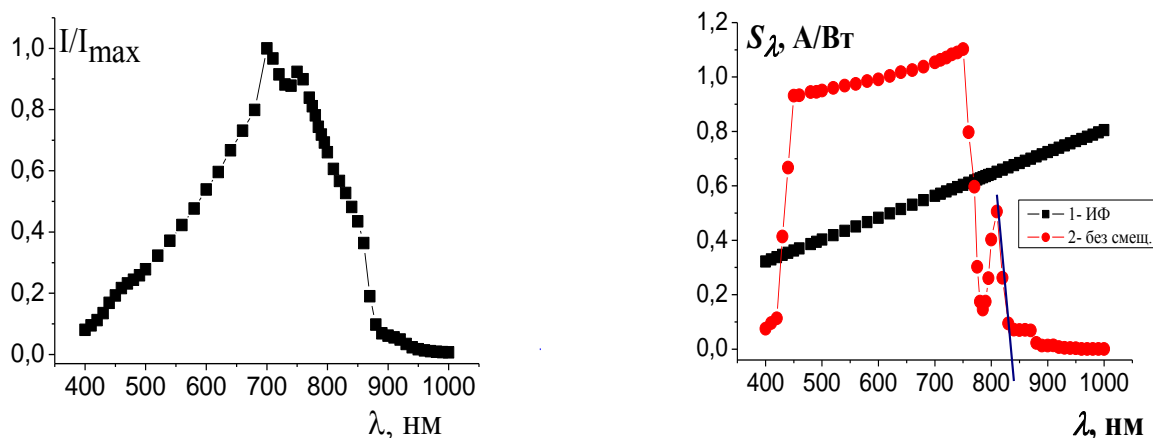


Иа: 1– 1; 2– 2; 3– 5.3; 4– 2; Иб: 1– 0.84; 2– 1; 3– 2. Па: 1– 1; 2– 2; 3– 5; 4– 2; Пб: 1– 0.79; 2– 1; 3– 2.

5-расм. УТНдан олдинги (I) ва кейинги (II) турли қияликка эга бўлган  $I \sim U^a$  кўринишдаги тўғри (а) ва тескари (б) ВАХлари

«Al – n-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – p-CdTe – n-MoO<sub>3</sub> – Мо-тузилма асосидаги инжекцион фотодиоднинг фотоэлектрик хусусиятлари» деб номланган тўртинчи бобда Al – n-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – p-CdTe – n-MoO<sub>3</sub> – Мо-тузилманинг фотоэлектрик хусусиятлари тадқиқ қилинган. Тадқиқот натижалари бундай тузилмаларда кечадиган физикавий жараёнларни тушунишга ва уларни асбоблар ишланмаларда қўллаш мумкинлигини баҳолаш имкониятини берди.

6-расмда Al – n-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – p-CdTe – Мо-тузилма фототокининг ( $I_{ph}(\lambda)$ ) ва фотосезгирлигининг ( $S_{\lambda}(\lambda)$ ) силжитиш кучланиши бўлмагандаги спектрал боғлиқликлари нисбий бирликларда келтирилган. Тадқиқот натижалари Al – n-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – p-CdTe – Мо-тузилма хатто силжитиш кучланиши бўлмаганда ҳам бирламчи фототокни кучайтиришини кўрсатади. Масалан,  $\lambda = 450$  нм тўлқин узунликда унинг спектрал сезгирлиги  $S_{\lambda} \approx 0.93$  А/Вт га тенг бўлиб, бу эса идеал ФҚнинг ушбу тўлқин узунликдаги спектрал сезгирлиги  $S_{\lambda(ид)}$  дан 2.3 марта катта,  $\lambda = 750$  нм тўлқин узунликда эса  $S_{\lambda} \approx 1.1$  А/Вт бўлиб,  $S_{\lambda}/S_{\lambda(ид)} \approx 1.85$  га тенг.

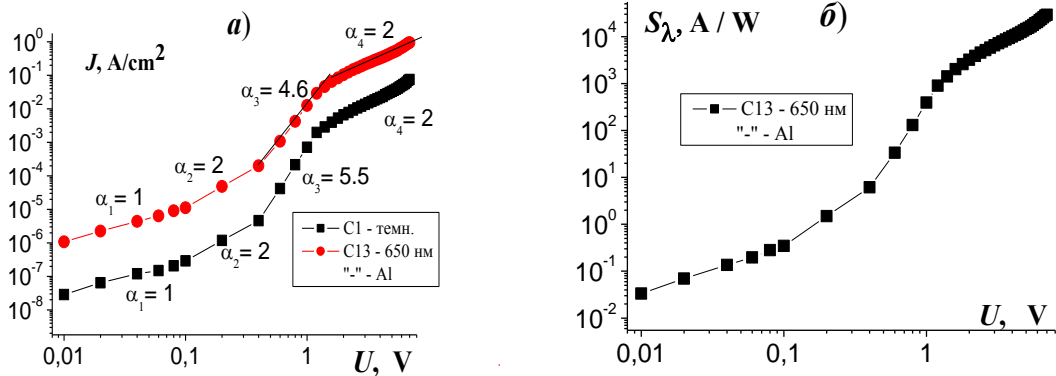


**6-расм. Al – n-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – p-CdTe – Мо-тузилма (1) ва идеал ФҚнинг (2) силжитиш кучланиши бўлмагандаги нисбий бирликларда келтирилган фототокларининг (а) ва фотосезгирликларининг (б) спектрал боғлиқликлари**

Бу бобда яна спектрал сезгирликнинг токнинг қийматига боғлиқлиги тадқиқ қилинган. Шу мақсадда Al – n-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – p-CdTe – Мо-тузилманинг қоронғилик ва ёруғликдаги ВАХлари ҳамда ток бўйича сезгирлигининг силжитиш кучланишига боғлиқлиги биргаликда тадқиқ қилинди.

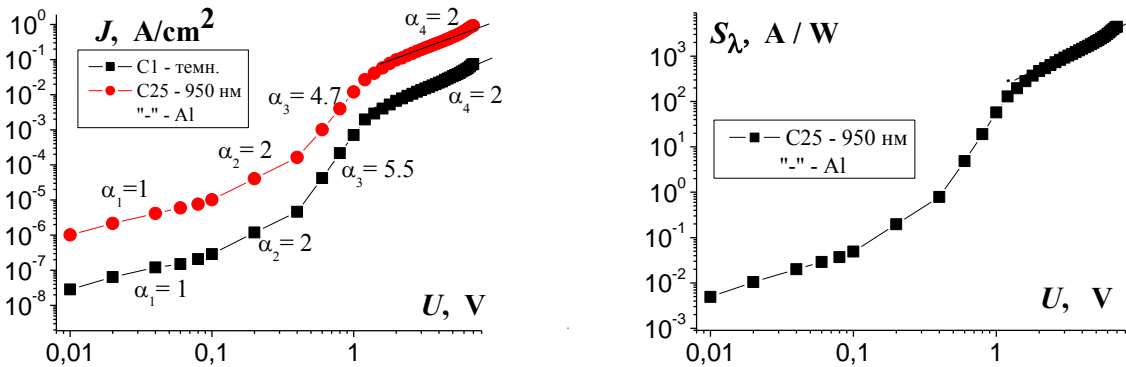
Бундан ташқари, яна хусусий ютиш соҳасида монохроматик нурлантиришнинг таъсири қараб чиқилган. Бунинг учун қоронғиликда ва хусусий ютиш соҳасида монохроматик ( $\lambda = 650$  нм) нур билан ёритилгандаги ВАХлар (7(а)-расм), ҳамда спектрал сезгирлик  $S_{\lambda}$  нинг силжитиш кучланиши  $U$  га боғлиқлиги (7(б)-расм) ўлчанган. 7- ва 8-расмлардан кўринадики, тузилманинг хусусий (7-расм) ва киритмали (8(а)-расм) ютиш соҳаларида ёритилгандаги тўғри йўналишдаги ВАХлари қоронғиликдаги ВАХлар билан бир хил қонуниятларга эга экан. Улар бир хил кучланишларда фақат токларининг катталиклари билангина фарқланадилар.  $S_{\lambda}(\lambda)$  боғлиқлик (8б-расм) ёруғликдаги ВАХ га ўхшаш кўринишга эга, яна у даража кўрсаткичи  $\alpha$

ёруғлик ВАХининг  $\alpha$  катталигига тўлиқ мос келадиган  $S_\lambda \sim U^\alpha$  кўринишдаги кўрсаткичли боғлиқ-лик билан ифодаланади.



7-расм. Al – n-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – p-CdTe – n-MoO<sub>3</sub> – Mo-тузилмада ток зичлиги  $J$  нинг (а) ва ток бўйича фотосезгирлик  $S_\lambda$  нинг (б) қоронғиликдаги (1) ва тўлқин узунлиги  $\lambda = 650$  nm бўлган оқ нур билан ёритилгандаги (2) тўғри йўналишдаги силжитиш кучланишига хона ҳароратидаги (300K) боғлиқлиги

Al – p-CdTe – Mo-тузилмада фотосигнални энг юқори ички кучайтириш ( $\sim 10^4 - 10^5$  A/W), тузилма ўтказиш йўналишида уланганда ва силжитиш кучланиши  $U = 7$  В бўлганда хусусий нур билан ёритилганда содир бўлиши ўрнатилган. Фотосигнал «киритмали» нур билан ёритилганда ҳам худди шундай кучайтириш содир бўлиши мумкин, бироқ, бунда унинг кучайтириши силжитиш кучланишининг бир хил қийматларида хусусий нурланиш соҳасидагидан икки даражага паст бўлади.



8-расм. Al – n-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – p-CdTe – n-MoO<sub>3</sub> – Mo-тузилма ток зичлиги  $J$  нинг (а) ва ток бўйича фотосезгирлик  $S_\lambda$  нинг (б) қоронғиликдаги (1) ва тўлқин узунлиги  $\lambda = 950$  nm бўлган монохроматик нур билан ёритилгандаги (2) тўғри йўналишдаги силжитиш кучланишига хона ҳароратидаги (300 K) боғлиқлиги

Тўлқин узунлиги  $\lambda = 950$  nm бўлган «киритмали» нур билан ёритилганда ўтказиш йўналишидаги ёруғлик ВАХининг Ламперт қонуни билан ифодаланувчи квадрат соҳасида биполяр ҳаракатчанлик ( $\mu_\alpha$ )нинг фотомодуляцияси содир бўлиши кўрсатилган. Бунда  $\mu_\alpha$  40  $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  дан  $3.7 \cdot 10^2 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  гача ўзгаради, ва фотоэлектрик инжекцион кучайтириш содир бўлади. Натижада, бу соҳанинг охирида спектрал сезгирлик  $S_\lambda \sim 0.8$  A/W га тенг бўлади, бу эса

идеал ФКнинг ушбу тўлқин узунликдаги спектрал сезгирлиги ( $S_\lambda \approx 0.75 A/W$ )дан юқори бўлиб, айниқса у идеал ФКнинг спектрал сезгирлигидан 20 марта катта бўлган ВАХнинг бошланғич соҳасида анча сезиларли бўлади.

## ХУЛОСА

Донадорлиги устунсимон тузилишга эга бўлган  $p$ -CdTe юпқа қатламлари асосида ички кучайтиришга эга бўлган инжекцияли фотоқабулқилгич яратиш ва унда кечадиган электрон жараёнларни аниқлаш натижалари асосида қуйидаги ҳулосалар қилинди:

1. Донадорлиги устунсимон тузилишга эга бўлган  $p$ -CdTe юпқа қатламлари асосида  $\lambda = 450 \div 750$  нм тўлқин узунликлар соҳасидаги ёруғлик сигналларини қайд қилишга мўлжалланган мусбат тескари боғланиш ва параметрик кучайтириш (ПК) механизмлари ҳисобига ички кучайтиришга эга бўлган кенг полосали ( $\lambda = 400 \div 1000$  нм) фотоқабулқилгич ишлаб чиқилган.

2. Al –  $p$ -CdTe – Mo-тузилманинг тўғри йўналишдаги вольтампер характеристикаси асосан тўртта даражали соҳадан иборатлиги аниқланган. Хусусан, кичик ток зичликларида рекомбинация жараёнларида нуқтавий нуқсонлар қатнашиши, катта ток зичликларида, яъни рекомбинация тезлиги тўлиқ тўйинишга чиққанда эса  $U \approx N_R/\tau_i$ , тадқиқ қилинаётган намуналарда рекомбинация жараёнлари мураккаб рекомбинация марказларини ҳосил қилувчи ва ток ташувчилар силжиш механизмини аниқловчи вакансия ва бошқа нуқсонлар комплекслари туркуми билан аниқланниши топилган.

3. Ультратовуш таъсиридан кейин оксид зарядлари тобланиши ва ҳатто қўшимча сирт қамраб олувчиларининг ҳосил бўлишига ҳисса қўшиши, ярим ўтказгичнинг юза қатламларида жойлашган нотурғун нуқтавий нуқсонлар эса электрикавий нейтралликка эришиб, тўғри токнинг тахминан 25-30% га ортишига ва тескари токнинг 6-9% га камайишига олиб келиши тасдиқланган.

4. Al – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> –  $p$ -CdTe – MoO<sub>3</sub> – Mo-тузилма токнинг ўтказиш йўналишида фототокнинг оптик нурланиш интенсивлигига боғлиқлигининг тўйиниши ҳисобига фойдали сигналнинг кичик интенсивликларида юқори сезгирликка эга бўлган инжекцияли фотоқабулқилгич сифатида ишлаши аниқланган.

5. Al – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> –  $p$ -CdTe – MoO<sub>3</sub> – Mo-тузилманинг тезлиги ёпиш йўналишида ток ўтказиш йўналишидагига нисбатан икки даражага катта эканлиги тажрибаларда кўрсатиб берилган.



**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.27.06.2017.FM./Т.34.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ  
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ,  
ИНСТИТУТЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ,  
САМАРКАНДСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

---

**ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
КАРАКАЛПАКСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**УТЕНИЯЗОВ АБАТБАЙ КУРБАНИЯЗОВИЧ**

**ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТелЛУРИД КАДМИЕВЫХ  
ИНЖЕКЦИОННЫХ ФОТОПРИЕМНИКАХ**

**01.04.10 – Физика полупроводников**

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

**Ташкент-2018**

**Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за номером B2017.2PhD/FM101.**

Диссертация выполнена в Физико-техническом институте АН РУз.

Автореферат диссертации на двух языках (узбекский, русский) размещен на веб-странице по адресу [fti.uz](http://fti.uz) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» по адресу [www.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz).

**Научный руководитель:** **Мирсагатов Шавкат Акрамович**  
доктор физико-математических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** **Мамадалимов Абдугафур Тешабаевич**  
доктор физико-математических наук, академик

**Аюханов Рашид Ахметович**  
доктор физико-математических наук

**Ведущая организация:** **Ташкентский университет информационных технологий**

Защита диссертации состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 года в \_\_\_\_ часов на заседании Научного совета DSc.27.06.2017. FM./T.34.01 при Физико-техническом институте, институте Ионно-плазменных и лазерных технологий и Самаркандском государственном университете. (Адрес: 100084, г. Ташкент, ул. Бодомзор йули, дом 2б. Административное здание Физико-технического института, зал конференций. Тел./Факс: (99871) 235-42-91; e-mail: [info.fti@uzsci.net](mailto:info.fti@uzsci.net).)

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Физико-технического института (зарегистрирована за № \_\_\_\_). Адрес: 100084, г. Ташкент, ул. Бодомзор йули, дом 2б. Тел./Факс: (99871) 235-30-41.

Автореферат диссертации разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.  
(протокол рассылки № \_\_\_\_\_ от «\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.)

**Н.Р. Авезова**

Председатель научного совета по присуждению ученых степеней, д.т.н., старший научный сотрудник

**А.В. Каримов**

Ученый секретарь научного совета по присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

**И.Г. Атабаев**

Председатель научного семинара при научном совете по присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

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

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** В мировой практике в интенсивно развивающейся области физики полупроводников особое внимание уделяется разработке фотоприемных структур, отличающихся высокой чувствительностью в видимой и ультрафиолетовой областях спектра. В этом плане одной из основных задач является поиск новых полупроводниковых материалов, создание на их основе современных высокоэффективных приборов, таких как фотоэлементы и фотоприемники, создание широкодоступной технологии получения полупроводниковых фоточувствительных структур на основе соединений  $A^2B^6$ .

На сегодняшний день в мире большое внимание уделяется изучению электронных и инжекционных процессов в фотоприемных структурах, в том числе на основе пленок  $p$ -CdTe. В этом аспекте важной задачей является проведение целевых исследований в ниже приведенных направлениях: получение сильнокомпенсированных высокоомных пленок CdTe со столбчатой структурой зерен и на их основе создание металл-окисел-полупроводник (МОП)-структуры; исследование электрофизических и фотоэлектрических свойств МОП-структур  $Al - Al_2O_3 - p$ -CdTe –  $MoO_3 - Mo$  и возможности их использования в качестве инжекционного фотоприемника; изучение влияния ультразвукового облучения (УЗО) на электрофизические свойства фотоприемных структур; поиск путей обеспечения работоспособности полупроводниковых фотоприемных структур при комнатной температуре.

В соответствии со Стратегией действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан наиболее важно обратить особое внимание на разработку эффективных механизмов внедрения достижений научных исследований и на этой основе обеспечить конкурентоспособность национальных товаров на внутреннем и внешнем рынке. В частности, основное внимание уделяется вопросам импортозамещения в области элементов полупроводниковой электроники. Особо следует отметить, что данная деятельность осуществляется в рамках объявленного «Года поддержки активного предпринимательства, инновационных идей и технологий», направленных на получение научных результатов, отвечающих современным требованиям научного развития.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, указанных в Указе Президента Республики Узбекистан ПФ-4947 от 7 февраля 2017 года «О стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан», Постановлении Президента Республики Узбекистан ПК-№2772 от 13 февраля 2017 года «О приоритетных направлениях развития электронной промышленности 2017-2021 годах» и №ПП-2789 «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности» от 17 февраля 2017 года, а также других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

**Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики.** Диссертация выполнена в рамках приоритетных направлений развития науки и технологий Республики Узбекистан III. «Энергетика, энергоресурс сбережение, транспорт, машино- и приборостроение; развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники, электронного приборостроения».

**Степень изученности проблемы.** Инжекционные фотоприемники являются одними из широко известных оптоэлектронных приборов. В основе работы любого инжекционного фотоприемника лежит инжекционное усиление фототока, которое наблюдается в  $p - n$ - и  $p - i - n$ -структурах при их включении в прямом направлении. Основопологающую роль в разработке таких приборов сыграли работы В.И. Стафеева. К настоящему времени известны инжекционные фотоприёмники, созданные на основе Ge, Si и GaAs, которые эффективно работают только при низких температурах, т.е. они не могут работать при комнатной температуре. С этой точки зрения перспективными представляются полупроводники группы  $A^2B^6$ , в том числе телурид кадмия (CdTe).

Исследования в направлении создания инжекционных фотоприемников продолжаются и в настоящее время. Например, известны работы М.К. Бахадырханова, А.Т. Мамадалимова и А.В. Каримова<sup>1</sup>, посвященные созданию инжекционных фотоприемников нового типа на основе кремния и арсенида галлия с управляемым спектральным диапазоном в зависимости от параметров материала базы. Исследования в направлении создания инжекционных фотоприемников на базе полупроводниковых соединений  $A^2B^6$ , в том числе CdTe, начаты впервые в группе профессора Ш.А. Мирсагатова. Например, Ш.А. Мирсагатовым<sup>2</sup> и И.Б. Сапаевым были созданы инжекционные фотоприемники на основе гетероструктур  $n^+CdS - nCdS - pSi$ . Дальнейшие усилия по разработке инжекционных фотоприемников должны быть направлены на поиск технологически более простых решений и расширению их спектрального диапазона.

**Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация.** Диссертационная работа выполнена в рамках проектов научных исследований ФТИ НПО «Физика – Солнце» АН РУз: ФА-Ф032 «Фонда фундаментальных исследований АН Узбекистана» 2010-2015 г.г.; ГНТП ФА-А3-Ф024 «Разработка компактной системы контроля пламени горения для котлов с газовыми горелками» 2015-2017 г.г.

**Целью диссертационной работы** является создание инжекционного фотоприемника с внутренним усилением на основе пленок  $p$ -CdTe со столб-

---

<sup>1</sup>Степень изученности проблемы по теме диссертационной работы были выполнены на базе: Karimov A.V., Karimova D.A. Three-junction Au/AlGaAs(n)/GaAs(p)/Ag photodiode. Science in Semiconductor Processing. Vol.6, Issues 1-3, 2003, p.p.-137-142, Инжекционно-полевой фотодиод/ Патент РУз № IAP 03974 от 09.06.20.09. Официальные известия. – 2009. - № 7.

<sup>2</sup>Mirsagatov Sh.A., Sapaev I.B. Injection photodiodes based on a  $p$ -Si –  $n$ -CdS –  $n^+$ -CdS // Semiconductors, 2014, vol. 48, № 10, pp. 1363-1369. и других источников.

чатой структурой зерен и определение электронных процессов происходящих в нем.

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

получить сильнокомпенсированные высокоомные пленки CdTe со столбчатой структурой зерен и на их основе создать МОП-структуры;

исследовать электрофизические и фотоэлектрические свойства МОП-структур Al – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – p-CdTe – MoO<sub>3</sub> – Mo и возможности их использования в качестве инжекционного фотоприемника;

изучить влияние ультразвукового облучения (УЗО) на электрофизические свойства инжекционного фотоприемника на основе p-CdTe.

**Объектом исследования** являются Al – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – p-CdTe – MoO<sub>3</sub> – Mo-структуры с различной толщиной базы, полученные на основе сильнокомпенсированных высокоомных пленок p-CdTe.

**Предметом исследования** являются электронные процессы, происходящие в структурах Al – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – p-CdTe – MoO<sub>3</sub> – Mo и механизмы переноса тока в них.

**Методы исследований.** В работе использованы стандартные однозондовый и четырехзондовый методы измерения удельного сопротивления, апробированные методы измерения вольтамперных, вольтфарадных и фотоэлектрических характеристик, рентгенофазные исследования на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3М (излучение CuK $\alpha$ ,  $\lambda = 0.15418$  нм) при 300 К.

**Научная новизна исследования** заключается в следующем:

установлено, что механизм токопереноса в Al – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – p-CdTe – MoO<sub>3</sub> – Mo-структуре определяется свойственным МДП – структурам ТОПЗ механизмом, состоящим из четырех участков. Первый участок линейный, второй участок квадратичный, связанный с заполнением глубоких ловушек, третий участок резкого роста тока, обусловленный задержкой электронов двухуровневыми комплексами при рекомбинационных процессах, и переходящий на квадратичную зависимость за счет заполнения мелких ловушек.

экспериментально показано, что уменьшение толщины базовой области приводит к увеличению фоточувствительности в собственной области поглощения за счет снижения количества примесей, участвующих в генерации фотоносителей в примесной области спектра;

показано, что ультразвуковое воздействие способствует упорядочению дефектов, приводя к увеличению поверхностного потенциала от  $\psi_s \approx 0.17$  eV до  $\psi_s \approx 0.25$  eV; в результате прямой ток возрастает, а обратный ток уменьшается.

выявлено, что в структуре Al – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – p-CdTe – MoO<sub>3</sub> – Mo усиление первичного фототока имеет большее значение при малой интенсивности освещения и в режиме прямого смещения.

**Практические результаты исследования** заключаются в следующем:

изготовленный инжекционный фотоприемник с внутренним усилением на основе МОП-структуры в виде Al–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – p-CdTe – MoO<sub>3</sub> – Mo может

быть использован для приема оптических сигналов в диапазоне спектра ( $\lambda = 400 \div 1000$  нм);

экспериментальные результаты, полученные в диссертационной работе, могут служить основой для создания устройств, регистрирующих слабые интенсивности освещения в видимой области спектра.

**Достоверность результатов исследований** подтверждается применением современных научных и технологических методов, стандартных и апробированных методов исследования и комплексных независимых методик измерения и обработки данных.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.**

Научная значимость результатов исследований заключается в том, что они позволяют расширить физические представления об инжекционных фотоприемниках и электронных процессах, происходящих в них.

Практическая значимость результатов исследований заключается в том, что они могут быть использованы при изготовлении инжекционных фотоприемников на основе поликристаллических пленок *p*-CdTe со столбчатой структурой зерен.

**Внедрение результатов исследования.** На основе создания инжекционного фотоприемника с внутренним усилением на основе пленок *p*-CdTe со столбчатой структурой зерен и исследования происходящих в нем электронных процессов:

оптимальные технологические режимы получения полупроводниковых структур на основе теллурида кадмия использованы Каракалпакским государственным университетом при выполнении фундаментального проекта Ф-2-37 «Особенности лазерно-индуцированных нелинейных процессов дефектообразования в полупроводниках» (2012-2016 г.г.) для исключения влияния поверхностных зарядов на границе раздела металл-полупроводник на токовые характеристики фоточувствительных структур (Справка № ФТА-02.11/1043 Агентства по науке и технологиям Республики Узбекистан от 7 ноября 2017 г.). Использование научных результатов позволило разработать неразрушающий экспресс-метод контроля и прогнозирования надежности инжекционных фотоприемников и фотодиодных структур в ходе эксплуатации;

физические приемы управления поверхностным потенциалом использованы при выполнении международного проекта T15MH-001 «Исследование физических и антибактериальных свойств фуллеридов металлов и металлоце-нов, выявление возможностей их применения в покрытиях медицинских инструментов» (2015-2017гг.) для снижения токов утечки в структурах с гетеропереходом (Справка №32/Асп Института тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси от 2017года 21 декабря). Применение научных результатов позволило уменьшить токи утечки в гетероструктурах на порядок.

**Апробация результатов исследования.** Результаты исследования апробированы на 4 международных и 6 республиканских научно-практических конференциях.

**Опубликованность результатов исследования.** По теме диссертации опубликовано 17 научных работ: из них 7 статей в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных работ.

**Структура и объём диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложения. Она изложена на 121 странице текста, содержит 50 рисунков, 6 таблиц и список использованной литературы, состоящий из 93 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обоснована актуальность и востребованность проведённых исследований. Показана связь исследований с основными приоритетными направлениями развития науки и технологий в республике. Приведена степень изученности проблемы, сформулированы цель и задачи, выявлены объекты, предметы и методы исследования. Изложена научная новизна, обоснована достоверность полученных результатов. Выявлена научная и практическая значимость результатов исследования. Приведены краткие сведения об апробации работы, а также об объёме и структуре диссертации.

В первой главе **«Состояние проблемы и перспективы развития методов получения инжекционных фотоприемников, работающих при комнатной температуре»** на основе литературных данных анализируются проблемы, имеющиеся в области создания инжекционных фотоприемников (ИФП) и состояние их решения. В частности сказано, что для эффективного управления электрическими, фотоэлектрическими, люминесцентными и оптическими свойствами ИФП, необходимо исследовать инжекционные фотодиоды (ИФД) с выпрямляющим контактом в виде металл – полупроводник (М – П) или металл – окисел – полупроводник (М – О – П), с промежуточной тонкой окисной прослойкой (МОП-структура). Такие структуры могут обеспечить достаточно высокий уровень инжекции и резко уменьшают рекомбинацию неравновесных носителей заряда на поверхности полупроводника. Это, в свою очередь, приводит к улучшению параметров фотодиодов (ФД), в частности, токовой чувствительности, и расширяет спектральную чувствительность в сторону ультрафиолетовой (УФ) области спектра. На основе анализа имеющихся экспериментальных и теоретических данных сформулирована постановка задачи.

Во второй главе изучена **«Технология изготовления инжекционных фотоприемников на основе крупноблочного сильнокомпенсированного телурида кадмия *p*-типа проводимости»**, описаны разработанные технологические методы получения сильнокомпенсированных высокоомных пленок CdTe со столбчатой структурой зерен и на их основе МОП структур, а также изучена морфология поверхности полученных структур методом рентгеноструктурного анализа.

Экспериментально установлено, что при получении пленок CdTe в потоке  $H_2$  определяющим фактором, влияющим на скорость их роста, является степень избытка металлической компоненты пара кадмия над стехиометрическим составом. Это объясняется тем, что избыточные компоненты атомов Cd являются более легколетучими относительно атомов Te в парах CdTe.

Это также подтверждено результатами проведенных нами экспериментов, которые показали, что у синтезированных пленок CdTe состав кристаллической структуры является обогащенным атомами теллура Te, что подтверждается рентгеноструктурными исследованиями. Полученные нами пленки CdTe по рентгеноструктурному анализу имеют следующий состав: 65% атомов Te и 35% атомов Cd. Это связано с тем, что в процессе роста атомы Cd улетучиваются, образуя соединение с водородом – легколетучий комплекс  $H_2Cd$ , и уносятся из объема реактора в открытую атмосферу через вытяжной шкаф.

Результаты исследований показали, что микрокристаллы пленок CdTe, выращенных при  $T_{II} = 650^\circ C$ , высокоомные ( $\rho = 10^9 \div 10^{11}$  Ом·см) и имеют смешанную – гексагональную и кубическую структуру. Подвижности носителей заряда в таких пленках имеют значения  $\mu = 4 \div 6$  см<sup>2</sup>/В·с, и они обладают достаточно высокой фоточувствительностью. Основными факторами, влияющими на структуру и совершенство пленок CdTe, являются упругость паров кадмия и теллура в реакторе. Эти факторы, в свою очередь, зависят от технологических параметров – температуры источника ( $T_{II}$ ), температуры подложки ( $T_{II}$ ) и от скорости водорода ( $v_{H_2}$ ) в реакторе. Кроме того, установлено, что пленки CdTe, полученные при температуре подложки  $T_{II} = 650^\circ C$ , источника  $T_{II} = 950^\circ C$  и скорости водорода  $v_{H_2} = 2$  л/час, наиболее совершенные. Металлографические исследования поверхности пленки показали, что она состоит из блоков микрокристаллов с толщиной  $20 \div 60$  мкм. Пленки полученные при условиях  $T_{II} = 650^\circ C$  ( $T_{II} = const$ ,  $v_{H_2} = const$ ) имеют зеркально блестящую поверхность.

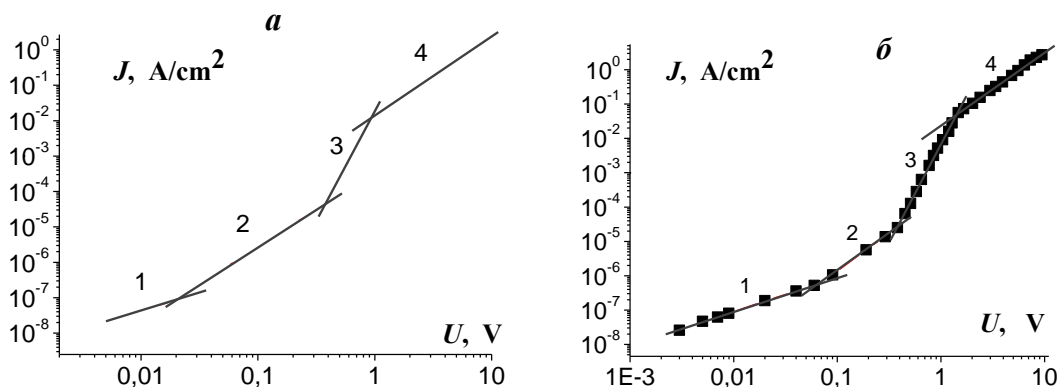
На поверхности полученных пленок была создана МОП-структура путем напыления алюминия (Al) в вакууме ( $\sim 10^{-5}$  Torr). Фронтальный алюминиевый контакт имел толщину  $\sim 40 \div 50$  nm и площадь  $S \approx 0.07 \div 0.1$  см<sup>2</sup>. Тыловым электрическим контактом являлась Mo-подложка. Пленки p-CdTe имели удельное сопротивление  $\rho \approx 10^9 \div 10^{11}$  Ом·см и время жизни неосновных носителей заряда – электронов  $\tau \sim 10^{-7} \div 10^{-6}$  с. Результаты рентгеноструктурных исследований показывают, что во всех пленках CdTe рефлекс с индексами (111) являются самыми интенсивными, следовательно, имеется ориентирующая плоскость, и для них характерна сфалеритная структура. Наличие других «пиков» с рефlekсами (220), (311), (400) свидетельствует о том, что пленки CdTe имеют кубическую, гранецентрированную решетку с координационным числом 12. Рентгенофазный анализ показал, что в проведенном технологическом процессе образуется МОП-структура, а именно Al – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – p-CdTe (металл Al, окисел Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, полупроводник CdTe).



В третьей главе «Исследование электрофизических характеристик структуры Al – p-CdTe – Mo» установлены механизмы переноса тока, проходящих в Al – p-CdTe – Mo-структуре и влияние ультразвукового облучения (УЗО) на ее электрофизические свойства, что, в свою очередь, позволило понять физические процессы, происходящие в таких структурах.

Для проведения исследований свойств и характеристик Al – p-CdTe – Mo-структур их образцы изготавливались с различной толщиной базы (p-CdTe) в идентичных технологических условиях. Пленки p-CdTe сначала получались толщиной  $40 \div 50 \text{ }\mu\text{m}$ , так как при таких толщинах получаются наиболее совершенные кристаллические структуры слоев и при таких толщинах получение пленок различной толщины не влияет на динамику распределения дефектов в них. Затем толщины пленок доводились до оптимальных размеров ( $8 \div 10 \text{ }\mu\text{m}$ ) путем шлифовки и полировки, так как при толщинах базы  $w \leq 5 \text{ }\mu\text{m}$  диодная Al – p-CdTe – Mo-структура резко теряет выпрямляющие свойства. Например, его коэффициент выпрямления (определяемый как отношение прямого и обратного тока ( $K = \frac{I_{пр}}{I_{обр}}$ ) при фиксированном напряжении смещения ( $U = 5 \text{ V}$ )), при толщине базы  $w = 8 \div 10 \text{ }\mu\text{m}$  составляет четыре – пять порядков, а при  $w \approx 5 \text{ }\mu\text{m}$  всего лишь два порядка при той же величине напряжения. Это объясняется тем, что количество структурных дефектов, в том числе различных комплексов и включений в растущей пленке, на расстоянии  $d \leq 5 \text{ }\mu\text{m}$  и меньше от молибденовой подложки, с приближением к ней начинает резко повышаться.

ВАХ Al – p-CdTe – Mo-структуры измерялась в прямом (когда к Mo-подложке прикладывался «+» источника тока) и обратном (когда к Mo-подложке прикладывался «-» источника тока) направлениях в широких пределах изменения тока и напряжения. На рис.1. приведены прямые ВАХ, построенные в двойном логарифмическом масштабе для двух образцов Al – p-CdTe – Mo-структур с толщинами баз  $8 \text{ }\mu\text{m}$  (a) и  $10 \text{ }\mu\text{m}$  (b), соответственно. Здесь образец № 1 с толщиной базы  $w = 8 \text{ }\mu\text{m}$  (a) и образец № 2 с толщиной базы  $w = 10 \text{ }\mu\text{m}$  (б). Как видно, из рис.1 обе кривые ВАХ описываются степенными зависимостями типа  $J = A \cdot U^\alpha$ .



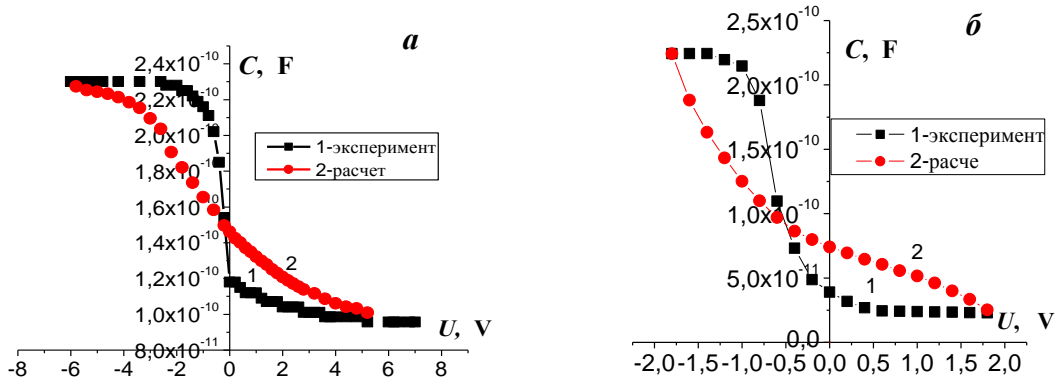
a – образец № 1 с  $w = 8 \text{ }\mu\text{m}$ , б – образец № 2 с  $w = 10 \text{ }\mu\text{m}$ .

**Рис. 1. Прямые ветви ВАХ Al – p-CdTe – Mo-структуры в двойном логарифмическом масштабе, измеренные в темноте при  $T = 300 \text{ K}$**

Результаты анализа показывают, что прямая ветвь ВАХ Al – p-CdTe – Мо-структуры, состоит в основном из четырех участков, описываемых следующими закономерностями: 1)  $J = A \cdot U^{\alpha_1}$ ,  $\alpha_1 \approx 0.97 \approx 1.0$ ; 2)  $J = A \cdot U^{\alpha_2}$ ,  $\alpha_2 \approx 2.0$ ; 3)  $J = A \cdot U^{\alpha_3}$ ,  $\alpha_3 \approx 6.43$  и 4)  $J = A \cdot U^{\alpha_4}$ ,  $\alpha_4 = 2,01 \approx 2$  для образца №1 и 1 –  $J = A \cdot U^{\alpha_1}$ ,  $\alpha_1 \approx 0.98 \approx 1$ ; 2 –  $J = A \cdot U^{\alpha_2}$ ,  $\alpha_2 = 2.04 \approx 2$ ; 3 –  $J = A \cdot U^{\alpha_3}$ ,  $\alpha_3 \approx 5.71$  и 4 –  $J = A \cdot U^{\alpha_4}$ ,  $\alpha_4 \approx 2$  для образца № 2, соответственно.

Установлено, что при малых плотностях тока в рекомбинационных процессах участвуют точечные дефекты, а при больших плотностях тока, когда скорость рекомбинации выходит на полное насыщение, т.е.  $U \approx N_R/\tau_i$ , рекомбинационные процессы в исследуемых образцах определяются сложными комплексами, внутри которых задерживаются электроны.

Ультразвуковое облучение проводилось на частоте 2.5 МГц с мощностью  $P = 1 \text{ W/cm}^2$  в течение 15 минут. Экспериментальная вольт-фарадная характеристика (рис.2а и 2б, кривая 1) была снята при частоте  $f = 1 \text{ kHz}$ . Расчетная  $C(U)$ -характеристика (рис.2а и 2б, кривая 2) была получена методом, описанным С.3и.



**Рис. 2. Экспериментальная (1) и расчетная (2)  $C(U)$ -характеристики Al – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – p-CdTe – Мо-структуры до (а) и после (б) УЗО**

При расчетах  $C(U)$ -характеристики были использованы величины емкости ( $C_i$ ) окисного слоя и концентрация равновесных дырок полупроводника ( $p_0$ ), определенные из экспериментальной ВФХ:  $C_i \approx 2.3 \cdot 10^{-10} \text{ F}$ ,  $p_0 \approx 3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  до и  $C_i \approx 2.24 \cdot 10^{-10} \text{ F}$ ,  $p_0 \approx 2 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  после УЗО.

Анализ данных рис.3а и 3б показывает, что при термодинамическом равновесии (при отсутствии напряжения смещения) на границе раздела двух сред имеется изгиб края разрешенной зоны, о чем свидетельствуют величины поверхностного потенциала, имеющие до и после УЗО значения:  $\psi_s \approx 0.17 \text{ eV}$  до и  $\psi_s \approx 0.25 \text{ eV}$  после облучения, соответственно. Это означает, что УЗО, действительно, приводит к отжигу поверхностных состояний в нижней половине запрещенной зоны полупроводника на границе раздела. Еще это подтверждается также уменьшением (от  $\sim 0,68 \text{ eV}$  до  $\sim 0,55 \text{ eV}$ ) высоты потенциального барьера в результате УЗО.

В этой главе анализируется также зависимость эффективной плотности поверхностных состояний от поверхностного потенциала  $-D_{it}(\psi_s)$ , полученной до и после облучения УЗО. Как видно из рис.4, плотность поверхност-

ных состояний достаточно низкая. Она при  $\psi_s = 0$  равна:  $D_{it} = 3.4 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$  до УЗО и  $\sim 7.6 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$  после УЗО. Приведенные выше экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что окисный слой  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , сформированный между алюминием (Al) и теллуридом кадмия (CdTe), является достаточно совершенным.

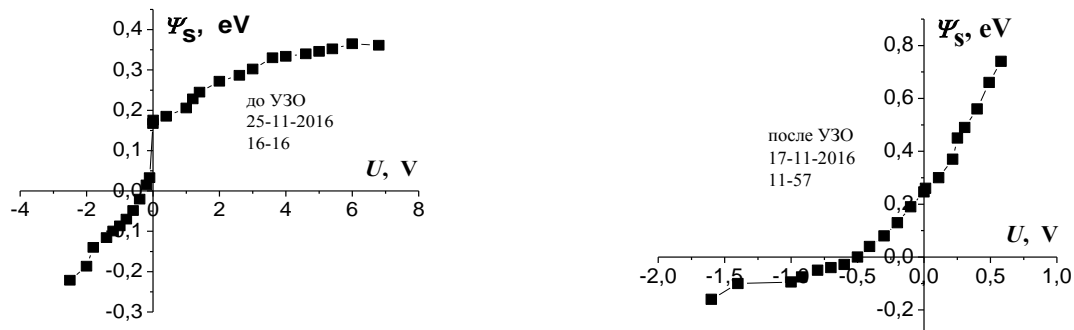


Рис. 3. Зависимость поверхностного потенциала  $\psi_s$  от напряжения смещения  $U$  до (а) и после (б) УЗО

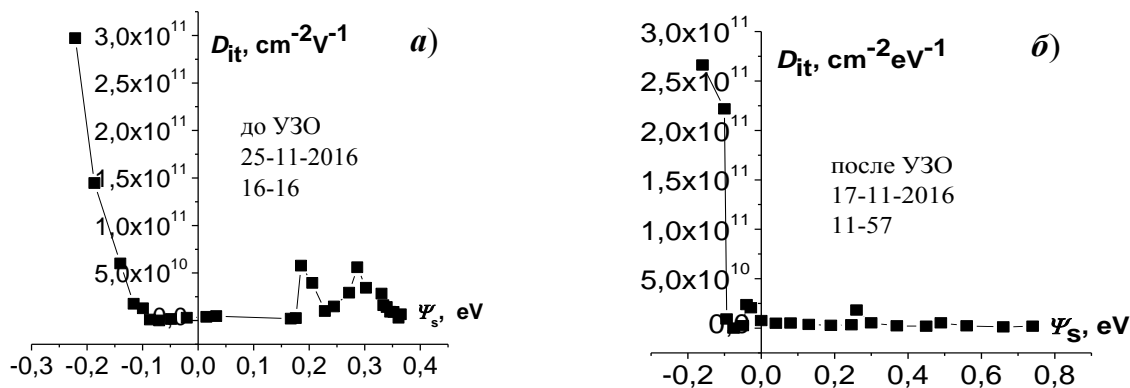
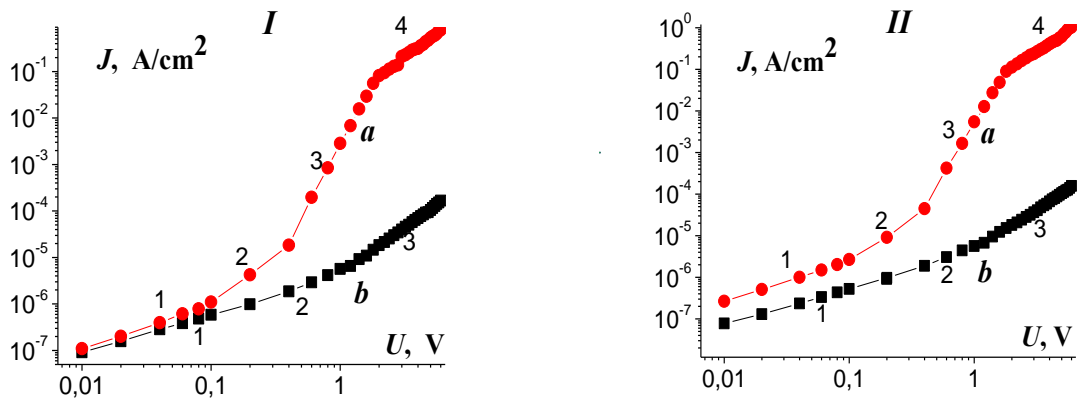


Рис. 4. Зависимость эффективной плотности поверхностных состояний от поверхностного потенциала на границе раздела окисел  $p$ -CdTe до (а) и после (б) УЗО

Поскольку окисный слой  $\text{Al}_2\text{O}_3$  является одним из основных элементов в исследуемой структуре  $\text{Al} - \text{Al}_2\text{O}_3 - p\text{-CdTe} - \text{Mo}$ , то изменение его свойств, в том числе концентрации дефектов и примесей в слоях диэлектрика – окиси (поверхностные состояния) должно влиять на электрофизические и фотоэлектрические свойства всей структуры. Для подтверждения этого предположения были исследованы ВАХ структуры в прямых и обратных направлениях смещения до и после УЗО (см. рис.5). Результаты исследований показали, что УЗО практически не влияет на закономерности протекания тока в структуре как в прямом, так и в обратном направлениях. При этом наблюдается, что после УЗО прямой ток увеличивается примерно на 25-30%, а обратный ток уменьшается на 6-9%, коэффициент выпрямления ( $K$ ) возрастает в 1.4 раза.

В четвертой главе «**Фотоэлектрические свойства инжекционного фотодиода на основе структуры  $\text{Al} - n\text{-Al}_2\text{O}_3 - p\text{-CdTe} - n\text{-MoO}_3 - \text{Mo}$** » исследованы фотоэлектрофизические свойства  $\text{Al} - n\text{-Al}_2\text{O}_3 - p\text{-CdTe} - n\text{-MoO}_3 - \text{Mo}$ -структуры. Результаты этих исследований позволили понять физические процессы, происходящие в таких структурах и оценить потен-

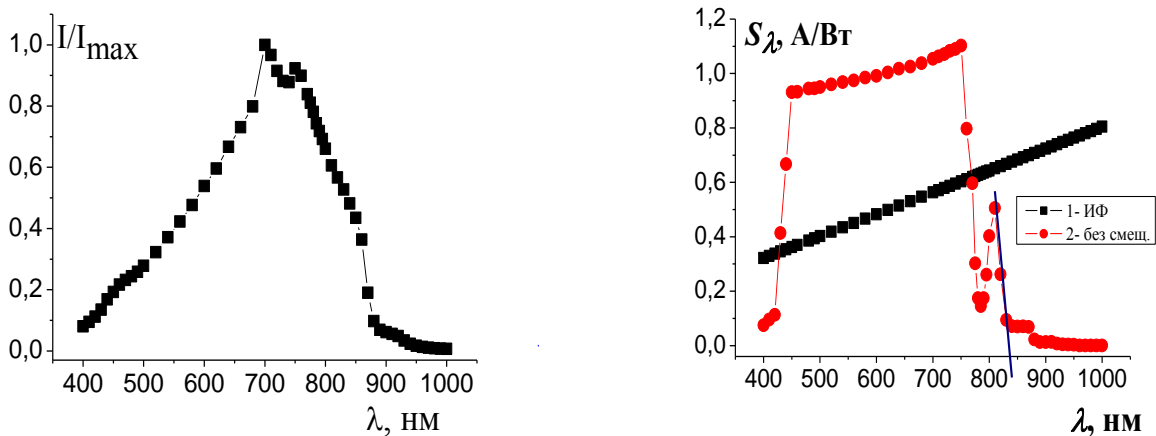
циальные возможности использования их в приборных разработках.



Ia: 1- 1; 2- 2; 3- 5.3; 4- 2; Ib: 1- 0.84; 2- 1; 3- 2. IIa: 1- 1; 2- 2; 3- 5; 4- 2; IIb: 1- 0.79; 2- 1; 3- 2.

**Рис. 5.** Вольтамперные характеристики типа  $I \sim U^a$  с различными наклонами при прямом (a) и обратном (б) направлениях тока до (I) и после (II) УЗО

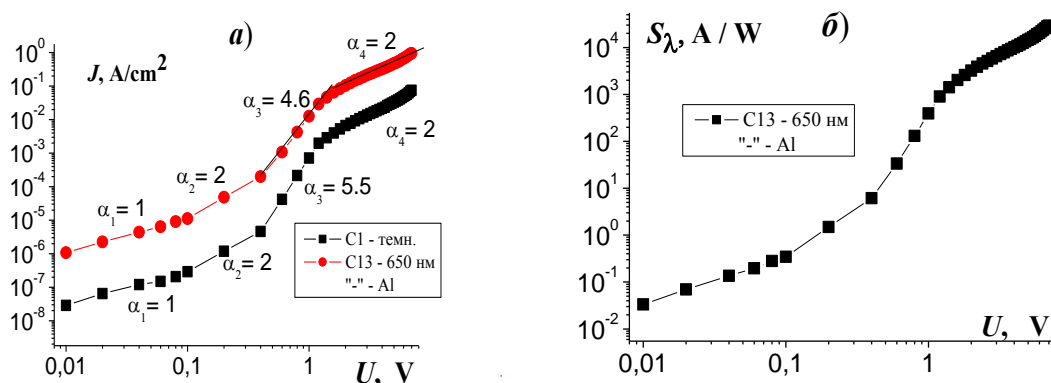
На рис.6 приведены спектральные зависимости фототока -  $I_{ph}(\lambda)$  и фоточувствительности -  $S_\lambda(\lambda)$  Al - n-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - p-CdTe - Mo-структуры в относительных единицах в отсутствии напряжения смещения. Результаты исследований показывают, что Al - n-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - p-CdTe - Mo-структура усиливает первичный фототок даже при отсутствии напряжения смещения. Например, при длине волны  $\lambda = 450$  нм ее спектральная чувствительность имеет значение  $S_\lambda \approx 0.93$  А/Вт, что в 2.3 раза больше, чем  $S_{\lambda(ид)}$  идеального ФП при данной длине волны, а при  $\lambda = 750$  нм  $S_\lambda \approx 1.1$  А/Вт, соответственно, соотношение  $S_\lambda/S_{\lambda(ид)} \approx 1.85$ .



**Рис. 6.** Спектральная зависимость фототока-(a) и фоточувствительности-(б) структуры Al - n-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - p-CdTe - Mo (1) и идеального ФП (2) при отсутствии напряжения смещения в относительных единицах

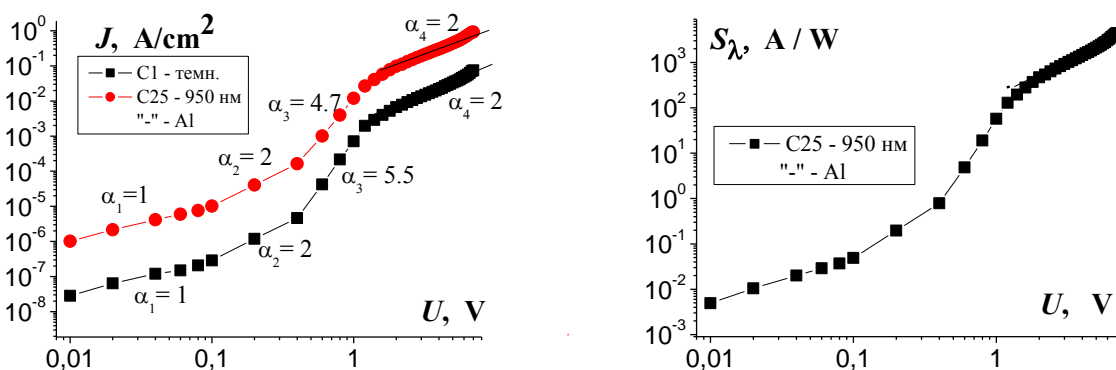
В этой главе исследовались также закономерности изменения спектральной чувствительности от величины тока. С этой целью было проведено совместное исследование ВАХ Al - n-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - p-CdTe - Mo-структуры в темноте и на свету, а также зависимости токовой чувствительности от напряжения смещения. Кроме того, рассматривалось влияние облучения монохроматическим светом в области собственного поглощения. Для этого

были измерены ВАХ в темноте и на свету при облучении монохроматическим светом ( $\lambda = 650$  нм) в области собственного поглощения (рис.7а), а также зависимость  $S_\lambda$  от  $U$  (рис.7б). Из рисунков 7 и 8 видно, что прямые ВАХ структуры на свету при освещении в области как «собственного» (см. рис.7), так и «примесного» поглощения (см. рис.8а) имеют одинаковые закономерности с ВАХ в темноте. Они отличаются лишь по величине тока при одном и том же значении напряжения смещения. Зависимость  $S_\lambda(\lambda)$  (см. рис.8б) имеет очень сходный вид с ходом ВАХ на свету, причём она описывается также четырьмя степенными зависимостями типа  $S_\lambda \sim U^\alpha$ , у которых показатель степени  $\alpha$  полностью совпадает с величиной  $\alpha$  световой ВАХ.



**Рис.7.** Зависимости плотности тока  $J$  (а) и токовой фоточувствительности  $S_\lambda$  (б) от напряжения смещения в прямом направлении тока структуры  $\text{Al} - n^+ - \text{Al}_2\text{O}_3 - p - \text{CdTe} - n - \text{MoO}_3 - \text{Mo}$  в темноте (1) и на свету (2) монохроматическим светом при  $\lambda = 650$  нм,  $T = 300$  К

Установлено, что в структуре  $\text{Al} - p - \text{CdTe} - \text{Mo}$  наибольшее внутреннее усиление ( $\sim 10^4 - 10^5$  А/Вт) фотосигнала происходит тогда, когда она включена в пропускном направлении и освещена собственным светом при напряжении смещения  $U = 7$  В. При освещении «примесным» светом фотосигнал также усиливается; однако, степень усиления его на два порядка меньше, чем у сигнала в области собственного поглощения при одном и том же значении приложенного напряжения.



**Рис. 8.** Зависимости плотности тока  $J$  (а) и токовой фоточувствительности  $S_\lambda$  (б) от напряжения смещения в прямом направлении тока структуры  $\text{Al} - n^+ - \text{Al}_2\text{O}_3 - p - \text{CdTe} - n - \text{MoO}_3 - \text{Mo}$  в темноте (1) и на свету (2) при освещении монохроматическим светом при  $\lambda = 950$  нм,  $T = 300$  К

Показано, что при освещении «примесным» светом с длиной волны  $\lambda = 950$  нм на квадратичном участке световой ВАХ в пропускном направлении, описываемом законом Ламперта, происходит фотомодуляция биполярной подвижности ( $\mu_a$ ). При этом  $\mu_a$  изменяется в пределах от  $40 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  до  $3.7 \cdot 10^2 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ; и происходит фотоэлектрическое инжекционное усиление, в результате чего спектральная чувствительность ( $S_\lambda$ ) в конце этого участка становится равной  $\sim 0.8 \text{ A/W}$ , что превышает значение спектральной чувствительности идеального ФП ( $S_\lambda \approx 0.75 \text{ A/W}$ ) при той же длине волны. Особенно это хорошо ощущается на начальном участке ВАХ, где она более чем в 20 раз больше фоточувствительности идеального ФП.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам создания инжекционного фотоприемника с внутренним усилением на основе пленок  $p\text{-CdTe}$  со столбчатой структурой зерен и исследования происходящих в нем электронных процессов сделаны следующие выводы:

1. Изготовлен широкополосный ( $\lambda = 400 \div 1000$  нм) фотоприемник с внутренним усилением на основе пленок  $p\text{-CdTe}$  со столбчатой структурой зерен, предназначенный для регистрации световых сигналов в области длин волн  $\lambda = 450 \div 750$  нм, их усиление происходит за счет реализации механизмов усилений – положительной обратной связи (ПОС) и параметрического усиления (ПУ).

2. Выявлено, что прямая ветвь вольтамперной характеристики структуры состоит в основном из четырех степенных участков. В частности, при малых плотностях тока в рекомбинационных процессах участвуют точечные дефекты, а при больших плотностях тока, когда скорость рекомбинации выходит на полное насыщение  $U \approx N_R/\tau_i$ , рекомбинационные процессы в исследуемых образцах определяются серией комплексов с вакансиями и другими дефектами, которые образуют сложные центры рекомбинации и определяют механизмы переноса носителей.

3. Установлено, что после воздействия УЗО окисные заряды отжигаются и даже вносят вклад в создание дополнительных поверхностных ловушек, а нестабильные точечные дефекты, находящиеся в приповерхностном слое полупроводника, становятся электрически нейтральными, приводя при этом к увеличению прямого тока примерно на 25-30%, и уменьшению обратного тока на 6-9%.

4. Выявлено, что структура  $\text{Al} - \text{Al}_2\text{O}_3 - p\text{-CdTe} - \text{MoO}_3 - \text{Mo}$  в пропускном направлении тока работает как инжекционный фотоприемник с высокой фоточувствительностью при малых интенсивностях полезного сигнала за счет насыщающего характера зависимости фототока от интенсивности оптического излучения.

5. Экспериментально показано, что быстроедействие  $\text{Al} - \text{Al}_2\text{O}_3 - p\text{-CdTe} - \text{MoO}_3 - \text{Mo}$ -структуры в запиорном направлении на два порядка выше по сравнению с пропускным направлением.

**SCIENTIFIC COUNCIL AWARDING OF THE SCIENTIFIC DEGREES  
DSc.27.06.2017.FM/T.34.01 PHYSICAL-TECHNICAL INSTITUTE,  
INSTITUTE OF ION-PLASMA AND LASER TECHNOLOGIES,  
SAMARKAND STATE UNIVERSITY**

---

**PHYSICAL-TECHNICAL INSTITUTE  
KARAKALPAK STATE UNIVERSITY**

**UTENIYAZOV ABATBAY KURBANIYAZOVICH**

**ELECTRONIC PROCESSES RESEARCH IN TELLURIDE CADMIUM  
INJECTION PHOTORESEIVERS**

**01.04.10-Physics of semiconductors**

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

**TASHKENT-2018**

**The theme of dissertation of doctor of 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 B2017.2PhD/FM101.**

Dissertation has been prepared at physical-technical institute.

The abstract of the dissertation is posted in two languages (uzbek, russian, english (resume)) on the website (fti.uz ) and the «Ziyonet» Information and educational portal (www.ziyonet.uz).

**Scientific supervisor:** **Mirsagatov Shavkat Akramovich**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

**Official opponents:** **Mamadlimov Abdugafur Teshabaevich**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Academician

**Ayukhanov Rashid Akhmetovich**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences

**Leading organization:** **Tashkent University of information Technologies**

Defense will take place « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 at \_\_\_\_\_ at the meeting of Scientific Council number DSc.27.06.2017.FM/T.34.01 Physical-technical institute, institute of ion-plasma and laser technologies, Samarkand state university. (Address: 100084, Uzbekistan, Tashkent, 2B Bodomzor yuli street. Phone/fax: (+99871) 235-42-91, e-mail: info.fti@uzsci.net.).

Dissertation is possible to review in Information-resource centre at Physical-technical institute (is registered № \_\_\_\_ ) (Address: 100084, Uzbekistan, Tashkent, 2B Bodomzor yuli street. Phone/fax: (+99871) 235-30-41, e-mail: info.fti@uzsci.net).

Abstract of dissertation sent out on « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 year  
(Mailing report № \_\_\_\_\_ on « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 year)

**N.R. Avezova**  
Chairman of scientific council on award of scientific degrees, doctor of technical sciences

**A.V. Karimov**  
Scientific secretary of scientific council on award of scientific degrees, DSc in physics and mathematics, professor

**I.G. Atabayev**  
Chairman of scientific Seminar under Scientific Council on award of scientific degrees, DSc in physics and mathematics, professor



## INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

**The aim of research work** is creation an injection photodetector with internal amplification based on *p*-CdTe films with a columnar grain structure and an investigation of electronic processes in such a photodetector.

**The object of research work** are Al – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – *p*-CdTe – MoO<sub>3</sub> – Mo structures obtained on the basis of high-resistance strongly-compensated *p*-CdTe films with different base's thicknesses.

### **Scientific novelty of research work:**

the technology of obtaining high-resistance strongly compensated CdTe films with optimal output parameters by the method of gas-transport reaction in the flow of hydrogen has been developed;

it is ascertained that ultrasonic irradiation (UI) does not practically affect the regularities of the current flow both in the forward and reverse directions. It is shown that after the UI the forward current increases by about 25-30%, and the reverse current decreases by 6-9%, the rectification factor (K) increases by 1.4 times;

the wide-band ( $\lambda = 400\div 1000$  nm) photodetector with internal amplification based on *p*-CdTe films with a columnar grain structure was created and investigated. Such photodetector without interference not only records light signals in the wavelength region  $\lambda = 450\div 750$  nm, but also amplifies them.

**Implementation of research results.** The scientific results of electronic processes research in telluride cadmium injection photodetectors were used in the implementation of the Karakalpak State University named after Berdakh F-2-37 "Peculiarities of laser-induced nonlinear processes of defect formation in semiconductors" 2012-2016. (Reference No. FTA-02.11/1043 of the Committee for the Coordination of the Development of Science and Technology of the Republic of Uzbekistan of November 7, 2017). The use of scientific results made possible to develop non-destructive express method for monitoring and predicting the reliability of injection photodetectors and photodiode structures during operation.

physical methods of surface potential control were used in the implementation of the international project T15MN-001 «Investigation of physical and antibacterial properties of metal and metallocene fullerides, determination of possibility of their application in medical instrument coverings» (2015-2017) to reduce current leakage in heterojunction structures (Certificate No. 32/Asp of Institute of Heat and mass exchange named A.V. Lykov NAS of Belarus from 2017 on December 21). Application of scientific results allowed to reduce leakage current in heterostructures by an order of magnitude.

**The structure and volume of the scientific research work.** The dissertation consists of an introduction, four chapters, conclusion and a list of references. The text of the dissertation consists of 121 pages, 50 figures, 6 tables, 93 references.

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

**I бўлим (I часть; I part)**

1. Мирсагатов Ш.А., Утениязов А.К., Лейдерман А.Ю., Садыков М. «Об особенностях токопрохождения в транзисторной структуре, изготовленной на базе CdTe» // Доклады Академии наук РУз. Ташкент, 2011. -№ 4. – С. 20-22. (01.00.00. №7).

2. Mirsagatov Sh.A., Uteniyazov A.K. «Injection Photodiode Based on *p*-CdTe Film» // Technical Physics Letters, 2012, Vol. 38, No. 1. -P.34-37. (№11. Springer, IF: 0.771).

3. Mirsagatov Sh.A., Uteniyazov A.K., Achilov A.S. «Mechanism of Current Transport in Schottky Barrier Diodes Based on Coarse-Grained CdTe Films» // Physics of the Solid State, 2012. Vol. 54, No. 9. -P.1643-1654. (№11. Springer, IF: 0.769).

4. Mirsagatov Sh.A., Uteniyazov A.K. «The mechanism of current transport in the structure Al-*p*-CdTe-Mo with different thickness of the base» // Физическая инженерия поверхности. – Харьков, 2015, vol. 13, №3 – С.325-329. (01.00 00. №91).

5. Мирсагатов Ш.А., Утениязов А.К. «Плотность поверхностных состояний на границе раздела структуры M(Al) – O(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) – П(CdTe)» // Доклады Академии наук РУз. – Ташкент, 2016. -№ 5. -С. 18-22. (01.00.00. №7).

6. Мирсагатов Ш.А., Утениязов А.К. «Исследование влияния толщины базы на механизм переноса тока в обратной ветви вольт-амперной характеристики структуры Al – *p*-CdTe – Mo» // Доклады Академии наук РУз. –Ташкент, 2017. -№ 1. – С. 25-29. (01.00.00. №7).

7. Мирсагатов Ш.А., Утениязов А.К. «Влияние толщины базы на параметры рекомбинационных постоянных в структуре Al – *p*-CdTe – Mo» // Доклады Академии наук РУз. -Ташкент, 2017.-№ 2. –С. 17-21. (01.00.00. №7).

**II бўлим (II часть; II part)**

8. Утениязов А.К. «О природе квадратичного участка ВАХ в инжекционных режимах» // Студент и научно-технический прогресс. Сборник материалов XIX международной научной студенческой конференции. –Новосибирск, 2011 г. – С. 248.

9. Мирсагатов Ш.А., Утениязов А.К. «Механизм переноса тока в диодах с барьером Шоттки на основе крупноблочных пленок CdTe» // Фотоэлектрические и теплофизические основы преобразования солнечной энергии. Сборник материалы Республиканской научно-технической конференции.- Фергана, 2011. – С. 6-7.

10. Мирсагатов Ш.А., Утениязов А.К. «Инжекционный фотодиод на основе Al – *p*-CdTe – Mo-структуры с барьером Шоттки» // Фотоэлектрические и теплофизические основы преобразования солнечной энергии. Сборник

материалы Республиканской научно-технической конференции. –Фергана, 2011. – С. 7-8.

11. Мирсагатов Ш.А., Утениязов А.К. «Релаксационные явления в диодах с барьером Шоттки на основе крупноблочных пленок CdTe» // Структурная релаксация в твердых телах. Сборник материалы IV международной научно-практической конференции. – Винница (Украина), 2012. –С.250-252.

12. Мирсагатов Ш.А., Утениязов А.К. «Исследование вольтамперных характеристик структуры Al – p-CdTe – Mo в зависимости от толщины базы» // Фундаментальные и прикладные вопросы физики. Сборник международной конференции. –Ташкент, 2015. – С. 316-320.

13. Мирсагатов Ш.А., Утениязов А.К. «Электрофизические характеристики структуры Al – p-CdTe – Mo с барьером Шоттки при малых плотностях тока» // Современные проблемы физики полупроводников. Республиканская научно-практическая конференция. -Нукус, 2015. –С. 10-12.

14. Мирсагатов Ш.А., Утениязов А.К. «Поверхностные состояния диода Шоттки со структурой M(Al) – O(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) – П(CdTe)» // Физика твердого тела. XIII международная научная конференция. – Астана (Казахстан), 2016. – С. 100-103.

15. Мирсагатов Ш.А., Утениязов А.К. «Механизм переноса тока в обратной ветви вольтамперной характеристики структуры Al – p-CdTe – Mo» // Каракалпакский государственный университет в годы независимости. Сборник материалов Республиканской научно-практической конференции. - Нукус, 2017. – С. 64-65.

16. Утениязов А.К. «Рекомбинационные процессы в структуре Al – p-CdTe – Mo при малых плотностях тока» // Каракалпакский государственный университет в годы независимости. Сборник материалов Республиканской научно-практической конференции. -Нукус, 2017. – С.65-67.

17. Мирсагатов Ш.А., Утениязов А.К., Исмаилов К.А. «Влияние ультразвукового облучения на электрофизические свойства структуры M(Al) – O(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) – П(CdTe)» // Фундаментальные и прикладные вопросы физики. Республиканской научно-практической конференции. –Ташкент, 2017. – С. 174-178.

Автореферат «Тил ва адабиёт таълими» журнали таҳририятида ўзбек, рус ва инглиз (резюме) тилларида таҳрирдан ўтказилди (05.12.2017 йил).

Босишга рухсат этилди: «\_\_\_»\_\_\_\_\_2018 йил.  
Бичими 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>, «Times New Roman»  
гарнитурда рақамли босма усулида босилди.  
Шартли босма табағи 2,25. Адади: 100. Буюртма: № 95.

Ўзбекистон Республикаси ИИВ Академияси,  
100197, Тошкент, Интизор кўчаси, 68.

«АКАДЕМИЯ НОШИРЛИК МАРКАЗИ»  
Давлат унитар корхонасида чоп этилди.