

**ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ
ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.30.05.2018.ФМ/Т.34.01
РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ

АТАБОЕВ ОМОНБОЙ КУРБАНБОЕВИЧ

**A²B⁶ ЯРИМЎТКАЗГИЧЛИ БИРИКМАЛАР CdS_xTe_{1-x}-Zn_xCd_{1-x}Te
ҚАТТИҚ ҚОРИШМАЛАРИ АСОСИДАГИ ИНЖЕКЦИЯЛИ
ФОТОДИОДЛАР**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

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

Тошкент – 2018

**Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD)
диссертация 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**

Атабоев Омонбой Курбанбоевич

A^2B^6 яримўтказгичли бирикмалар $CdS_xTe_{1-x}-Zn_xCd_{1-x}Te$ қаттиқ қоришмалари асосидаги инжекцияли фотодиодлар 3

Атабоев Омонбой Курбанбоевич

Инжекционные фотодиоды на основе твердых растворов $CdS_xTe_{1-x}-Zn_xCd_{1-x}Te$ полупроводниковых соединений A^2B^6 25

Ataboev Omonboy Kurbanboevich

Injection photodiodes based on solid solutions of $CdS_xTe_{1-x}-Zn_xCd_{1-x}Te$ semiconductor compounds A^2B^6 47

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works. 51

**ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ ХУЗУРИДАГИ
ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.30.05.2018.ФМ/Т.34.01
РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ

АТАБОЕВ ОМОНБОЙ КУРБАНБОЕВИЧ

**A²B⁶ ЯРИМУЎТКАЗГИЧЛИ БИРИКМАЛАР CdS_xTe_{1-x}-Zn_xCd_{1-x}Te
ҚАТТИҚ ҚОРИШМАЛАРИ АСОСИДАГИ ИНЖЕКЦИЯЛИ
ФОТОДИОДЛАР**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

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

Тошкент – 2018

Фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2017.2.PhD/FM79 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Физика-техника институтида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгашнинг веб-саҳифасида (www.fti.uz) ҳамда «ZiyoNet» Ахборот-таълим порталида (www.ziyounet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:

Мирсагатов Шавкат Акромович
физика-математика фанлари доктори, профессор

Расмий оппонентлар:

Утамурадова Шарифа Бекмурадовна
физика-математика фанлари доктори, катта илмий ходим

Мавлонов Ғиёсиддин Ҳайдарович
физика-математика фанлари доктори, доцент

Етакчи ташкилот:

Тошкент ахборот технологиялари университети

Диссертация ҳимояси Физика-техника институти ҳузуридаги DSc.30.05.2018.FM/T.34.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2019 йил «__» _____ кuni соат ____ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100084, Тошкент шаҳри, Чингиз Айтматов кўчаси, 2Б-уй. Тел./факс: (99871) 235-42-91; e-mail: ftikans@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, Чингиз Айтматов кўчаси, 2Б-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

О.А. Абдулхаев

Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш илмий котиби, ф.-м.ф. бўйича фалсафа доктори

А. Абдурахманов

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

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертациясининг аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Ҳозирги кунда жаҳон амалиётида жадал ривожланаётган яримўтказгичлар физикаси соҳасида A^2B^6 бирикмалари ва уларнинг қаттиқ қоришмалари асосида электромагнит нурланиш спектрининг кўзга кўринадиган ($\lambda=0.45\div 0.7$ мкм) соҳасида сезувчан, ички кучайтириш хусусиятига эга бўлган фотодиодларни яратиш, ҳамда улардаги ток ўтиш механизмлари ва фотосезгирликларини тадқиқ қилиш долзарб муаммолардан бири бўлиб келмоқда. Бу борада $Zn_xCd_{1-x}Te$ қаттиқ қоришмасининг таркибини танлаш ҳисобига фотодиод тузилмаларининг электромагнит нурланиш спектрининг зарур соҳасида юқори сезгирликга эришиш фототокнинг максимал қийматларини таъминлашнинг асосий вазифаларидан бири ҳисобланади.

Бугунги кунда жаҳонда фотодиод тузилмаларини ишлаб чиқаришда тақиқланган соҳа кенглигини бошқариш мумкин бўлган A^2B^6 бирикмалари ва уларнинг қаттиқ қоришмаларини қўллаш ҳисобига фотосезгирлик диапазонини бошқариш, ҳамда бирламчи фототокни кучайтириш хусусиятига эга бўлган фотодиод тузилмаларини ишлаб чиқиш масалаларига катта аҳамият қаратилмоқда. Бу борада қуйидаги йўналишларда мақсадли илмий тадқиқотларни олиб бориш муҳим вазифалардан бўлиб ҳисобланади: инжекцияли фотодиодлар яратиш учун $Zn_xCd_{1-x}Te$ қаттиқ қоришмасининг йирик донаторликга эга бўлган поликристалл юпқа қатламларини олишнинг технологик режимларини оптималлаштириш; гетероўтишни ҳосил қилувчи қатламлар орасидаги номувофиқликни бартараф этиш имконини берувчи оралик қатламли $nCdS-pZn_{0.35}Cd_{0.65}Te$ тизимида гетероўтишни ҳосил қилиш; экспериментал тарзда олинган узун базали гетероўтишли тузилмаларнинг фотосезгирлиги ва ток ўтиш механизмларини аниқлаш; гетеротузилмани турли режимларда улашда спектрал характеристикаларининг шаклланиш қонуниятларини аниқлаш; $nCdS-pZn_{0.35}Cd_{0.65}Te$ -гетероўтишли тузилмаларда кечадиган физик жараёнларнинг база параметрлари ва ток характеристикаларининг ҳарорат режимлари билан ўзаро боғлиқлигини аниқлаш.

Республикамизда истиқболли фундаментал ва амалий илмий тадқиқотларга етарлича аҳамият қаратилмоқда, хусусан, кенг спектрал диапазонга ва кичик қоронғулик тоқларига эга бўлган фотодиод тузилмаларининг янги авлодини яратиш, ҳамда A^2B^6 , A^3B^5 бирикмалари ва уларнинг қаттиқ қоришмалари асосида инжекцияли фотодиодларнинг янги тузилмаларини олиш технологияларини ривожлантириш бўйича кенг қўламли изланишлар олиб борилмоқда. Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантиришнинг Ҳаракатлар стратегиясига мувофиқ, «илмий-тадқиқот ва инновация фаолиятини рағбатлантириш, илмий-инновацион фаолият ютуқларини амалиётга жорий этишнинг самарали механизмларини яратиш»¹ масалаларига алоҳида эътибор қаратилмоқда. Бунда асосий эътибор турли мақсадларда қўлланишга мўлжал-

¹Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича ҳаракатлар стратегияси тўғрисида» ги Фармони.

ланган импорт ўрнини босувчи яримўтказгич материаллар ва тузилмаларни ишлаб чиқишга қаратилган. Шунини алоҳида таъкидлаш керакки, ушбу фаолият илмий тараққиётнинг замонавий талабларига жавоб бера оладиган илмий натижаларни олишга мўлжалланган ва фаол тадбиркорлик, инновацион ғоялар ва технологияларни қўллаб-қувватлаш доирасида амалга оширилмоқда. Бу борада CdS ва унинг қатик қоришмалари, жумладан $Zn_{0.35}Cd_{0.65}Te$ асосида яратилган яримўтказгичли тузилмаларда содир бўладиган, уларнинг функционал характеристикаларини белгилаб берувчи фотоэлектрик жараёнларни тадқиқ қилиш зарурат ҳисобланади. Бу ўз навбатида улар асосида олинган фотосезгир тузилмаларнинг янги имкониятларини ва қўлланилиш соҳаларини очиқ беришга имкон беради.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 13 февралдаги ПҚ–2772-сон «2017–2021 йилларда электротехника саноатини бошқаришни янада такомиллаштириш, жадал ривожлантириш ва диверсификация қилиш чора-тадбирлари тўғрисида»ги, 2017 йил 17 февралдаги ПҚ-2789-сон «Фанлар Академияси фаолиятини, илмий тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида» ги ва 2018 йил 14 июлдаги ПҚ-3855-сон «Илмий ва илмий-техникавий фаолият натижаларини тижоратлаштириш самарадорлигини ошириш бўйича қўшимча чора-тадбирлар тўғрисида»ги Қарорлари ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот иши Ўзбекистон Республикасининг фан ва технологияларни ривожлантиришнинг III. «Энергетика, энергия ва ресурс тежамкорлиги, транспорт, машина ва асбобсозлик, замонавий электроника, микроэлектроника, фотоника ҳамда электрон асбобсозликни ривожлантириш» устувор йўналишига мувофиқ бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Илк бор инъекцияли фотодиодлар таниқли рус физиклари В.И.Стафеев, И.М.Викулин, Ш.Д.Курмашев ва уларнинг шогирдлари томонидан яратилган. Улар тор ва кенг зонали ярим ўтказгичлар асосида $p-n$ -, p^+i-n^+ - ёки $p-i-n$ - тузилмалари, базаси катта қаршиликли ва қалинлиги номувозанат ток ташувчиларнинг диффузион узунлигидан анча катта бўлган фотодиодларни яратишди. Бундай фотодиодларни ишлаб чиқишда Ge, GaAs ва GaP каби яримўтказгичли материаллари ишлатилган ва улар азот ҳароратида самарали ишлаш хусусиятига эга.

Академик М.К.Баҳадирхановнинг ишларида марганец нанокластерига эга бўлган кремнийнинг фотосезгирлиги ўрганилган ва спектрнинг киришма атомлари соҳасида юқори фотосезгирлик кузатилган. Шунингдек академик А.Т.Мамадалимов ва унинг шогирдлари томонидан чуқур сатҳли Zn ва V киришмалари кремний асосидаги диод тузилмаларида спектрнинг $\lambda \leq 3.5$ мкм соҳасида сезгирлик тоқини бошқариш мумкинлиги кўрсатилган, S-қўринишдаги характеристикага эга бўлган, хона ҳароратида (300 K) ишлай оладиган

инжекцияли фотоқабуллагичлар яратилган. Профессор А.В.Каримов раҳбарлигида кремний ва галлий арсениди асосидаги инжекцияли фотодиодлар устида тадқиқотлар олиб борилмоқда.

Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Физика-техника институтида A^2B^6 яримўтказгич бирикмалари ва уларнинг қаттиқ қоришмалари асосида инжекцияли фотодиодларини яратиш ҳамда уларнинг физик хусусиятларини тадқиқ қилиш бўйича тадқиқотлар профессор Ш.А.Мирсагатов раҳбарлигида бошланган. Масалан, Ш.А.Мирсагатов ва Р.Р.Кобулов томонидан $nCdS-pCdTe$ гетеротузилмаси асосидаги инжекцияли фотодиодлар яратилган ва тадқиқ қилинган, Ш.А.Мирсагатов ва И.Б.Сапаев томонидан $n^+CdS-nCdS-pSi$ -гетеротузилмалари асосида инжекцияли фотодиодлар яратилган ва тадқиқ қилинган, Ш.А.Мирсагатов ва А.К.Утениязов томонидан $Al-Al_2O_3-pCdTe-MoO_3-Mo$ асосидаги инжекцияли фотодиодлари яратилган ва тадқиқ қилинган.

Бироқ ҳозирги кунда электромагнит нурланиш спектрининг кўзга кўринадиган соҳасида фотосезгирлиги бошқарилувчан $n-CdS-p-Zn_xCd_{1-x}Te$ тизимли гетеротузилмаларда ток ўтиш механизмлари ва фотосезгирлик етарлича ўрганилмаган.

Тадқиқотнинг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот муассасаси илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқотлари Физика-техника институти амалий ва фундаментал илмий-тадқиқот ишлари режасининг АЗ-ФА-0-11242 рақамли «Саноатда металл қотишмалар таркибидаги элементларни тезкор аниқлаш учун кўчма спектроанализаторни ишлаб чиқиш» (2012-2016 й.), ФЗ-ФА-0-56434 рақамли «Кўёш элементлари ва яримўтказгич асбоблари учун нано уланишли тузилмалар ҳамда юпка пленкали тузилмаларнинг ҳосил бўлишининг физик қонуниятлари» (2012-2016 й.) илмий лойиҳалари ҳамда 2012 йил 4 майдаги 1/05-12 рақамли «Компьютер технологияларини қўллаган ҳолда металл қотишмаларнинг кимёвий таркибини аниқлаш учун тезкор спектроанализаторни ишлаб чиқиш» (2012-2015 й.) хўжалик шартномаси доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади электромагнит нурланиш спектрининг кўзга кўринадиган соҳасида фотосезгирлиги бошқарилувчан $CdS_xTe_{1-x}-Zn_xCd_{1-x}Te$ қаттиқ қоришмалар асосида яратилган гетеротузилмалардаги фотосезгирлик ва ток ўтиш механизмларини аниқлашдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

инжекцияли фотодиодлар яратиш учун $Zn_xCd_{1-x}Te$ қаттиқ қоришмасининг йирик донадорликга эга бўлган поликристалл юпка қатламларини олишнинг технологик режимларини оптималлаштириш;

гетероўтишни ҳосил қилувчи қатламлар орасидаги номувофиқликни бартараф этиш имконини берувчи оралиқ қатламли $nCdS-pZn_{0.35}Cd_{0.65}Te$ тизимида гетероўтишни ҳосил қилиш;

экспериментал тарзда олинган узун базали гетероўтишли тузилмаларнинг фотосезгирлиги ва ток ўтиш механизмларини аниқлаш;

гетеротузилмани турли режимларда улашда спектрал характеристикаларининг шаклланиш қонуниятларини аниқлаш;

$n\text{CdS}-p\text{Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}$ -гетероўтишли тузилмаларда кечадиган физик жараёнларнинг база параметрлари ва ток характеристикаларининг ҳарорат режимлари билан ўзаро боғлиқлигини аниқлаш.

Тадқиқотнинг объекти $n\text{CdS}-p\text{Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}$ гетероўтиши асосидаги инжекцияли фотодиодлардан иборат.

Тадқиқотнинг предмети $\text{In}-n^+-\text{CdS}-n-\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}-p-\text{Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}-\text{Mo}$ гетеротузилманинг фотосезгирлиги ва ток ўтиш механизмларидан иборат.

Тадқиқотнинг усуллари. Қўйилган вазифаларни амалга оширишда сканерловчи электрон микроскопия, рентген нурларининг дифракцияси, энергия дисперсияли рентген спектрометрияси, спектрал фотосезгирлик, вольт-фарада характеристикалари, ҳамда яримўтказгичларда ток ўтиш механизмларини таҳлил қилишнинг замонавий тадқиқот усулларидан фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

$\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$ қаттиқ қоришмаси юзасига вакуумда 250°C таглик ҳароратида кадмий сульфиди ўстирилиб, гетероўтиш чегарасида $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ва $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}_y\text{S}_{1-y}$ қатламлари шаклланиши ҳисобига кристалл панжаралари параметрларининг номувофиқлигини бартараф этиш имконини берувчи $n\text{CdS}-p\text{Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}$ -гетероўтишини ҳосил қилишнинг технологик режими оптималлаштирилган ва улар асосида, электромагнит нурланиш спектрининг кўриш соҳасида юқори фотосезгирликка эга бўлган фотодиод тузилмалари олинган;

сирт ҳолатлари зичлигининг кичиклиги ($\sim 3.5 \cdot 10^{10} \text{ эВ}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$) ҳисобига $n\text{CdS}-p\text{Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}$ -гетероўтишли тузилманинг фотосезгирлигини сусайтирмасдан 0.49 дан 0.735 мкм гача бўлган спектрал диапазонда оптик сигналларни қайд қилиш хусусияти тажрибада аниқланган ва унинг асосида модда атомининг эмиссия спектри бўйича металл қотишмаларнинг кимёвий таркибини аниқловчи спектроанализатор учун қайд қилувчи қурилма - фотодиод ишлаб чиқилган;

қоронғуликда ҳамда интеграл ва монохроматик лазер нурланишли ёруғлик билан ёритилганда $\text{In}-n^+-\text{CdS}-\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}-p-\text{Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}-\text{Mo}$ -гетеротузилмада кичик ток зичликларида рекомбинация жараёнлари оддий маҳаллий марказларининг қатнашиши билан, катта ток зичликларида эса бу жараёнларнинг инертлигини оширувчи, ичида электрон алмашинишлар рўй берувчи мураккаб комплекслар иштирок этиши билан рўй бериши аниқланган;

фотосезгир $\text{In}-n^+-\text{CdS}-n-\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}-p-\text{Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}-\text{Mo}$ -гетеротузилмада тўғри ток режимида $203 \div 373 \text{ K}$ ҳароратлар оралиғида биполяр дрейфли ток ўтиш механизмли узун диод шартлари амалга ошиши тажрибада кўрсатилган;

$\text{In}-n^+-\text{CdS}-n-\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}-p-\text{Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}-\text{Mo}$ -гетеротузилмада тўғри ток йўналишидаги кичик кучланишларда фотосезгирлик диапазонининг қисқа

тўлқинлар $0.49 \div 0.53$ мкм ва узун тўлқинлар $0.71 \div 0.85$ мкм соҳасида номуво- занат заряд ташувчиларнинг қарама-қарши диффузияли ва дрейфли оқим- ларининг компенсациясига асосланган фототок йўналишининг инверсияси аниқланган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагидан иборат:

Спектрнинг кўриш соҳасида ($\lambda=0.490 \div 0.735$ мкм) фотосезгирликка эга бўлган $\text{In-}n^+ \text{-CdS-}n \text{-CdS}_x \text{Te}_{1-x} \text{-}p \text{-Zn}_{0.35} \text{Cd}_{0.65} \text{Te}$ -Мо-гетеротузилмаси асосида модда атомининг эмиссия спектри бўйича металл қотишмаларнинг кимёвий таркибини аниқлайдиган спектроанализатор учун фотодиодлар яратилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги ишда замонавий илмий тад- қиқот услубларидан, стандарт технологик қурилмалардан, намуналарнинг электрофизикавий параметрларини ўлчашда ўта аниқ ишловчи ўлчов асбоб- лари ва ускуналаридан фойдаланилганлиги, олинган экспериментал натижа- ларнинг назарий ҳисоблашлар ва мавжуд физикавий тушунчаларга мос кели- ши билан тасдиқланган.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.

Тадқиқотларнинг илмий аҳамияти A^2B^6 бирикмаларнинг қаттиқ қориш- малари асосидаги гетеротузилмаларда кечадиган, жумладан ток ўтиш меха- низмлари ва фотосезгирлик спектрининг юзага келиш жараёнлари тўғриси- даги физикавий тасаввурларнинг кенгайтирилганлиги билан изоҳланади.

Тадқиқотнинг амалий аҳамияти $n\text{CdS-}p\text{Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}$ -гетероўтишини яратишда олинган натижалар электромагнит нурланиш спектрининг кўзга кўринувчан соҳасида сезувчан, ички кучайтириш хусусиятига эга инжекция- ли фотодиодларни яратишдан иборат.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Электромагнит нурла- ниш спектрининг кўзга кўринадиган соҳасида фотосезгирлик спектри бошқа- рилувчи $\text{CdS}_x \text{Te}_{1-x} \text{-Zn}_x \text{Cd}_{1-x} \text{Te}$ қаттиқ қоришмалар асосида яратилган гетеро- тузилмалардаги фотосезгирлик ва ток ўтиш механизмларини аниқлаш бўйича олинган натижалари асосида:

коронфуликда, ҳамда интеграл ва монохроматик лазер нурланиши таъси- рида яримўтказгичларда юз берадиган рекомбинация жараёнларини аниқлаш бўйича олинган натижалар Ф-2-37 рақамли «Яримўтказгичларда нуқсонлар ҳосил бўлишининг лазерли индукцияланган ночизиқли жараёнларининг хусусиятлари» фундаментал лойиҳасида лазер нури интенсивлигини назорат қилиш ва бошқаришда фойдаланилган (Ўзбекистон Республикаси олий ва ўрта махсус таълим вазирлигининг 2018 йил 19 майдаги 89-03-1926-сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш лазер нури таъсир этти- рилган яримўтказгичдаги нуқсонларни зарарсиз экспресс таҳлил қилиш им- конини берган;

ишлаб чиқилган металл қотишмаларнинг кимёвий таркибини эмиссия усули билан тезкор аниқловчи спектр таҳлиллагичи «Ўзбекистон темир йўл- лари» акциядорлик жамиятининг «Тошкент механика заводи» акциядорлик жамиятида ишлаб чиқарилувчи конструкцияларнинг таркибини аниқлаш

учун қўлланилган («Ўзбекистон темир йўллари» акциядорлик жамиятининг 2018 йил 28 майдаги НГ/2653-18-сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш металл қотишмалардаги (Cu, Fe, Si, In, Mo, Ni, W, Te, Ag, Au, C, Al, Zn, Ti, Cr, Mn) кимёвий элементларнинг таркибини аниқлаш вақтини абсорбциялаш усулига нисбатан 10 марта қисқартириш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Тадқиқотнинг асосий натижалари 6 та халқаро ва 1 та республика илмий-амалий анжуманларида баён қилинган ва муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича жами 15 та илмий иш чоп этилган, шулардан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 8 та мақола, жумладан 4 таси хорижий халқаро журналларда нашр этилган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация таркиби кириш, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертация ҳажми 120 бетни ташкил қилади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

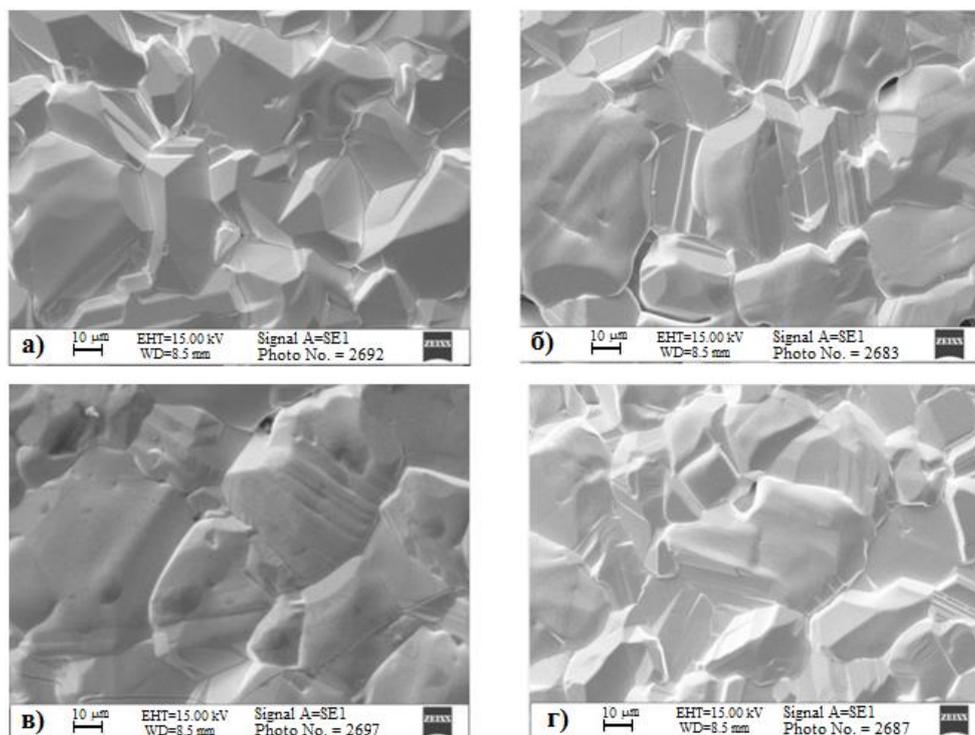
Кириш қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурияти асосланган, республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, муаммонинг ўрганилганлик даражаси очиқ берилган, тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари, объекти, предмети ва усуллари тавсифланган, тадқиқотнинг илмий янгиллиги ва амалий натижалари баён қилинган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий қилиш, ишнинг апробацияси, нашр этилган ишлар, диссертациянинг ҳажми ва тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

«Инжекцион фотодиодларнинг ривожланиш тамойиллари» номли биринчи бобда махсус адабиётларда келтирилган тор ва кенг зонали яримўтказгич материаллар асосида яратилган турли инъекцияли фотодиодлар кўриб чиқилган. Инжекцияли фотодиодларнинг электр, фотоэлектрик ва спектрал характеристикалари каби асосий параметрлари таҳлил қилинган. Инжекцияли фотодиодлардаги инъекцияли кучайиш механизмлари ўрганилган. Мавжуд экспериментал ва назарий маълумотлар таҳлили асосида тадқиқотнинг вазифалари шакллантирилган.

«Тадқиқот усуллари ва n^+ -CdS- n -CdS_xTe_{1-x}- p -Zn_xCd_{1-x}Te ярим ўтказгичли гетеротузилмаларни олиш технологиялари» деб номланган иккинчи боб Zn_xCd_{1-x}Te қаттиқ қоришма юпқа қатламларини ва CdS қатламини олиш технологияларига бағишланган. Электрон сканерловчи микроскоп ёрдамида Zn_xCd_{1-x}Te юпқа қатлами сиртининг микротузилиши ўрганилган. Рентген тузилиш таҳлили усули билан олинган Zn_xCd_{1-x}Te юпқа қатлами юзасининг текстураси ва фаза таркиби, ҳамда энергия-дисперсияли рентген таҳлили (маркаси «EDX-energy dispersive X-ray analysis» (Oxford Instrument – Aztec Energy Advanced X-act SDD)) ёрдамида олинган Zn_xCd_{1-x}Te қаттиқ қо-

ришма юпка қатламининг юзаси бўйлаб ва n^+ -CdS– p - $Zn_xCd_{1-x}Te$ гетероўтишнинг чуқурлиги бўйлаб кимёвий элементларнинг тақсимланиш тадқиқотлари натижалари келтирилган.

Газотранспорт усули билан водород оқимида иккита буғланиш манбалари ZnTe ва CdTe дан ўстириладиган $Zn_xCd_{1-x}Te$ юпка қатламларнинг ўсиш тезлигига таъсир этувчи асосий омиллар, бу тағликнинг ҳарорати ва газ ташувчи (водород) оқимининг тезлиги эканлиги тажрибада аниқланган. Юпка қатлам ўсиш тезлигининг тағлик ҳароратига ва газ оқимининг тезлигига боғлиқлигидан $Zn_xCd_{1-x}Te$ қаттиқ қоришмалар юпка қатламларини ўстириш жараёнининг оптимал технологик режимлари топилган ва улар қуйидаги қийматларга эга: тағликнинг ҳарорати $700^{\circ}C$ ва газ оқимининг тезлиги 1.5 литр/соат. Оптимал технологик режимларда юпка қатлам 80-90 мкм/соат тезликда, кристаллитлари зич жойлашган ва донадорлик ўлчамлари 40-70 мкм бўлган юпка қатлам шаклланади (1, в-расм). Бу тағликнинг ҳар хил ҳароратларида олинган $Zn_xCd_{1-x}Te$ юпка қатлами сиртининг микроструктураларини электронли сканерловчи микроскоп (ESM- EVO MA 10 CARL ZEISS) ёрдамида олиб борилган тасвирлари 1-расмда келтирилган тадқиқот натижалари билан тасдиқланган. Оптимал технологик режимларда олинган $Zn_xCd_{1-x}Te$ юпка қатламининг хона ҳароратидаги солиштирма қаршилиги $\sim 10^4$ Ом·см ни ташкил қилади.



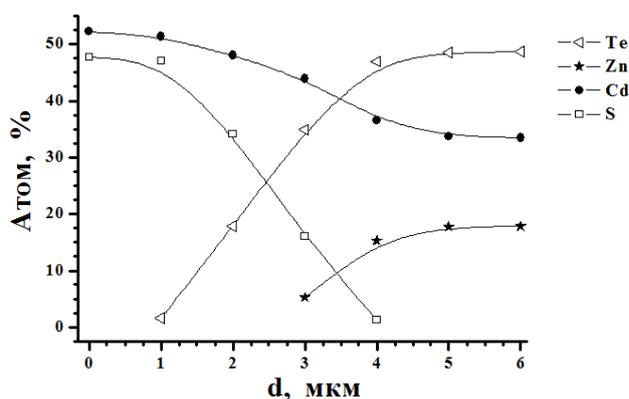
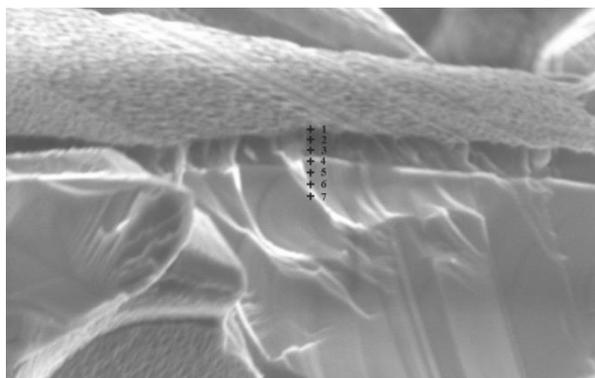
1-расм. Ҳар хил тағлик ҳароратларида синтез қилинган $Zn_xCd_{1-x}Te$ қатламлари сиртларининг микроструктуралари:
а) $640^{\circ}C$, б) $660^{\circ}C$, в) $700^{\circ}C$ ва г) $740^{\circ}C$

$700^{\circ}C$ тағлик ҳароратида ўстирилган $Zn_xCd_{1-x}Te$ юпка қатламининг текстураси ва фаза таркибининг рентген тузилиш тадқиқоти ДРОН-УМ-1 (CuK_{α} -нурланиш, $\lambda=0.15418$ нм, Ni – филтър, тезлик 2 град/дақиқа) дифрактометри-

да ўрганилди. $Zn_xCd_{1-x}Te$ юпка қатлам юзасининг рентген тузилиши тадқиқоти натижаларидан энг катта интенсивлик (~85-90%) $hkl-(111)$ кристаллографик текислик бўйича йўналишга эга бўлган $2\Theta=24.4$ градус қайтиш бурчагида кузатилиши аниқланди. Дифрактограммадаги интенсив чўққилар кубик сингонияга эга бўлиб, кичик бурчак қайтиши томонга силжиган $ZnTe$ юпка қатлами яримўтказгич фазасининг кристалл панжарасига мос келади. Экспериментал натижалар таҳлилидан $Zn_xCd_{1-x}Te$ юпка қатлами олинишида $ZnTe$ панжарасига $CdTe$ кириши ҳисобига панжара параметри катталашган, куб тузилишига эга бўлган яримўтказгичли кристалл фаза $ZnTe$ асосида қаттиқ қоришмасининг ҳосил бўлиши келиб чиқади. Чунки куб тузилишига эга $ZnTe$ юпка қатламининг панжара параметри $a_0=6.083 \text{ \AA}$, $Zn_xCd_{1-x}Te$ қаттиқ қоришма юпка қатламиники эса $a_0=6.33 \text{ \AA}$ га тенг бўлгани учун панжара параметри 0.248 \AA га катталашар экан.

Энерго дисперсияли рентген таҳлиллагичи EDX-energy dispersive X-ray analysis (Oxford Instrument – Aztec Energy Advanced X-act SDD) ёрдамида $Zn_xCd_{1-x}Te$ қаттиқ қоришма юпка қатлами таркибидаги Zn , Cd , Te атомларининг миқдорлари аниқланди ва ушбу тақсимот асосида « x » нинг қиймати 0.35 га тенглиги ($Zn_{0.35}Cd_{0.65}Te$) ҳисобланди.

$CdS-Zn_{0.35}Cd_{0.65}Te$ гетеро $p-n$ -ўтишини ҳосил қилиш учун солиштирма қаршилиги $\sim 10^4 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ бўлган $Zn_{0.35}Cd_{0.65}Te$ қаттиқ қоришма юпка қатламининг юзасига CdS қатлами, 10^{-5} Торр вакуумда ва $250\div 300^\circ\text{C}$ таглик ҳароратида квази ёпик ҳажмли вакуумда чанглантириш методи билан олинди. Бунда CdS қатлами ва $Zn_{0.35}Cd_{0.65}Te$ қаттиқ қоришмаси орасида умумий қалинлиги $\sim 3 \text{ мкм}$ бўлган CdS_xTe_{1-x} ва $Zn_xCd_{1-x}Te_yS_{1-y}$ қаттиқ қоришма қатламининг ҳосил бўлиши аниқланди.



2-расм. $nCdS-pZn_{0.35}Cd_{0.65}Te$ -гетероўтишининг ён томонидан олинган катталаштирилган фотосурати ва Cd , Zn , Te , S атомларининг $CdS-CdS_xTe_{1-x}-Zn_xCd_{1-x}Te_yS_{1-y}-Zn_{0.35}Cd_{0.65}Te$ гетеротузилма чуқурлиги бўйича тақсимланиши

Оралик ўтиш қатламининг элемент таркибини аниқлаш учун, EDX-energy dispersive X-ray analysis (Oxford Instrument – Aztec Energy Advanced X-act SDD) энерго дисперсияли рентген таҳлиллагичи ёрдамида янги синдирилган $nCdS-pZn_{0.35}Cd_{0.65}Te$ гетероўтишининг ён томонидан энерго дисперсияли рентген тадқиқоти ўтказилди.

2-расмда гетеротузилманинг ён томонидан олинган тасвири ва Zn, Cd, Te, S атомларининг ён томони бўйлаб тақсимланиши кўрсатилган. Кимёвий таркиб таҳлили орасидаги масофа 1 мкм бўлган 7 нуқтада амалга оширилди.

Атомлар тақсимланишининг кесимидан, $n\text{CdS}-p\text{Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}$ гетеротузилманинг ажралиш чегарасида, қалинликлари мос ҳолда ~ 2 мкм ва ~ 1 мкм бўлган $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ва $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}_y\text{S}_{1-y}$ қаттиқ қоришмалари ҳосил бўлиши келиб чиқади. CdS қатлами ва $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$ қаттиқ қоришмаси орасида $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ қаттиқ қоришмасининг ҳосил бўлиши ҳисобига уларнинг кристалл панжаралари доимийлари орасидаги номувофиклик 8% дан 2.3% гача камаяди. Бу эса ажралиш чегарасида сирт ҳолатларининг зичликлари кичик бўлган гетеротузиш ҳосил қилиш учун етарли ҳисобланади. $n\text{CdS}-p\text{Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}$ -гетеротузиш чегарасида ҳосил бўлган $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ қаттиқ қоришма кучли компенсацияланган катта қаршиликли қатлам бўлиб, ушбу гетеротузилмада база вазифасини бажаради.

CdS қатлами томонидан «Ш» шаклидаги ток олувчи контактлар 250°C ли таглик ҳароратида индийни $\sim 10^{-5}$ Торр вакуумда пуркаш йўли билан ҳосил қилинди.

$\text{In}-n^+-\text{CdS}-n-\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}-p-\text{Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}-\text{Mo}$ -тузилмани яримўтказгич-диэлектрик – яримўтказгич (ЯДЯ) тузилма каби қараш мумкин ва бунда n^+ -қатлам вазифасини кучли легирланган CdS қатлам, диэлектрик n -қатлам вазифасини кучли компенсацияланган катта қаршиликли $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ қаттиқ қоришма, p – қатлам вазифасини эса $\text{Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}$ қаттиқ қоришма бажаради. Бундай тузилмани шартли равишда $n^+-n(i)-p$ кўринишда ёзиш мумкин.

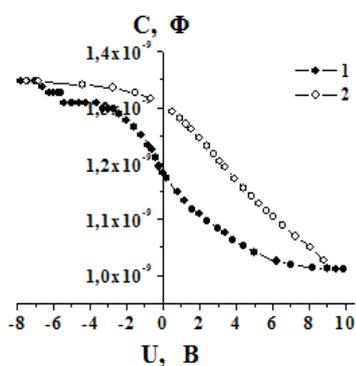
« $\text{In}-n^+-\text{CdS}-n-\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}-p-\text{Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}-\text{Mo}$ гетеротузилмаси асосидаги инжекцияли фотодиоднинг электрофизикавий характеристикалари» деб номланган учинчи бобда $\text{In}-n^+-\text{CdS}-n-\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}-p-\text{Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}-\text{Mo}$ гетеротузилма асосида яратилган инжекцияли фотодиодларнинг вольтфарада ва вольтампер характеристикалари тадқиқ қилинган. Экспериментал характеристикалар таҳлилидан сирт ҳолатлар зичлиги, сирт потенциали ҳамда кучланишининг кенг оралиғида токнинг оқиш қонунияти каби асосий электрофизикавий параметрлар аниқланган.

3-расмда 15 кГц частотада экспериментал (1-эгри чизик) ва ҳисоблаб чиқилган (2-эгри чизик) вольтфарада $C(V)$ -характеристикалар келтирилган. Ҳисоблаш йўли билан олинган $C(V)$ -характеристикани тузишда экспериментал $C(V)$ -характеристика бўйича аниқланган диэлектрик қатламининг сифими $C_i=(1.350\pm 0,005)\cdot 10^{-9}$ Ф ва мувозанатлашган коваклар концентрациясининг $p_0\approx(2.50\pm 0,01)\cdot 10^{14}$ см⁻³ қийматларидан фойдаланилди. 3-расмдан кўринадикки, экспериментал $C(V)$ -характеристика (1-эгри чизик) ҳисоблаб топилганга (2-эгри чизик) нисбатан чап томонга силжиган. Ушбу натижалар қаттиқ қоришма $\text{Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}$ сининг қатлами p -тип ўтказувчанликка эга эканлигини ва бўлиниш чегарасида сирт ҳолатлари мавжудлигини кўрсатади.

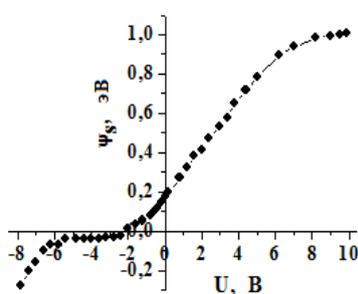
4-расмда келтирилган сирт потенциалининг кучланишга боғлиқлигидан кўринадикки, термодинамик мувозанат ҳолатида (кучланиш мавжуд бўлма-

ганда) бўлиниш чегарасида рухсат этилган зоналар чеккаларининг эгилиши содир бўлади, бу ҳақда сирт потенциалининг $\psi_s \approx 0.18$ эВ га тенглиги далолат беради. Бу эса сирт ҳолатлари акцептор характерга эга эканлигини ва улар мувозанатдаги ковакларни тутиб олиб, рухсат этилган зоналар чеккаларининг пастга эгилишига олиб келади.

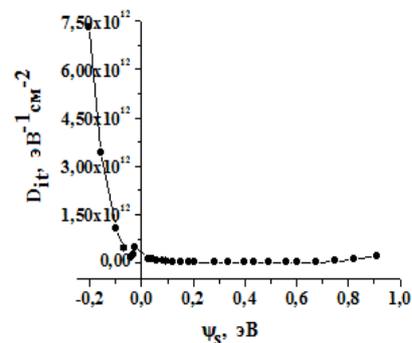
5-расмда сирт ҳолатлари зичлиги (D_{it}) нинг сирт потенциали (ψ_s) га боғлиқлиги келтирилган. Ушбу $D_{it}(\psi_s)$ -боғлиқликдан кўринадики, бўлиниш чегарасида $\psi_s=0$ бўлганда D_{it} нинг қиймати $(3,00 \pm 0,01) \cdot 10^{11}$ эВ⁻¹·см⁻² га тенг. $D_{it}(\psi_s)$ -боғлиқлик ярим ўтказгич тақиқланган зонасининг пастки ва юқори қисмларида турли қонуниятга бўсунади. Масалан, тақиқланган зонанинг пастки яримида D_{it} нинг қиймати тепа яримидагига қараганда кичик қийматга эга. Тақиқланган зонанинг тепа яримида унинг қиймати сирт потенциали ошиши билан $1.6 \cdot 10^{11}$ эВ⁻¹·см⁻² қийматдан $7.3 \cdot 10^{12}$ эВ⁻¹·см⁻² гача ошади.



3-расм. Экспериментал (1) ва ҳисобланган (2) $C(V)$ -характеристикалар



4-расм. Сирт потенциалининг берилган кучланишга боғлиқлиги



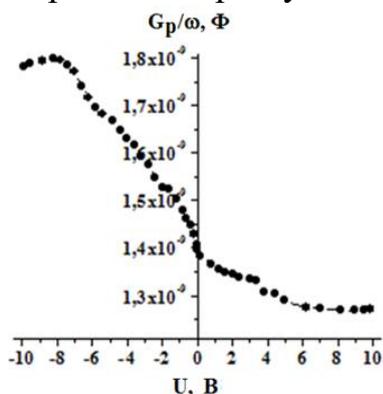
5-расм. Сирт ҳолатлари зичлигининг сирт потенциалига боғлиқлиги

Юқорида келтирилган услубда сирт ҳолатлари диэлектрик қатламининг реактив қаршилигини ҳисобга олмаган ҳолда аниқланган. 6-расмда кириш комплекс ўтказувчанлиги G_p актив ташкил этувчисининг 15 кГц частотадаги силжиш кучланишига боғлиқлиги келтирилган. $G_p/\omega(U)$ боғлиқлик $\omega=\tau^{-1}$ да максимум орқали ўтади, бу эса сирт тузоқларининг қайта зарядланиш вақти τ ни ва сирт ҳолатларининг сифими $C_s/2$ ни бевосита топишга имкон беради. Сирт ҳолатлари сифимини билган ҳолда сирт ҳолатларининг зичлигини ҳисоблаб топиш мумкин ва унинг қиймати -8.2 В кучланишда $2.25 \cdot 10^{10}$ эВ⁻¹·см⁻² га тенг бўлади (6-расм).

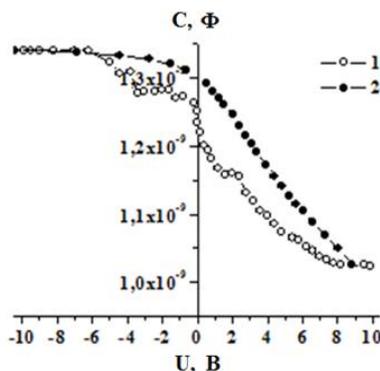
Диэлектрик қатламининг реактив қаршилигини ҳисобга олганда тадқиқ қилинаётган ЯДЯ-тузилмасининг сирт ҳолатлари зичлигининг сирт потенциалига боғлиқлиги бошқача кўринишга эга бўлади. Масалан, кириш комплекс ўтказувчанлигининг реактив ташкил этувчисидан ҳисоблаб топилган экспериментал сифимнинг (7-расм, 1-эгри чизик) назарий $C(V)$ -характеристикасига нисбатан (7-расм, 2-эгри чизик) силжиши бўйича аниқланган $D_{it}(\psi_s)$ -боғлиқлик 8-расмда келтирилган кўринишга эга бўлади. Ушбу боғлиқликдан кўриниб турибдики, сирт ҳолатларининг зичлиги тақиқланган зонанинг ўрта-сида, тўплаш, камбағаллашиш ва бойиш режимларида ($\psi_s = -0.2$ эВ гача) етар-

лича кичик қийматга эга бўлиб, $y \sim 3.5 \cdot 10^{10} \text{ эВ}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ дан ошмайди. Ўтказувчанлик усули ёрдамида ҳам худди шундай сирт ҳолатлари зичлигининг қиймати олинган.

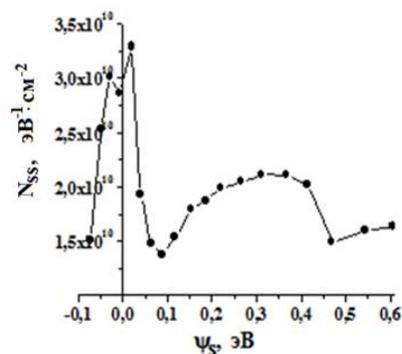
Ушбу экспериментал натижалар шуни кўрсатадики, катталиги бўйича диэлектрикнинг сифими ҳатто сирт ҳолатлари сифимидан ҳам кичик бўлади, шунинг учун ҳам C_i нинг реактив қаршилигини ҳисобга олмаса N_{ss} катталик етарлича юқори бўлади.



6-расм. 15 кГц частотада G_p/ω катталигининг силжиш кучланишига боғлиқлиги



7-расм. 15 кГц частотадаги экспериментал (1) ва назарий (2) $C(V)$ эгриликлари



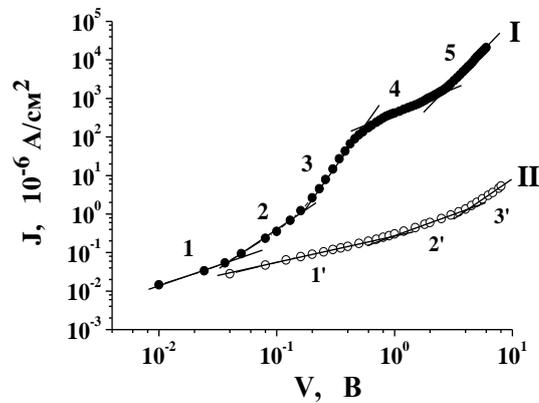
8-расм. Сирт ҳолатлари зичлигининг сирт потенциалига боғлиқлиги

8-расмдаги келтирилган $N_{ss}(\psi_s)$ -боғлиқликнинг мураккаб ўзгариши сирт зарядлари тақсимотининг нотекислиги билан тушунтирилади. Юқорида келтирилган экспериментал натижалар шу ҳақида маълумот берадики, CdS қатлами ва $Zn_{0.35}Cd_{0.65}Te$ қаттиқ қоришмаси орасида ҳосил бўлган CdS_xTe_{1-x} қаттиқ қоришмаси кучли компенсацияланган ва улардаги маҳаллий зарядланган марказлар нотекис тақсимланган бўлиб, бу эса сирт ҳолатлар зичлигининг сирт потенциалига боғлиқлик тақсимотида ўз аксини топган (8-расм).

Бу бобда шунингдек ҳар хил ҳароратларда $In-n^+-CdS-n-CdS_xTe_{1-x}-p-Zn_{0.35}Cd_{0.65}Te-Mo$ -гетеротузилманинг кучланишнинг тўғри ва тескари йўналишлардаги вольтампер характеристика (ВАХ)ларининг тадқиқот натижалари келтирилган. ВАХ таҳлили $In-n^+-CdS-n-CdS_xTe_{1-x}-p-Zn_{0.35}Cd_{0.65}Te-Mo$ гетеротузилма тўғрилаш хусусиятига эга эканлигини кўрсатди. Хона ҳароратида кучланишнинг маълум бир қийматида (6 В) тўғри ва тескари тоқларнинг нисбати ($K=J_{forw}/J_{rev}$) кўринишидаги тўғрилаш коэффиценти K тўрт даражани ташкил қилади (9-расм). Бунда тадқиқ қилинаётган $p-i-n$ -тузилма ҳароратнинг $203 \div 373 \text{ К}$ оралиғида диод каби самарали ишлай олиши кўрсатилган. Масалан, кучланишнинг маълум бир қийматида ($V=6 \text{ В}$) токни тўғрилаш коэффиценти ($K=J_{forw}/J_{rev}$) $T=203 \text{ К}$ да $K=3.9 \cdot 10^3$ га эга бўлиб, энг катта қиймати $K=1.4 \cdot 10^4$ га $T=283 \text{ К}$ да ва энг кичик қиймати $K=300$ га эса $T=373 \text{ К}$ да эришади.

$In-n^+-CdS-n-CdS_xTe_{1-x}-p-Zn_{0.35}Cd_{0.65}Te-Mo$ -гетеротузилманинг хона ҳароратидаги ($T=293 \text{ К}$) вольтампер характеристикасининг тўғри тармоқлари бир қанча қисмлардан иборат бўлиб, уларда инжекциянинг юқори сатҳларида

токнинг ўтиши бикутбли дрейф механизми билан амалга ошади ва у кучланишнинг функцияси каби $J \sim V^\alpha$ боғлиқлик билан ифодаланади, бу ерда даража кўрсаткичи α ҳар хил қийматларни қабул қилиши мумкин. Бунда ток зичлигининг ўзгариши билан ВАХ қонуниятининг ўзгариши рекомбинация жараёнларининг ўзгариши билан боғлиқ бўлиши тажрибада аниқланган.



I – тўғри тармоқ, II – тескари тармоқ

9-расм. $\text{In-}n^+ \text{-CdS-}n \text{-CdS}_x\text{Te}_{1-x} \text{-}p \text{-Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te-Mo}$ гетеротузилманинг қоронғуликдаги иккиланган логарифмик масштабдаги вольтампер характеристикаси ($T=293 \text{ K}$)

Кичик ток зичликларида номувозанатдаги ташувчиларнинг рекомбинацияси нуқтавий маҳаллий марказлар (нуқсонлар) орқали кечади, катта ток зичликларида эса рекомбинация жараёнлари учун мураккаб комплекслар маъсул бўлиб, уларнинг ичида электронларнинг алмашинуви содир бўлади. ВАХ қонунияти кетма-кетлик циклининг такрорланиши тадқиқ қилинаётган тузилма базасининг кўп қатламлиги билан боғлиқ ва улар нафақат солиштирма қаршилиги билан, балки қаттиқ қоришманинг таркиби билан, яъни тақиқланган зона кенлиги билан ҳам фарқланади.

203÷373 K оралиғида ҳароратнинг ўзгариши ВАХнинг соҳалар кетма-кетлигининг ўзгаришига, шунингдек соҳалар сонининг ўзгаришига ҳам олиб келиши аниқланган. Масалан, ҳар хил ҳароратларда ВАХнинг тўғри тармоқларида ток ва кучланишининг тадқиқ қилинаётган оралиғида қуйидаги кетма-кетликлар кузатилган: 1 – $J \sim V$, 2 – $J \sim V^{8.7}$, 3 – $J \sim V^5$ (203 K): 1 – $J \sim V$, 2 – $J \sim V^2$, 3 – $J \sim V^{4.3}$, 4 – $J \sim V^{1.2}$, 5 – $J \sim V^{3.2}$ (293 K), 373 K ҳароратда эса 1 – $J \sim V$, 2 – $J \sim V^{2.1}$, 3 – $J \sim V^{1.1}$, 4 – $J \sim V^{2.1}$. Токнинг ўтиш қонуниятининг ҳароратга боғлиқ ҳолда ўзгариши тузилманинг i -базаси кўп қатламлиги ва компенсация даражасининг ўзгариши билан, шунингдек рекомбинация жараёнларида мураккаб комплексларнинг ва оддий маҳаллий марказларнинг (нуқсонларнинг) иштирок этиш улушининг ўзгариши билан тушунтирилади. Бунда $n\text{-CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ каттиқ қоришмасининг ҳар хил қатламларида комплексларнинг миқдори ҳар хил эканлиги кўрсатилган.

Ушбу бобда ВАХ тўғри тармоғидаги ток ўтиш механизмининг тадқиқот натижалари асосида юқори ҳароратларда ($T=373 \text{ K}$) ва катта ток зичликларида тузилма етарлича юқори ишлаш тезлигига ($\mu_p \tau_p \approx 2.5 \cdot 10^{10} \text{ см}^2/\text{В}$) эга эканли-

ги кўрсатилган. Бу эса ушбу гетеротузилмалар асосида экстремал шароитларда (юқори ҳароратларда) ишлай оладиган самарали инжекцияли фотодиодларни яратишга имкон беради.

Гетеротузилма ВАХнинг тескари тармоғи $T=293$ К ҳароратда токнинг кучланишга боғлиқлиги қуйидагича ифодаланади: $J \sim V^{0.6}$, $J \sim V$, $J \sim V^2$. ВАХнинг биринчи қисми ҳажмий заряд қатламининг кенгайиши билан боғлиқ. ВАХнинг иккинчи қисмида юза томонидаги n^+ -CdS буфер қатламдан инжекцияланган номувозанатлашган асосий бўлмаган заряд ташувчилар (коваклар)нинг концентрацияси ҳажмий заряд қатламининг янада кенгайишини компенсациялайди шунинг учун токнинг кучланишга чизиқли боғлиқлиги кузатилади. ВАХнинг учинчи қисмида ток ўтишининг дрейф механизми амалга ошади ҳамда омик релаксация ва ВАХ билан боғлиқ ток ўтиши Ламперт қонуни билан тавсифланади.

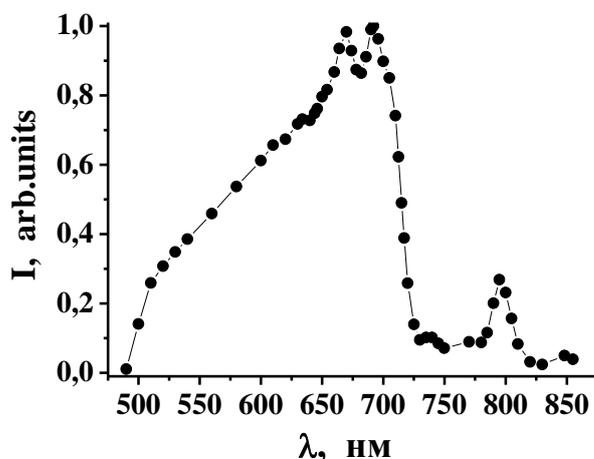
ВАХнинг тескари тармоғидаги ток ўтиш механизмининг ўзгариши, шунингдек гетеротузилма базасининг кўп қатламлилиги ва ҳарорат ошиши билан бир биридан ўтказувчанлиги ва рекомбинация марказларининг концентрацияси билан фарқланадиган кучли компенсацияланган катта қаршиликли каттик қоришманинг қатламларида ток ўтказиш жараёнида инжекцияланган ва мувозанатлашган заряд ташувчилар концентрациялари улушининг ўзгариши билан ҳам боғлиқ.

«In- n^+ -CdS- n -CdS_xTe_{1-x}- p -Zn_{0.35}Cd_{0.65}Te-Mo-гетеротузилма асосидаги инжекцияли фотодиоднинг фотоэлектрик характеристикалари» деб номланган тўртинчи боб In- n^+ -CdS- n -CdS_xTe_{1-x}- p -Zn_{0.35}Cd_{0.65}Te-Mo-гетеротузилма асосида яратилган инжекцияли фотодиодларни тадқиқ қилишга бағишланган. Фототокнинг спектрал боғлиқлиги кучланиш бўлмаганда, фотосезгирликнинг спектрал боғлиқлиги эса, кучланиш бўлмаганда ҳамда кучланишнинг тескари ва тўғри йўналишларида тадқиқ қилинган.

Кучланишнинг иккала йўналишларида гетеротузилманинг ВАХига интеграл ва монохроматик ёруғликнинг таъсири ўрганилди. Олинган тажриба натижалардан интеграл (S_{int}) ва спектрал (S_{λ}) фотосезгирлик катталиклари аниқланди. Ушбу характеристикаларнинг таҳлили интеграл (S_{int}) ва спектрал (S_{λ}) фотосезгирликларнинг ўзгариш оралиғини, инжекцион кучайиш даражасини ва фототокнинг инверсия нуқтасининг ҳосил бўлишини, шунингдек ушбу параметрларнинг силжиш кучланишига боғлиқ ўзгаришини ҳам баҳолашга имкон беради. Ушбу бобнинг охирида олинган натижалар асосида спектрнинг кўзга кўринувчан соҳасида маълум тўлқин узунлигига эга кичик ёруғлик сигналларини шовқинларсиз қайд қиладиган ички кучайтириш хусусиятига эга бўлган инжекцияли фотодиодларни яратиш имконияти ҳақида хулосалар қилинган. Ушбу фотодиодлар махсус техникада, металл қотишмаларнинг кимёвий таркибини аниқлай оладиган оптик спектроанализаторларни яратишда фойдаланилиши мумкин.

10-расмда гетеротузилмага кучланиш берилмаган ҳолда фототокнинг спектрал боғлиқлиги нисбий бирликларда келтирилган. 10-расмдан кўрина-

дики, гетеротузилманинг фотосезгирлик диапазони 490÷855 нм тўлқин узунликлар оралиғида жойлашган иккита соҳадан иборат. Биринчи соҳа 490÷730 нм тўлқин узунликлар оралиғида ётади. Ушбу оралиқда $\lambda \approx 670$ нм ва $\lambda \approx 692$ нм тўлқин узунликларида амплитудалари деярли бир хил бўлган иккита катта чўққилар мавжуд. Бундан ташқари $\lambda \approx 510$ нм, 610 нм ларда иккита эгиклик ва $\lambda \approx 634$ нм да эса текислик кузатилган. 730÷855 нм интервалида жойлашган иккинчи соҳада $\lambda \approx 795$ нм ва $\lambda \approx 848$ нм ли тўлқин узунликларида иккита кичик чўққилар кузатилган. Фототок спектрал тақсимотининг биринчи соҳасида кузатилган текислик ва эгикликлар $n\text{-CdS-p-Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}$ -гетероўтишнинг шаклланиш жараёнида ҳосил бўладиган қаттиқ қоришмалардаги нуқсонлар (киришмалар) нинг мавжудлиги билан боғлиқ.



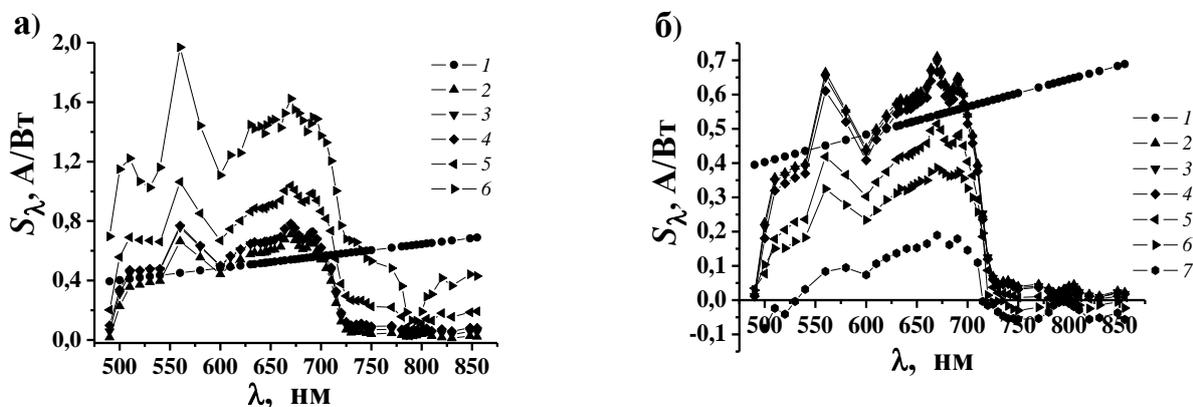
10-расм. $\text{In-n}^+\text{-CdS-n-CdS}_x\text{Te}_{1-x}\text{-p-Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te-Mo}$ гетеротузилманинг кучланиши бўлмагандаги, нисбий бирликлардаги фототокнинг спектрал боғлиқлиги

670 нм ва 692 нм тўлқин узунликларида жойлашган спектр чўққиларининг узун тўлқин чегараси бўйича, биринчи (~ 1.71 эВ) ва иккинчи (~ 1.63 эВ) чўққиларга мос бўлган фаоллашиш энергияларининг қийматлари топилди. Ушбу катталиқлар, эҳтимол, бир-бири билан контактда бўлган $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ва $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}_y\text{S}_{1-y}$ қаттиқ қоришмаларнинг тақиқланган зоналарининг кенглиги билан боғлиқ бўлиши мумкин. Фототок спектрал тақсимотининг иккинчи соҳасида кузатилаётган чўққилар кадмий теллуридининг гексагонал (1.53 эВ, 795 нм) ва куб (1.44 эВ, 848 нм) кўриниши билан боғлиқ.

Гетеротузилмага 0.5 В дан 5 В гача оралиқда тесқари кучланиш берилганда унинг спектрал фотосезгирлиги (S_λ) 490÷855 нм тўлқин узунлик оралиғида ўсади (11, а – расм). Бироқ, S_λ нинг энг кўп ошиши спектрнинг қисқа ва узун тўлқинлар соҳасида кузатилади. Масалан, тузилмага -5 В кучланиш берилганда, кучланиш берилмагандагига нисбатан, S_λ нинг қиймати $\lambda=490$ нм тўлқин узунликда 38 марта, спектрнинг узун тўлқин соҳасида $\lambda=725$ нм тўлқин узунликда 10 марта, 540÷700 нм тўлқин узунликлар оралиғида эса фақатгина 2.5÷3 мартага ошади.

Юқорида келтирилган тажриба натижаларидан гетеротузилмада бирламчи фототокнинг ички кучайиши юз берганлиги келиб чиқади.

Тўғри йўналишда $0.05 \div 0.4$ В кучланиш берилганда $S_{\lambda}(\lambda)$ боғлиқлик спектрал сезгирликнинг барча оралиқларида камаяди (11, б – расм). Маълумки, кучланиш ортиши билан ток катталигининг камайиши ҳодисаси, $p-i-n$ -тузилмада қарама-қарши йўналишли ток оқимлари вужудга келгандагина содир бўлади. Қарама-қарши йўналишлардаги тоқларнинг оқими фақат инжекцияловчи контактларнинг биттасида номувозанатдаги асосий бўлмаган заряд ташувчиларнинг йиғилишидан, яъни тўпланиш (аккумуляция) ҳодисаси юз беришидан амалга ошади. Ушбу ҳолатда номувозанатдаги заряд ташувчиларнинг диффузион ва дрейф оқимлари бир-бирига қарама-қарши йўналган бўлади ва бу эса гетеротузилмада токнинг камайишига олиб келади. Фототок белгисининг инверсияси ҳосил бўлиши ва фотосезгирлик чегараси спектрнинг узун тўлқинлар соҳаси томон силжиши, тўғри кучланишнинг ошиши билан диффузия тоқининг ошиши ҳисобига бўлади.



а) 1 – идеал фото қабуллагичнинг фотосезгирлиги, 2 – силжиш кучланиши бўлмагандаги спектрал фотосезгирлик, 3 – 0.5 В, 4 – 1 В, 5 – 3 В, 6 – 5 В

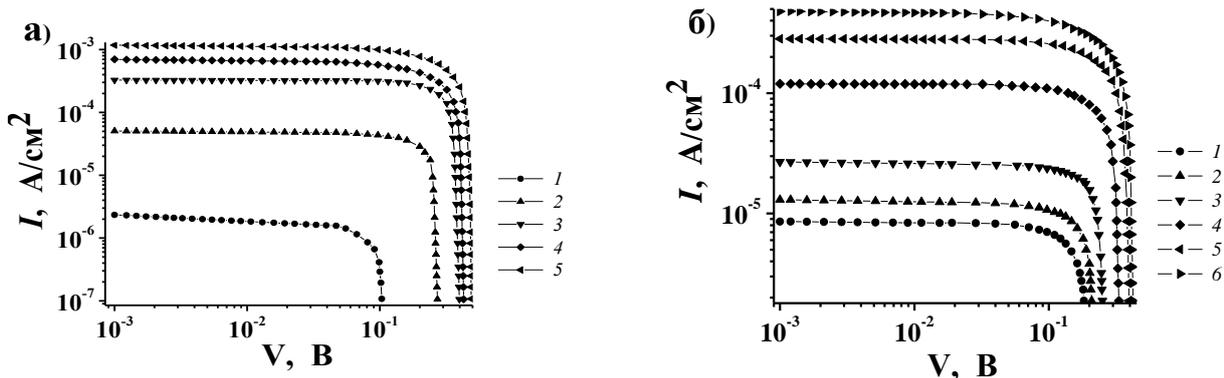
б) 1 – идеал фото қабуллагичнинг фотосезгирлиги, 2 – силжиш кучланиши бўлмагандаги спектрал фотосезгирлик, 3 – 0.05 В, 4 – 0.1 В, 5 – 0.2 В, 6 – 0.3 В, 7 – 0.4 В

11-расм. $In-n^+-CdS-n-CdS_xTe_{1-x}-p-Zn_{0.35}Cd_{0.65}Te-Mo$ -гетеротузилма фотосезгирлигининг (S_{λ}) тескари (а) ва тўғри (б) кучланиш берилгандаги спектрал боғлиқлиги

12-расмда гетеротузилманинг турли ёритилганлик даражаларидаги оқ ёруғлик (а) ва турли қувватлардаги лазер нурлари (б) билан ёритилгандаги экспериментал ВАХнинг тўғри тармоқлари келтирилган. 12, а-расмдан кўринадик, интеграл ёруғликнинг ёритилганлик даражаси 0.044 лк дан 264.7 лк гача ошганда, фототок белгисининг инверсияси юз берадиган силжитиш кучланишнинг катталиги 0.12 В дан ва 0.49 В гача силжиши кузатилган. Ёритилганлик ВАХнинг ушбу қисмида токнинг кучланишга субчизиқли боғлиқлиги кузатилади, бунда ушбу боғлиқликнинг узунлиги ёритилганлик даражаси ошгани сари ортиб боради. Бундай ҳодиса $p-i-n$ ($p-n(i)-n^+$)-тузилмада ўтишлардан биттаси идеал, иккинчиси эса ноидеал бўлганда ва базанинг (i -қатлам) қалинлиги узун бўлганида кузатилади. Юқорида келтирилган хусусиятларга эга бўлган $p-n(i)-n^+$ -тузилма, фототок белгисининг инверсиясига олиб келувчи ВАХ субчизиқли қисмининг ҳосил бўлишига маъсул бўлган, номувозанат-

даги ток ташувчиларнинг қарама-қарши йўналган диффузия ва дрейф оқимларини таъминлай олади.

12 (б)–расмдан кўринадики, лазер нурланишининг қуввати ошиши билан фототок инверсия нуқтаси кучланишнинг катта қийматлар томонига силжийди. Масалан, лазер нурланишининг қуввати $1.6 \cdot 10^{-7}$ Вт/см² дан $13.6 \cdot 10^{-3}$ Вт/см² гача ошганда фототокнинг белгисининг инверсияси содир бўладиган кучланишнинг қиймати 0.18 В дан 0.42 В силжийди. Гетеротузилманинг оқ ёруғликнинг турли ёритилганлик даражалари ва лазер нурланишининг турли қувватлари учун ВАХнинг субчизиқли қисмидан ҳисоблаб топилган баъзи бир параметрлари 1-жадвалда келтирилган.



Е, лк: 1 – 0.044, 2 – 1.1, 3 – 13.23, 4 – 83.8, 5 – 264.7, P , Вт/см²: 1 – $1.6 \cdot 10^{-7}$, 2 – $6 \cdot 10^{-7}$, 3 – $1.4 \cdot 10^{-6}$, 4 – $2.59 \cdot 10^{-3}$, 5 – $8.43 \cdot 10^{-3}$, 6 – $13.6 \cdot 10^{-3}$

12-расм. In- n^+ -CdS- n -CdS_xTe_{1-x}- p -Zn_{0.35}Cd_{0.65}Te-Мо-гетеротузилманинг $V=0.05 \div 0.5$ В кучланиш оралиғидаги, оқ ёруғлик ёритилганлигининг турли даражаларида (а) ва лазер нурининг турли нурланиш қувватларида (б) ($\lambda=632$ нм) ёритилгандаги иккиланган логарифм масштабидаги ВАХнинг тўғри тармоқлари

1-жадвалда келтирилган экспериментал маълумотлар кўрсатадики, ёритилганликнинг $E=0.044 \div 1.1$ лк оралиғида оқ нур билан ёритганда, гетеротузилманинг интеграл сезгирлиги энг катта қийматларга эга бўлади. Ёритилганлик даражасининг янада ошиши интеграл сезгирлик қийматининг тез суратлар билан камайишига олиб келди ва ёритилганлик $E=264.7$ лк бўлганда $S_{int}=4.56$ А/Вт қийматга эга бўлди. S_{int} катталигининг бундай хусусияти ёритилганлик даражаси ошиши билан чуқур ёпишиш сатҳларининг бўшаб қолиши билан боғлиқ, чунки бу ҳолда улар $n-n^+$ -гетероўтишда ковакларнинг йиғилиш жараёнига таъсир қила олмайдилар. Ёритилганлик ВАХнинг субчизиқли қисмидан ҳисоблаб топилган заряд ташувчиларининг биполяр дрейф тезлиги v_α ва ёпишиш сатҳларининг концентрациялари N_i 1-жадвалда келтирилган.

Ёритилганлик ВАХ да субчизиқли соҳа ҳосил бўлишининг асосий мезонларидан бири, номувозанатдаги асосий бўлмаган заряд ташувчилар учун чуқур ёпишиш сатҳлари тўлдирилишининг модуляцияси механизмида $\alpha Jw \geq 2$ шартнинг бажарилишидир. αJw кўпайтмани $v = v_0 e^{Jw}$ формула бўйича ВАХнинг субчизиқли қисмидан аниқлаш мумкин (v_0 - йиғувчи контактдаги ёпишиш сатҳларининг концентрациясига мос келувчи кучланиш, J – ток зичлиги, α - маълум бир параметр, w – базанинг узунлиги).

Ўтказилган ҳисоблашлар шуни кўрсатадики, $E_1=0.044$ лк ва $E_2=1.1$ лк ёритилганлик даражаларида $\alpha Jw < 2$, ёритилганликнинг бошқа даражаларида эса у иккига тенг ёки ундан катта. Бу эса экспериментда коваклар учун чуқур ёпишиш сатҳлари тўлдирилишининг ўзгариши билан боғлиқ бўлган ёритилганлик ВАХда субчизиқли соҳанинг ҳосил бўлишини тасдиқлайди.

Ушбу жадвалдан кўринадики, ёритилганлик даражаси ошиши билан v_a , N_t параметрларнинг катталиклари ортади. Ушбу параметрлар қийматларининг ортиши, фототок инверсия нуқтасига мос келувчи кучланишнинг катта қийматларга силжишига олиб келувчи, $n-n^+$ -тўсиқ атрофида коваклар концентрациясининг ошиши ҳамда гетеротузилма базасида диффузион оқимларнинг ошиши ҳисобига бўлади. Инверсия нуқтасининг пайдо бўлиши берилган кучланиш ва ёритилганлик даражасида бир-бирини компенсацияловчи диффузион ва дрейф оқимларининг тенглигини англайди.

1-жадвал

Гетеротузилма ёпишиш сатҳларининг концентрацияси (N_t), бикутбли дрейф тезлиги (v_a), фототок (I_{ph}) ва интеграл сезгирлиги (S_{int}) нинг ёритилганлик (E) ва лазер нурланишининг қувватига (P) боғлиқлиги.

| Оқ (интеграл) ёруғлик | | | | | | Лазер нурланиши | | |
|-----------------------|--------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------|------------------|--------------------------|------------------------------|------------------|
| E , лк | N_t , см ⁻³ | v_a , см/с | I_{ph} , А/см ² | S_{int} , А/лм | S_{int} , А/Вт | P , Вт/см ² | I_{ph} , А/см ² | S_{int} , А/Вт |
| | | | | | | $1.6 \cdot 10^{-7}$ | $8.58 \cdot 10^{-6}$ | 53.6 |
| 0.044 | 10^8 | $8 \cdot 10^3$ | $1.8 \cdot 10^{-6}$ | 0.41 | 45 | $6 \cdot 10^{-7}$ | $1.3 \cdot 10^{-5}$ | 21.7 |
| 1.1 | $1.2 \cdot 10^9$ | $1.4 \cdot 10^4$ | $4.7 \cdot 10^{-6}$ | 0.43 | 47 | $1.4 \cdot 10^{-6}$ | $2.68 \cdot 10^{-5}$ | 19.1 |
| 13.23 | $4 \cdot 10^9$ | $1.8 \cdot 10^4$ | $3.3 \cdot 10^{-4}$ | 0.25 | 27.47 | $2.59 \cdot 10^{-3}$ | $1.2 \cdot 10^{-4}$ | 0.047 |
| 83.8 | $6.8 \cdot 10^9$ | $1.9 \cdot 10^4$ | $6.3 \cdot 10^{-4}$ | 0.076 | 8.35 | $8.43 \cdot 10^{-3}$ | $2.82 \cdot 10^{-4}$ | 0.033 |
| 264.7 | $8 \cdot 10^9$ | $2 \cdot 10^4$ | $1.1 \cdot 10^{-3}$ | 0.0415 | 4.56 | $13.6 \cdot 10^{-3}$ | $4.78 \cdot 10^{-4}$ | 0.035 |
| E , лк | U, В | I_{ph} , А/см ² | | S_{int} , А/лм | S_{int} , А/Вт | P , Вт/см ² | I_{ph} , А/см ² | S_{int} , А/Вт |
| 0.044 | 6 | $1.32 \cdot 10^{-2}$ | | 700 | 14500 | $1.6 \cdot 10^{-7}$ | $1.08 \cdot 10^{-2}$ | 4125 |

Таҷрибалардан олинган натижалар шуни кўрсатадики, тадқиқ қилинаётган гетеротузилма кучланишнинг катта қийматларида, айниқса тўғри кучланишнинг $4 \text{ В} \div 6 \text{ В}$ қийматларида инжекцияли фотодиод каби ишлайди ва бунда бирламчи фототокнинг кучайиши иккита механизм – мусбат ўзаро боғлиқлик (МЎБ) ва параметрик кучайишлар (ПК) ҳисобига содир бўлади. Фототок белгисининг инверсиясидан кейин, силжиш кучланиши ортиши билан фототок ва, мос ҳолда S_{int} , кескин ошади, бунда ёритилганлик даражаси қанча катта бўлса, фототокнинг ошиши шунча кескин бўлади. Бунда ёритилганлик ВАХи $I \sim V^\alpha$ боғлиқлик билан ифодаланади, бу ерда $\alpha > 2$. ВАХнинг квадрат боғлиқлик қисмидан кейин фототокнинг кучланишга чизиқли боғлиқ ўсиш

қисми келади, у эса яна токнинг кучланишга квадрат боғлиқ бўлган қисми билан алмашинади. ВАХнинг бундай кетма-кетлиги, юқорида кўрсатилганидек, ҳар хил таркибли $n\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ қаттиқ қоришманинг мавжудлиги билан боғлиқ. Ҳар хил таркибга эга бўлган қаттиқ қоришмалар ҳар хил тақиқланган зона кенглигига ва солиштирма қаршиликларига эга бўлганлигидан, улар ток зичлигининг ҳар хил қийматларида гетеротузилмадаги токнинг катталигига ўзларига мос ҳиссаларини кўшишади. Ёритилганлик ВАХининг квадрат боғлиқлик қисмидан интеграл сезгирликнинг кучланишга ва ёритилганлик даражасига боғлиқлиги ҳисоблаб топилди. Олинган натижалар ёритилганликнинг ўзгармас қийматларида, кучланишнинг ортиши билан бирламчи фототок кучайишининг ўсишини кўрсатди. Бирламчи фототокнинг кучайишини ҳисоблаш йўли билан ҳам кўрсатилди. Фототокни ҳисоблаш ёритилганлик $E=0.044$ лк, кучланиш эса $V=6$ В бўлган ҳолат учун ҳисобланди. Бунда барча тушган квантлар ютилади ва номувозанат заряд ташувчиларни вужудга келтиради, улар эса йўқотишларсиз тўсиқларда ажралиб, фототокка ўз ҳиссасини кўшади деб фараз қилинди. Ҳисоблашларда сезгирликнинг спектрал диапазонида гетеротузилмада ютиладиган фотонларнинг ўртача энергияси олинди. Ҳисоблашлар шуни кўрсатдики, фототокнинг ҳисоблаб топилган қиймати $I_{\text{Ph}}=1.1 \cdot 10^{-6}$ А/см² экспериментал қийматидан $I_{\text{Ph.exp}}=1.32 \cdot 10^{-2}$ А/см² кескин фарқ қилади, бу эса бирламчи фототокнинг анчагина (10^4 марта) кучайишини тасдиқлайди.

$\text{In}-n^+-\text{CdS}-n-\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}-p-\text{Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}-\text{Mo}$ -гетеротузилма қувватлари мос ҳолда: 0.16 мкВт/см², 0.6 мкВт/см², 1.4 мкВт/см², 2.59 мВт/см², 8.43 мВт/см² ва 13.6 мВт/см², тўлқин узунлиги $\lambda=632$ нм бўлган лазер нури билан ёритилгандаги ВАХи тадқиқ қилинди. Бунда ёритилганлик ВАХ, оқ ёруғлик билан ёритилгандаги каби, иккита қисмдан иборат экани аниқланган. Лазер нури билан ёритилганда ВАХнинг биринчи қисмида фототок, оқ ёруғлик билан ёритилгандаги каби, иккинчи қисмига нисбатан манфий ишорага эга бўлади. Лазер нурланишининг барча қувватларида ёритилганлик ВАХлари субчизиқли қисмларга эга бўлади. Ушбу субчизиқли қисмлар учун интеграл фотосезгирлик ҳисоблаб топилган ва натижалар 1-жадвалга киритилган. Таққослаш учун, ёритилганлиги $E=1.1$ лк (ўтказилган даражалашга биноан $\sim 5.2 \cdot 10^{-6}$ Вт/см²) бўлган оқ нур билан ёритилганда интеграл сезгирлик $S_{\text{int}}=47$ А/Вт қийматга, қуввати $1.6 \cdot 10^{-7}$ Вт/см² бўлган лазер билан ёритилганда эса спектрал сезгирлик $S_{\lambda}=53.6$ А/Вт қийматга эга бўлади.

Юқорида келтирилганлардан шу нарса келиб чиқадики, бирламчи фототокнинг кучайишида асосий вазифани, таркиби $x<0.5$ бўлган катта қаршиликли $n\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ қаттиқ қоришма қатламларининг тақиқланган зона кенглиги ($E_g \approx 1.47$ эВ) дан катта бўлган $h\nu \approx 2$ эВ $> E_g$ энергияли фотонлар бажарар экан. Лазер нурининг барча қувватлари учун ВАХ субчизиқли қисмининг ҳосил бўлиш шarti $\alpha Jw \geq 2$, қаътий бажарилади. Масалан, лазер нурининг қуйида келтирилган қувватларида αJw қуйидагича қийматларга эга бўлади: $P=0.16$ мкВт/см² – 4.2; $P=0.6$ мкВт/см² – 4; $P=1.4$ мкВт/см² – 3.82; $P=2.59$ мВт/см² – 3.22; $P=8.43$ мВт/см² – 2.56 и $P=13.6$ мВт/см² – 2.67.

Лазер нурланишининг катта қувватларида ($P=2.59$ мВт/см², $P=8.43$ мВт/см², $P=13.6$ мВт/см²) гетеротузилманинг спектрал сезгирлиги идеал фо-

тоқабуллагичининг спектрал сезгирлигига яқин қийматга эга бўлади. Бу эса, оқ ёруғлик ёритилганлигининг юқори сатҳларидаги каби, ёпишиш сатҳлар токли модуляциясининг йўқлигини кўрсатади, чунки ёритилганликнинг юқори даражаларида ушбу сатҳлар бутунлай бўшаб қолган бўлади.

Диссертация ишимни бажаришда, эксперимент тадқиқотларимни ўтказишда ва уларни таҳлил қилишда кўрсатган ёрдамлари учун илмий раҳбарим, ф.-м.ф.д. профессор Ш.А. Мирсағатовга, ф.-м.ф.н., катта илмий ходим Р.Р. Қобуловга, ЎзР ФА ФТИ яримўтказгичлар бўлими илмий ходимларига ва «Фотоэлектроника» лабораториясининг, ҳамда Қорақалпоқ давлат университети «Яримўтказгичлар физикаси» кафедрасининг барча жамоасига ўз миннатдорчилигимни билдираман.

ХУЛОСА

Электромагнит нурланиш спектрининг кўзга кўринадиган соҳасида фотосезгирлиги бошқарилувчан $CdS_xTe_{1-x}-Zn_xCd_{1-x}Te$ қаттиқ қоришмалар асосида яратилган гетеротузилмалардаги фотосезгирлик ва ток ўтиш механизмларини аниқлаш бўйича олиб борилган тадқиқотлар асосида қуйидагича хулосаларга келинди:

1. Оптимал технологик режимларда ($T_{подл}=700^\circ C$, $v_{H_2}=1.5$ л/соат) ўстирилган $Zn_xCd_{1-x}Te$ қаттиқ қоришма юпқа қатламининг таркиби $x=0.35$ ва кристалл панжара доимийси 6.33 \AA бўлган куб тузилишига эга бўлиб, $hkl - (111)$ кристаллографик йўналишга эга эканлиги аниқланди.

2. $nCdS-pZn_{0.35}Cd_{0.65}Te$ -гетероўтишни ҳосил қилиш жараёнида қаттиқ қоришма $Zn_{0.35}Cd_{0.65}Te$ ва CdS қатламлари орасида кристалл панжара параметрларини мувофиқлаштирувчи катта қаршиликли ($\sim 10^9$ и $\sim 10^6$ Ом·см) CdS_xTe_{1-x} , $Zn_xCd_{1-x}Te_yS_{1-y}$ қаттиқ қоришмалар қатламларининг ҳосил бўлиши илк бор аниқланди.

3. $n(i)-p$ -гетероўтишнинг ажралиш чегарасида сирт ҳолат зичликларининг қиймати аккумуляция режимидаги каби, камбағаллашиш ва бойиш режимларида ($\psi_s = -0.18$ эВ гача) ҳам кичик эканлиги ва $\sim 3.5 \cdot 10^{10} \text{ эВ}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ дан ошмаслиги аниқланди, бу эса тузилмани ташкил этувчи қатламлар кристалл панжараларининг яхши мослашганлигидан далолат беради.

4. $In-n^+-CdS-n-CdS_xTe_{1-x}-p-Zn_{0.35}Cd_{0.65}Te-Mo$ -гетеротузилма вольтампер характеристикасининг тўғри йўналишида, юқори даражали инжекция шароитида ток ўтиш механизми биполяр дрейф ҳисобига амалга ошириладиган бир нечта соҳалардан иборат эканлиги кўрсатилди.

5. $203 \div 373 \text{ K}$ оралиғида $In-n^+-CdS-n-CdS_xTe_{1-x}-p-Zn_{0.35}Cd_{0.65}Te-Mo$ -гетеротузилма ҳароратининг ўзгариши базанинг кўп қатламлилиги, силжитиш кучланишининг гетероўтишда ва база соҳасида тақсимланиши, токнинг дрейфли ва диффузияли ташкил этувчилари компенсация даражасининг ўзгариши, ҳамда рекомбинация жараёнларида оддий маҳаллий марказларнинг ва мураккаб комплексларнинг қатнашиш улуши билан тушунтириладиган ток ўтиш механизмларининг ўзгаришига олиб келиши кўрсатилди.

6. In- n^+ -CdS- n -CdS_xTe_{1-x}- p -Zn_{0.35}Cd_{0.65}Te-Mo-гетеротузилма асосида яратилган инжекцияли фотодиод кенг ($\lambda=0.49\div 0.855$ мкм) спектрал ораликда фотосезгирликка эга экани, ҳамда 300 К да тўғри йўналишидаги кучланишнинг нисбатан катта қийматларида (6 В) ва оқ ёруғликнинг кичик ($E=0.044$ лк) қийматларида юқори интеграл сезгирлик $S_{int}\approx 700$ А/лм (14500 А/Вт) га эга экани аниқланди.

7. Бирламчи фототокнинг In- n^+ -CdS- n -CdS_xTe_{1-x}- p -Zn_{0.35}Cd_{0.65}Te-Mo-гетеротузилмада кучайиши иккита механизм: мусбат ўзаро боғлиқлик (кичик силжиш кучланиш, $\alpha>2$) ва параметрик кучайиш (катта силжиш кучланиш) ҳисобига бўлиши экспериментал тарзда кўрсатилди.

8. nCdS- p Zn_xCd_{1-x}Te-гетероўтишини яратишда олинган илмий-техникавий натижалар оптоэлектрон қурилмаларда ишлатиладиган электромагнит нурланишининг кўзга кўринувчи соҳасида ички кучайтириш хусусиятига эга бўлган инжекцияли фотодиодларни тайёрлашда қўлланиши учун тавсия этилиши мумкин.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.30.05.2018.FM/Т.34.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ**

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

АТАБОЕВ ОМОНБОЙ КУРБАНБОЕВИЧ

**ИНЖЕКЦИОННЫЕ ФОТОДИОДЫ НА ОСНОВЕ ТВЕРДЫХ
РАСТВОРОВ $CdS_xTe_{1-x} - Zn_xCd_{1-x}Te$ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
СОЕДИНЕНИЙ A^2B^6**

01.04.10 – Физика полупроводников

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

Ташкент – 2018

Тема диссертации доктора философии (Doctor of Philosophy) зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за №В2017.2.PhD/FM79.

Диссертация выполнена в Физико-техническом институте.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекском, русском, английском (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (www.fti.uz) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziyo.net).

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

Официальные оппоненты: **Утамурадова Шарифа Бекмурадовна**
доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник

Мавлонов Гиёсиддин Хайдарович
доктор физико-математических наук, доцент

Ведущая организация: **Ташкентский университет информационных технологий**

Защита диссертации состоится «__» _____ 2019 года в ____ часов на заседании Научного совета DSc.30.05.2018.FM/T.34.01 при Физико-техническом институте. Адрес: 100084, г.Ташкент, ул. Чингиз Айтматов, дом 2Б. Административное здание Физико-технического института, зал конференций. Тел./Факс: (99871) 235-42-91; e-mail: ftikans@uzsci.net.

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

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2018 г.

(реестр протокола рассылки № _____ от «__» _____ 2018 г.)

Н.Р. Авезова

Председатель Научного совета по присуждению ученых степеней, д.т.н., с.н.с.

О.А. Абдулхаев

Ученый секретарь Научного совета по присуждению ученых степеней, доктора философии по ф.-м.н.

А. Абдурахманов

Председатель Научного семинара при Научном совете по присуждению ученых степеней, д.т.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время в мировой практике в бурно развивающейся области физики полупроводников одним из актуальных задач, является создание фотодиодов на основе соединений A^2B^6 и их твердых растворов с внутренним усилением, чувствительных в видимой области ($\lambda=0.45\div 0.7$ мкм) спектра электромагнитного излучения, а также исследование их механизмов токопереноса и фоточувствительности. В этом аспекте достижение высоких значений фоточувствительности фотодиодных структур в заданной области спектра электромагнитного излучения за счет подбора состава твердого раствора $Zn_xCd_{1-x}Te$, является одним из основных задач, обеспечивающих максимальное значение фототока.

На сегодняшний день в мире уделяется большое внимание проблемам управления спектральным диапазоном фоточувствительности фотодиодных структур за счет применения при их изготовлении полупроводниковых материалов с управляемой шириной запрещенной зоны, а также разработке фотодиодов с эффектом усиления первичного фототока на основе соединений A^2B^6 и их твердых растворов. В этом аспекте, одним из важных задач, является проведение целевых научных исследований в следующих направлениях: оптимизация технологического режима получения крупноблочных поликристаллических пленок твердого раствора $Zn_xCd_{1-x}Te$ для создания инжекционных фотодиодов; создание гетероперехода в системе $nCdS-pZn_{0.35}Cd_{0.65}Te$ с промежуточным буферным слоем, позволяющим устранить несоответствия параметров кристаллических решеток слоев, составляющих гетеропереход; определение фоточувствительности и механизмов токопереноса в экспериментально полученных гетеропереходных структурах с длинной базой; выяснение закономерностей формирования спектральных характеристик при различных режимах включения гетероструктуры; установление взаимосвязи физических процессов, происходящих в гетеропереходных $nCdS-pZn_{0.35}Cd_{0.65}Te$ -структурах с параметрами базовой области и температурными режимами токовых характеристик.

В Республике уделяется большое внимание перспективным фундаментальным и прикладным научным исследованиям, в частности ведутся изыскания по созданию фотодиодных структур нового поколения с расширенным спектральным диапазоном и малыми темновыми токами, а также развитию технологии получения новых структур инжекционных фотодиодов на основе полупроводниковых соединений A^2B^6 , A^3B^5 и их твердых растворов. В соответствии со Стратегией действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан, особое внимание уделяется вопросам «стимулирования научно-исследовательской и инновационной деятельности, созданию эффективных механизмов прикладного применения достижений научно-инновационной деятельности»¹. При этом основное внимание уделяется вопросам разработки

¹Указ Президента Республики Узбекистан № УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017-2021 годы» от 07 февраля 2017 г.

импортозамещающих полупроводниковых материалов и структур различного назначения. В этом особо следует отметить, что данная деятельность осуществляется в рамках поддержки активного предпринимательства, инновационных идей и технологий, нацеленного на получение научных результатов, отвечающих современным требованиям научного развития. В этом аспекте является востребованным исследование фотоэлектрических процессов, происходящих в полупроводниковых структурах, созданных на основе CdS и его твердых растворов, в частности на основе $Zn_{0.35}Cd_{0.65}Te$, определяющих их функциональных характеристик. Это в свою очередь позволит раскрыть новые возможности и области применения фоточувствительных структур, полученных на их основе.

Данное диссертационное исследование в определённой степени соответствует задачам, обозначенным в постановлениях Президента Республики Узбекистан ПП–2772 «О мерах по дальнейшему совершенствованию управления, ускоренному развитию и диверсификации электротехнической промышленности на 2017–2021 гг.» от 13 февраля 2017 года, ПП-2789 «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности» от 17 февраля 2017 года и ПП-3855 «О дополнительных мерах по повышению эффективности коммерциализации результатов научной и научно-технической деятельности» от 14 июля 2018 года, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики. Данная исследовательская работа 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. Впервые инжекционные фотодиоды были созданы известными русскими физиками В.И. Стафеевым, И.М. Викулиным, Ш.Д. Курмашевым и их учениками. Ими на основе узкозонных и широкозонных полупроводников были созданы фотодиоды со структурами $p-n-$, p^+-i-n^- или $p-i-n-$, в которых базовая область была высокоомной и имела толщину намного больше чем диффузионная длина неравновесных носителей тока. При изготовлении таких фотодиодов были использованы полупроводниковые материалы Ge, GaAs и GaP и они могли эффективно работают только при азотных температурах.

В работах академика М.К. Бахадирханова изучена фоточувствительность кремния с нанокластерами марганца, в котором в примесной области спектра наблюдается высокая фоточувствительность. Также, академиком А.Т. Мамадалимовым и его учениками экспериментально показано, что диодные структуры на основе кремния с примесями Zn и V с глубокими уровнями, обладают S-образной характеристикой, представляя собой инжекционные кремниевые фотоприемники с регулируемым током чувствительности в области спектра $\lambda \leq 3,5$ мкм, способных работать при комнатной

температуре (300 К). Под руководством профессора А.В. Каримова ведутся исследования над инжекционными фотоприемниками на основе кремния и арсенида галлия.

Исследования по созданию инжекционных фотодиодов на основе полупроводниковых соединений A^2B^6 и их твердых растворов, а также исследованию их физических свойств, были начаты под руководством профессора Ш.А. Мирсагатова в Физико-техническом институте Академии Наук Республики Узбекистан. Например, Ш.А.Мирсагатовым и Р.Р. Кобуловым были созданы и исследованы инжекционные фотодиоды на основе гетероструктуры $nCdS-pCdTe$, Ш.А. Мирсагатовым и И.Б.Сапаевым были созданы и исследованы инжекционные фотодиоды на основе гетероструктуры $n^+CdS-nCdS-pSi$, Ш.А.Мирсагатовым и А.К.Утениязовым были созданы и исследованы инжекционные фотодиоды с МОП-структурой на основе $Al-Al_2O_3-p-CdTe-MoO_3-Mo$ и т.д.

Однако, к настоящему времени остаются неизученными механизмы токопереноса и фоточувствительности гетероструктур в системе $n-CdS-p-Zn_xCd_{1-x}Te$ с управляемым спектром фоточувствительности в видимой области спектра электромагнитного излучения.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в рамках планов научных проектов по прикладным и фундаментальным исследованиям Физико-технического института по темам: АЗ-ФА-0-11242 «Разработка мобильного спектроанализатора для экспрессной оценки элементного состава металлических сплавов на производстве» 2012-2014 гг.; ФЗ-ФА-0-56434 «Физические закономерности формирования тонкопленочных структур и структур с нано включениями для солнечных элементов и полупроводниковых приборов» 2012-2016 гг. и хозяйственного договора №1/05-12, от 04.05.2012г. «Разработка мобильного спектроанализатора для определения химического состава металлических сплавов с применением компьютерной технологии» 2012-2015 гг.

Целью исследования является установление механизмов токопереноса и фоточувствительности гетероструктур, созданных на основе твердых растворов $CdS_xTe_{1-x}-Zn_xCd_{1-x}Te$ с управляемым спектром фоточувствительности в видимой области спектра электромагнитного излучения.

Задачи исследования:

оптимизация технологического режима получения крупноблочных поликристаллических пленок твердого раствора $Zn_xCd_{1-x}Te$ для создания инжекционных фотодиодов;

создание гетероперехода в системе $nCdS-pZn_{0.35}Cd_{0.65}Te$ с промежуточным буферным слоем, позволяющим устранить несоответствия параметров кристаллических решеток слоев, составляющих гетеропереход;

определение фоточувствительности и механизмов токопереноса в экспериментально полученных гетеропереходных структурах с длинной базой;

выяснение закономерностей формирования спектральных характеристик при различных режимах включения гетероструктуры;

установление взаимосвязи физических процессов, происходящих в гетеропереходных $n\text{CdS}-p\text{Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}$ -структурах с параметрами базовой области и температурными режимами токовых характеристик.

Объектом исследования является инжекционный фотодиод на основе гетероперехода $n\text{CdS}-p\text{Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}$.

Предметом исследования являются механизмы токопереноса и фоточувствительности гетероструктуры $\text{In}-n^+-\text{CdS}-n-\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}-p-\text{Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}-\text{Mo}$.

Методы исследований. Для решения поставленных задач были применены следующие методы исследования: сканирующая электронная микроскопия, дифракция рентгеновского излучения, энерго-дисперсионная рентгеновская спектроскопия, спектральная фоточувствительность, вольт-фарадные характеристики, а также современные методы анализа механизмов переноса тока в полупроводниковых структурах.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

оптимизирован технологический режим изготовления гетероперехода $n\text{CdS}-p\text{Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}$, путем напыления слоя сульфида кадмия, в вакууме, при температуре подложки 250°C , на поверхность пленки твердого раствора $\text{Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}$, позволивший устранить несоответствия параметров кристаллических решеток образованием переходного слоя из $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ и $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}_y\text{S}_{1-y}$ слоев на границе гетероперехода, и на их основе получены фотодиодные структуры, отличающиеся высокой фоточувствительностью в видимой области спектра электромагнитного излучения;

экспериментально выявлено свойство регистрации оптических сигналов гетеропереходной $n\text{CdS}-p\text{Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}$ -структуры без снижения фоточувствительности в спектральном диапазоне от 0.49 до 0.735 мкм и на её основе для спектроанализатора, определяющего химический состав металлических сплавов по эмиссионным спектрам излучения атомов вещества, разработано регистрирующее устройство – фотодиод, которая обладает высокой фоточувствительностью в режиме прямого тока, благодаря низкой плотности поверхностного состояния ($\sim 3.5 \cdot 10^{10} \text{ эВ}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$);

установлено, что рекомбинационные процессы, как в темноте, так и при освещении белым светом и светом монохроматического лазерного излучения, в гетероструктуре $\text{In}-n^+-\text{CdS}-n-\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}-p-\text{Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}-\text{Mo}$, при малых плотностях тока, происходят с участием простых локальных центров, а при больших плотностях тока в рекомбинационных процессах участвуют сложные комплексы, внутри которых происходит электронный обмен, в результате чего инерционность рекомбинационного процесса повышается;

экспериментально показано, что в фоточувствительной $\text{In}-n^+-\text{CdS}-n-\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}-p-\text{Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}-\text{Mo}$ -гетероструктуре в режиме прямого тока реализуются условия длинного диода в интервале температур $203 \div 373 \text{ K}$, с биполярным дрейфовым механизмом переноса тока;

выявлено, что при малых напряжениях смещения в гетероструктуре $\text{In}-n^+-\text{CdS}-n-\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}-p-\text{Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}-\text{Mo}$ происходит инверсия знака фототока

в коротковолновой $0.49 \div 0.53$ мкм и длинноволновой $0.71 \div 0.85$ мкм областях фоточувствительности, объясняющаяся компенсацией встречных диффузионных и дрейфовых потоков неравновесных носителей заряда.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

Были созданы фотодиоды на основе гетероструктуры $\text{In-}n^+\text{-CdS-}n\text{-CdS}_x\text{Te}_{1-x}\text{-}p\text{-Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te-Mo}$ с фоточувствительностью в видимой области спектра ($\lambda=0.490 \div 0.735$ мкм) для спектроанализатора определяющего химический состав металлических сплавов по эмиссионным спектрам излучения атомов вещества.

Достоверность результатов исследований подтверждается применением современных научных методов исследований, стандартных технологических установок, высокоточных измерительных приборов и оборудований для измерения электрофизических параметров образцов, совпадением полученных экспериментальных результатов с теоретическими расчетами и существующими физическими представлениями.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость исследований заключается в том, что они способствуют расширению представлений о физических процессах, в частности механизмов тока переноса и формирования спектра фоточувствительности в гетероструктурах на основе твердых растворов соединений A^2B^6 .

Практическая ценность исследований состоит в том, что полученные результаты при создании гетероперехода $n\text{CdS-}p\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$ могут быть полезными при изготовлении инжекционных фотодиодов с внутренним усилением чувствительных в видимой области спектра электромагнитного излучения.

Внедрение результатов исследования. На основе полученных результатов по установлению механизмов токопереноса и фоточувствительности гетероструктур, созданных на основе твердых растворов $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}\text{-Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$ с управляемым спектром фоточувствительности в видимой области спектра электромагнитного излучения:

полученные результаты по исследованию рекомбинационных процессов, происходящих в полупроводниках в темноте и при освещении его интегральным и монохроматическим лазерным излучениями были использованы в фундаментальном проекте Ф-2-37 «Особенности лазерно-индуцированных нелинейных процессов дефектообразования в полупроводниках», при контроле и управлении интенсивностью лазерного излучения (Справка № 89-03-1926 от 19 мая 2018 г. Министерства высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан). Использование научных результатов дало возможность проведения неразрушающего экспресс анализа дефектной структуры полупроводника, подвергнутого воздействию лазерного излучения;

разработанный спектроанализатор экспрессного эмиссионного метода определения химического состава металлических сплавов использован в акционерном обществе «Ташкентский Механический завод» акционерного общества «Узбекистон темир йуллари», для определения состава произво-

димых конструкций (Справка № НГ/2653-18 от 2018 года 28 мая Акционерного общества «Узбекистон темир йўллари»). Использование научных результатов позволило сократить время определения состава химических элементов (Cu, Fe, Si, In, Mo, Ni, W, Te, Ag, Au, C, Al, Zn, Ti, Cr, Mn) в металлических сплавах на один порядок по сравнению с известным абсорбционным методом.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на 6 международных и 1 республиканских научно-практических конференциях.

Публикации результатов исследований. Основные результаты по теме диссертации опубликовано в 15 научных трудах, из них 8 статей в научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных работ, в том числе 4 статей в зарубежных международных реферируемых журналах.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Текст диссертации состоит из 120 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность и востребованность темы диссертации, определена связь исследований с приоритетными направлениями развития науки и технологий республики, раскрыта степень изученности проблемы, сформулированы цели и задачи, приведены объекты, предметы и методы исследования, изложена научная новизна и практическая значимость исследования, приведены краткие сведения о внедрении результатов, апробации и публикации работы, а также об объеме и структуре диссертации.

В первой главе «**Тенденции развития инжекционных фотодиодов**» рассмотрены различные инжекционные фотодиоды, созданные на основе узкозонных и широкозонных полупроводниковых материалов, приведенные в специальной литературе. Проанализированы основные параметры как, электрические, фотоэлектрические и спектральные характеристики инжекционных фотодиодов. Изучены механизмы инжекционного усиления в инжекционных фотодиодах. На основе анализа имеющихся экспериментальных и теоретических данных сформулирована постановка задачи исследований.

Вторая глава «**Методы исследований и технология получения полупроводниковой гетероструктуры n^+ -CdS- n -CdS_xTe_{1-x}- p -Zn_xCd_{1-x}Te**» посвящена технологиям получения пленок твердого раствора Zn_xCd_{1-x}Te и слоя CdS. Изучена микроструктура поверхности пленок Zn_xCd_{1-x}Te с помощью электронного сканирующего микроскопа. Приведены текстура поверхности и фазовый состав пленки Zn_xCd_{1-x}Te, полученные методом рентгеноструктурного анализа, а также результаты исследований химического элементного состава по поверхности пленки Zn_xCd_{1-x}Te и распределения элементов по глубине гетероперехода n^+ -CdS- p -Zn_xCd_{1-x}Te, проведенных с помощью

энерго-дисперсионного рентгеновского анализатора (марки «EDX-energy dispersive X-ray analysis» (Oxford Instrument – Aztec Energy Advanced X-act SDD)).

Экспериментально установлено, что определяющим фактором, влияющим на скорость роста пленок $Zn_xCd_{1-x}Te$, получаемых газотранспортным методом в потоке водорода из двух источников испарения $ZnTe$ и $CdTe$, являются температура подложки и скорость потока газа-носителя (водорода). Из зависимостей скорости роста пленки от температуры подложки и от скорости потока газа-носителя, определены оптимальные режимы технологического процесса выращивания пленок твердых растворов $Zn_xCd_{1-x}Te$ и они имеют следующих значений: температура подложки $700^{\circ}C$ и скорость потока газа-носителя 1.5 литр/час. При оптимальных технологических режимах формируется пленка со скоростью 80-90 мкм/час, имеющая плотноупакованные кристаллиты с размерами зерен 40-70 мкм (рис. 1, в). Это подтверждается результатами исследований микроструктуры поверхности пленок $Zn_xCd_{1-x}Te$, полученных при различных температурах подложки, проведенных с помощью электронного сканирующего микроскопа (ESM- EVO MA 10 - CARL ZEISS), изображение которых представлены на рис. 1. Удельное сопротивление пленок $Zn_xCd_{1-x}Te$, полученных при оптимальных технологических режимах, при комнатной температуре составляет $\sim 10^4$ Ом·см.

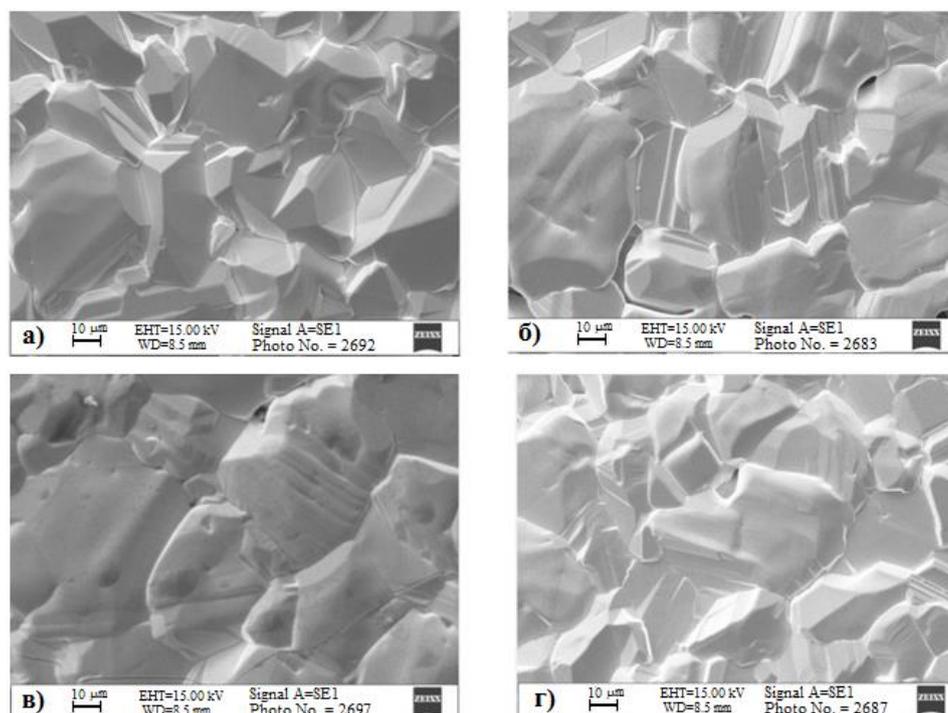


Рис. 1. Микроструктура поверхности пленок $Zn_xCd_{1-x}Te$ синтезированных при различных температурах подложки: а) $640^{\circ}C$, б) $660^{\circ}C$, в) $700^{\circ}C$ и г) $740^{\circ}C$

Рентгеноструктурные исследования текстуры и фазового состава пленок $Zn_xCd_{1-x}Te$, полученных при температуре подложки $700^{\circ}C$ были проведены на дифрактометре ДРОН-УМ-1 (CuK_{α} -излучение, $\lambda=0.15418$ нм, Ni – фильтр, скорость 2 град/мин). По результатам рентгеноструктурных исследований

поверхности пленок $Zn_xCd_{1-x}Te$ установлено, что самая сильная интенсивность (~85-90%) наблюдается при углах отражения $2\Theta=24.4$ град, с ориентацией вдоль кристаллографической плоскости $hkl - (111)$. Интенсивные пики на дифрактограмме соответствуют кристаллической решетке полупроводниковой фазы пленки $ZnTe$ с кубической сингонией, но сдвинутой в малоугловую область отражений. Из анализа экспериментальных результатов следует, что при получении пленок $Zn_xCd_{1-x}Te$ образуется твердый раствор на базе полупроводниковой кристаллической фазы $ZnTe$ с кубической структурой с увеличенным параметром кристаллической решетки, за счет внедрения $CdTe$ в решетку $ZnTe$. Так как, параметр решетки пленки $ZnTe$ с кубической структурой равен $a_0=6.083 \text{ \AA}$, а параметр решетки пленки твердого раствора $Zn_xCd_{1-x}Te$ составляет $a_0=6.331 \text{ \AA}$, следовательно, параметр решетки увеличился на величину 0.248 \AA .

С помощью энерго-дисперсионного рентгеновского анализатора EDX-energy dispersive X-ray analysis (Oxford Instrument – Aztec Energy Advanced X-act SDD) определено атомарное содержание Zn , Cd , Te в составе пленки TP $Zn_xCd_{1-x}Te$, и на основе этого распределения рассчитана величина x , которая равна 0.35 ($Zn_{0.35}Cd_{0.65}Te$).

Для создания гетеро p-n-перехода $CdS-Zn_{0.35}Cd_{0.65}Te$, на поверхность пленки TP $Zn_{0.35}Cd_{0.65}Te$, с удельным сопротивлением $\sim 10^4 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, осаждались слои CdS , методом вакуумного испарения в квазизамкнутом объеме, при вакууме 10^{-5} Торр и температуре подложки $250-300^\circ\text{C}$. При этом установлено, что между слоями CdS и TP $Zn_{0.35}Cd_{0.65}Te$ образуются слои TP CdS_xTe_{1-x} и $Zn_xCd_{1-x}Te_yS_{1-y}$, общая толщина которых составляет $\sim 3 \text{ мкм}$.

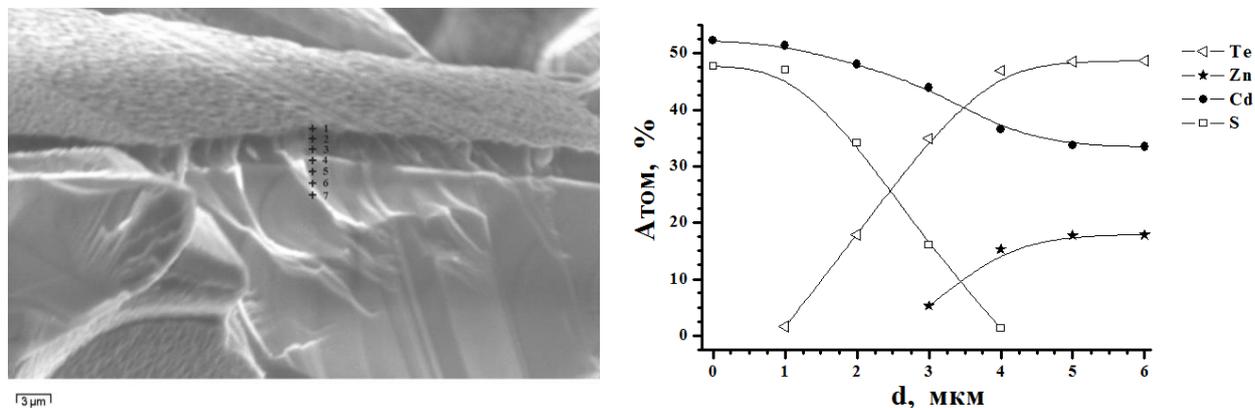


Рис. 2. Увеличенный снимок торца nCdS-pZn_{0.35}Cd_{0.65}Te-гетероперехода и профиль распределения атомов Cd, Zn, Te, S по глубине гетероструктуры CdS-CdS_xTe_{1-x}-Zn_xCd_{1-x}Te_yS_{1-y}-Zn_{0.35}Cd_{0.65}Te

Для определения элементного состава промежуточного переходного слоя проведены энерго-дисперсионные рентгеновские исследования торца гетероперехода $nCdS-pZn_{0.35}Cd_{0.65}Te$, на свежем сколе, с помощью энерго-дисперсионного рентгеновского анализатора EDX-energy dispersive X-ray analysis (Oxford Instrument – Aztec Energy Advanced X-act SDD).

На рис. 2 представлены изображение торца гетероструктуры и рассчитанный профиль распределения атомов Zn, Cd, Te, S. Анализ химического состава производился в 7 точках с расстоянием между ними 1 мкм.

Из профиля распределения атомов следует, что на границе раздела $n\text{CdS}-p\text{Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}$ гетероперехода образуются твердые растворы $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ и $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}_y\text{S}_{1-y}$, толщины которых составляют ~ 2 мкм и ~ 1 мкм, соответственно. Благодаря образованию слоя $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ между слоем CdS и твердым раствором $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$ несоответствие параметров их кристаллических решеток уменьшается от величины 8% до величины 2.3%. Это считается достаточным для формирования гетероперехода с низкой плотностью поверхностных состояний на границе раздела. Твердый раствор $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$, сформированный на границе $n\text{CdS}-p\text{Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}$ -гетероперехода является сильнокомпенсированным высокоомным слоем, играющим роль базы в данной гетероструктуре.

Со стороны слоя CdS формировались «Ш»-образные токосъемные контакты путем напыления индия (In) в вакууме $\sim 10^{-5}$ Торр, при температуре подложки 250°C .

Гетероструктуру $\text{In}-n^+-\text{CdS}-n-\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}-p-\text{Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}-\text{Mo}$ можно рассматривать, как структуру полупроводник–диэлектрик–полупроводник (ПДП), где слой CdS играет роль сильнолегированного n^+ -слоя, сильнокомпенсированный высокоомный твердый раствор $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ – роль диэлектрического n -слоя, а твердый раствор $\text{Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}$ – роль p -слоя. Такую структуру условно можно записать в виде $n^+-n(i)-p$.

В третьей главе «**Электрофизические характеристики инжекционного фотодиода на основе гетероструктуры $\text{In}-n^+-\text{CdS}-n-\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}-p-\text{Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}-\text{Mo}$** », исследованы вольт-фарадные и вольт-амперные характеристики инжекционных фотодиодов, созданных на основе гетероструктур $\text{In}-n^+-\text{CdS}-n-\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}-p-\text{Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}-\text{Mo}$. Из анализа экспериментальных характеристик были определены основные электрофизические параметры, такие как, плотность поверхностных состояний, поверхностный потенциал и закономерности протекания тока в широком интервале напряжений.

На рис. 3 представлены экспериментальная (кривая 1) и расчетная (кривая 2) $C(V)$ -характеристики, на частоте 15 кГц. При построении расчетной $C(V)$ -характеристики были использованы величины емкости диэлектрического слоя $C_i=(1.350\pm 0,005)\cdot 10^{-9}$ Ф и концентрация равновесных дырок $p_0\approx(2.50\pm 0,01)\cdot 10^{14}$ см⁻³, определенные из экспериментальной $C(V)$ -характеристики. Из рис. 3 видно, что экспериментальная $C(V)$ -характеристика (1) смещена в левую сторону, относительно расчетной (2). Эти результаты показывают, что слой твердого раствора $\text{Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}$ имеет проводимость p -типа и наличие поверхностных состояний на границе раздела.

Из зависимости поверхностного потенциала от приложенного напряжения, представленной на рис. 4 следует, что на границе раздела в условиях термодинамического равновесия (в отсутствии напряжения смещения) происходит изгиб краев разрешенных зон на границе разделения, о чем свидетельствует поверхностный потенциал, равный $\psi_s\approx 0.180\pm 0,001$ эВ. Это означа-

ет, что поверхностные состояния имеют акцепторный характер и они захватывая равновесных дырок, приводят к изгибу краев разрешенных зон вниз.

На рис. 5 представлена зависимость плотности поверхностных состояний (D_{it}) от поверхностного потенциала (ψ_s). Из $D_{it}(\psi_s)$ -зависимости видно, что на границе раздела при $\psi_s=0$, D_{it} имеет значение $(3,00\pm 0,01)\cdot 10^{11}$ эВ $^{-1}\cdot$ см $^{-2}$. Зависимость $D_{it}(\psi_s)$ в нижней и в верхней половине запрещенной зоны полупроводника подчиняется разным закономерностям. Например, значение D_{it} в нижней половине запрещенной зоны имеет низкие значения, чем в верхней половине запрещенной зоны. В верхней половине запрещенной зоны его значение увеличивается с увеличением поверхностного потенциала от значения $1.6\cdot 10^{11}$ до $7.3\cdot 10^{12}$ эВ $^{-1}\cdot$ см $^{-2}$.

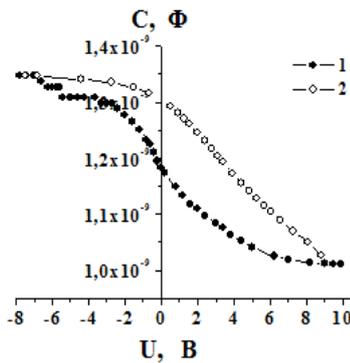


Рис. 3. Экспериментальная (1) и расчетная (2) $C(V)$ -характеристики

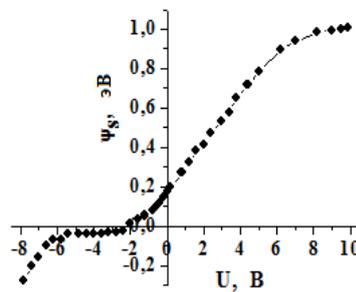


Рис. 4. Зависимость поверхностного потенциала от приложенного напряжения

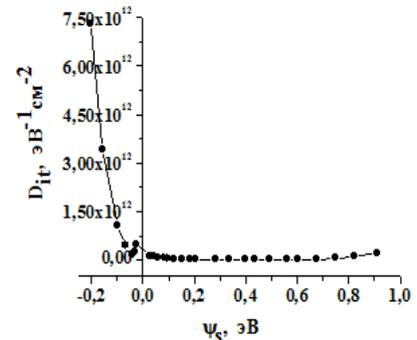


Рис. 5. Зависимость плотности поверхностных состояний от поверхностного потенциала

В приведенном выше методе поверхностные состояния определены без учета реактивного сопротивления диэлектрического слоя. На рис. 6 представлена зависимость активной составляющей входной комплексной проводимости G_p от напряжения смещения на частоте 15 кГц. Зависимость $G_p/\omega(U)$ проходит через максимум при $\omega=\tau^{-1}$, что позволяет непосредственно определить время перезарядки поверхностных ловушек τ и емкость поверхностных состояний $C_s/2$. Зная емкость поверхностных состояний, можно вычислить плотность поверхностных состояний, которая при напряжении -8.2 В имеет значение $2.25\cdot 10^{10}$ эВ $^{-1}\cdot$ см $^{-2}$ (рис. 6).

При учете реактивного сопротивления диэлектрического слоя, зависимость плотности поверхностных состояний от поверхностного потенциала исследуемой ПДП-структуры имеет другой вид. Например, зависимость $D_{it}(\psi_s)$, определенная по сдвигу экспериментальной емкости, вычисленной из реактивной составляющей входной комплексной проводимости (рис. 7, кр. 1) от теоретической $C(V)$ -характеристики (рис. 7, кр. 2), имеет вид, приведенный на рис. 8. Из данной зависимости видно, что плотность поверхностных состояний в середине запрещенной зоны, в режимах аккумуляции, обеднения и обогащения (до $\psi_s=-0.2$ эВ) имеет достаточно низкое значение, которое не превышает $\sim 3.5\cdot 10^{10}$ эВ $^{-1}\cdot$ см $^{-2}$. Такая же величина плотности поверхностных состояний получена и с помощью метода проводимости.

Эти экспериментальные результаты показывают, что емкость диэлектрика по величине меньше даже, чем емкость поверхностных состояний, поэтому без учета реактивного сопротивления C_i величина N_{ss} получается сравнительно высокой.

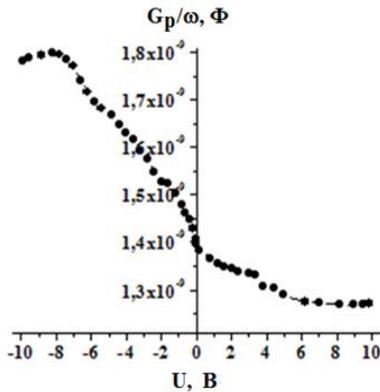


Рис. 6. Зависимость величины G_p/ω от напряжения смещения, на частоте $f=15$ кГц

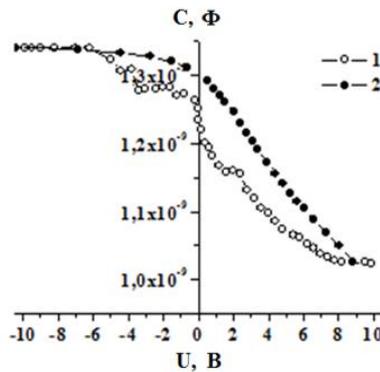


Рис. 7. Экспериментальная (кр. 1) и теоретическая (кр. 2) $C(V)$ на частоте $f=15$ кГц

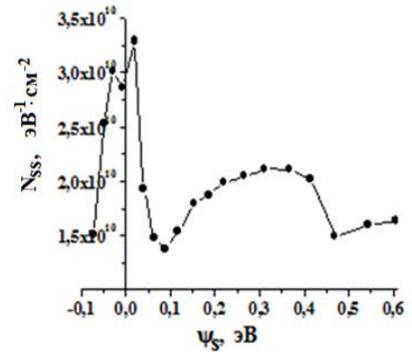


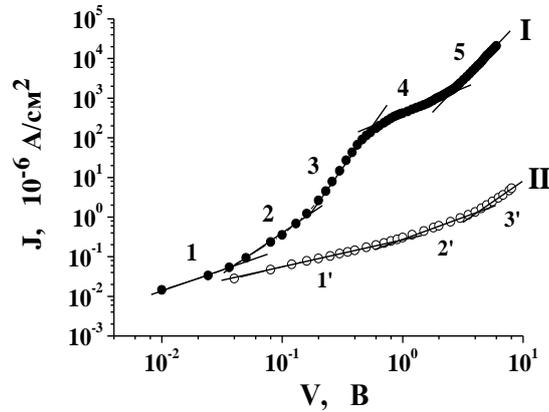
Рис. 8. Зависимость плотности поверхностных состояний от поверхностного потенциала

Сложный ход зависимости $N_{ss}(\psi_s)$, представленный на рис. 8, объясняется неоднородностью распределения поверхностных зарядов. Приведенные выше экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что твердый раствор CdS_xTe_{1-x} , сформированный между слоем CdS и твердым раствором $Zn_{0,35}Cd_{0,65}Te$, является сильнокомпенсированным, и в нем локальные заряженные центры распределены неоднородно, что находит свое отражение на распределении плотности поверхностных состояний от поверхностного потенциала (рис. 8).

В этой главе, также приведены результаты исследований вольтамперных характеристик (ВАХ) гетероструктуры $In-n^+-CdS-n-CdS_xTe_{1-x}-p-Zn_{0,35}Cd_{0,65}Te-Mo$, в прямом и обратном направлениях смещения, при различных температурах. Анализ ВАХ показывает, что гетероструктура $In-n^+-CdS-n-CdS_xTe_{1-x}-p-Zn_{0,35}Cd_{0,65}Te-Mo$ имеет выпрямляющие свойства. Коэффициент выпрямления K , определяемый как отношение прямого и обратного токов $K=J_{forw}/J_{rev}$, при фиксированном значении напряжения (6 В) составляет четыре порядка, при комнатной температуре (рис. 9). При этом показано, что исследуемая $p-i-n$ -структура в температурном интервале $203 \div 373$ К эффективно работает как диод. Например, коэффициент выпрямления ($K=J_{forw}/J_{rev}$) тока при фиксированном напряжении ($V=6$ В) и при $T=203$ К, имеет значение $K=3,9 \cdot 10^3$, самое высокое значение $K=1,4 \cdot 10^4$ приобретает при $T=283$ К, а самое низкое значение $K=300$, при $T=373$ К.

Прямая ветвь ВАХ $In-n^+-CdS-n-CdS_xTe_{1-x}-p-Zn_{0,35}Cd_{0,65}Te-Mo$ -гетероструктуры при комнатной температуре ($T=293$ К) состоит из нескольких участков, в которых перенос тока при высоком уровне инжекции осуществляется биполярным дрейфовым механизмом, и она как функция напряжения описывается зависимостью $J \sim V^\alpha$, где показатель степени α может принимать разные значения. При этом экспериментально установлено, что изменение

закономерности ВАХ с изменением плотности тока обусловлено изменением процессов рекомбинации.



I – прямая ветвь, II – обратная ветвь

Рис. 9. Вольт-амперная характеристика гетероструктуры $\text{In-}n^+\text{-CdS-}n\text{-CdS}_x\text{Te}_{1-x}\text{-}p\text{-Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te-Mo}$ в двойном логарифмическом масштабе в темноте ($T=293\text{ K}$)

Рекомбинация неравновесных носителей при малых плотностях тока происходит через точечные локальные центры (дефекты), а при больших плотностях тока за рекомбинационные процессы ответственны сложные комплексы, внутри которых происходит электронный обмен. Повторение цикла последовательности закономерности ВАХ связано с многослойностью базы исследуемой структуры, которые отличаются не только удельными сопротивлениями, а также отличаются составами твердого раствора, следовательно, и ширинами запрещенных зон.

Установлено, что изменение температуры, в диапазоне $203\div 373\text{ K}$, приводит к изменению последовательности, а также числа участков ВАХ. Например, при разных температурах наблюдаются следующие последовательности на прямой ветви ВАХ: 1 – $J\sim V$, 2 – $J\sim V^{8.7}$, 3 – $J\sim V^5$ (203 K): 1 – $J\sim V$, 2 – $J\sim V^2$, 3 – $J\sim V^{4.3}$, 4 – $J\sim V^{1.2}$, 5 – $J\sim V^{3.2}$ (293 K), а при температуре 373 K , 1 – $J\sim V$, 2 – $J\sim V^{2.1}$, 3 – $J\sim V^{1.1}$, 4 – $J\sim V^{2.1}$, в исследованном диапазоне тока и напряжения смещения. Изменение закономерности переноса тока от температуры объясняется многослойностью i -базы структуры и изменением степени компенсации, а также изменением доли участия простых локальных центров (дефектов) и сложных комплексов в рекомбинационных процессах. При этом показано, что количество комплексов в разных слоях твердого раствора $n\text{-CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ разное.

В этой главе, на основе результатов исследований механизмов переноса тока в прямой ветви ВАХ показано, что при высоких температурах ($T=373\text{ K}$) и при больших плотностях тока, структура обладает достаточно высоким быстродействием ($\mu_p\tau_p\approx 2.5\cdot 10^{-10}\text{ см}^2/\text{В}$). Это позволяет создать эффективных инжекционных фотодиодов на основе таких гетероструктур, способных работать в экстремальных условиях (при высоких температурах).

Обратная ветвь ВАХ, гетероструктуры, описывается следующими зависимостями тока от напряжения, при температуре $T=293\text{ K}$: $J\sim V^{0.6}$, $J\sim V$, $J\sim V^2$.

Первый участок ВАХ обусловлен расширением слоя объемного заряда. На втором участке ВАХ инжектированная концентрация неосновных неравновесных носителей заряда (дырок) из фронтального буферного слоя n^+ -CdS компенсирует дальнейшее расширение слоя объемного заряда и, поэтому наблюдается линейная зависимость тока от напряжения. На третьем участке ВАХ реализуется дрейфовый режим переноса тока, и перенос тока связанный с омической релаксацией и ВАХ описывается законом Ламперта.

Изменение механизма переноса тока на обратной ветви ВАХ обусловлена, также многослойностью базы гетероструктуры и изменением доли участия концентрации инжектированных и равновесных носителей заряда в процессе переноса тока, с повышением температуры в слоях сильнокомпенсированного высокоомного твердого раствора, отличающихся между собой по проводимости и концентрации рекомбинационных центров.

Четвертая глава под заголовком «**Фотоэлектрические характеристики инжекционного фотодиода на основе гетероструктуры $\text{In-}n^+\text{-CdS-}n\text{-CdS}_x\text{Te}_{1-x}\text{-}p\text{-Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te-Mo}$** », посвящена исследованиям фотоэлектрических характеристик инжекционного фотодиода, созданного на основе гетероструктуры $\text{In-}n^+\text{-CdS-}n\text{-CdS}_x\text{Te}_{1-x}\text{-}p\text{-Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te-Mo}$. Исследования спектральных зависимостей фототока проводились в отсутствие, а спектральные зависимости фоточувствительности (S_λ) как в отсутствие, так и при приложении напряжения смещения в прямом и обратном направлении.

Исследованы влияние освещения белым и монохроматическим светом на ВАХ гетероструктуры, в обоих направлениях напряжения. Из полученных экспериментальных данных определялись величины интегральной (S_{int}) и спектральной (S_λ) фоточувствительности. Анализ этих характеристик позволяет оценить диапазон изменения интегральной (S_i) и спектральной (S_λ) фоточувствительности, степень инжекционного усиления и появления точки инверсии фототока, а также изменение этих параметров в зависимости от напряжения смещения. В конце данной главы, на основе полученных результатов, сделаны выводы о возможности создания инжекционных фотодиодов с внутренним усилением, регистрирующих без помех малые световые сигналы определенной длины волны в видимой области спектра излучения. Такие фотодиоды могут быть использованы в спецтехнике, при создании оптических спектроанализаторов, позволяющих определять химический состав металлических сплавов.

На рис. 10 представлена спектральная зависимость фототока гетероструктуры в случае отсутствия напряжения в относительных единицах. Из рис. 10 видно, что диапазон фоточувствительности структуры состоит из двух областей, расположенных в интервале длин волн 490÷855 нм. Первая область лежит в интервале длин волн 490÷730 нм. В этой области имеются два пика при длинах волн $\lambda \approx 670$ нм и $\lambda \approx 692$ нм, соответственно, амплитуды которых почти одинаковы. Кроме того, наблюдаются два изгиба при $\lambda \approx 510$ нм, 610 нм и плато при $\lambda \approx 634$ нм. Во второй области, расположенной в интервале 730÷855 нм, наблюдаются два небольших пика при длинах волн $\lambda \approx 795$ нм и $\lambda \approx 848$ нм, соответственно. Изгибы и плато, наблюдаемые в пер-

вой области спектрального распределения фототока, обусловлены наличием дефектов (примесей) в твердых растворах, образующихся в процессе формирования гетероперехода $n\text{-CdS}-p\text{-Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}$.

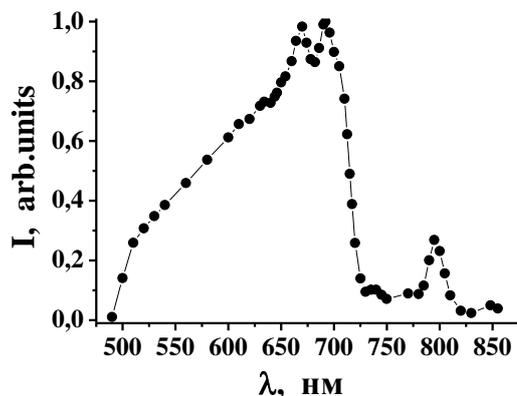


Рис. 10. Спектральная зависимость фототока гетероструктуры $\text{In-}n^+\text{-CdS-}n\text{-CdS}_x\text{Te}_{1-x}\text{-}p\text{-Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te-Mo}$, в относительных единицах, в отсутствии напряжения

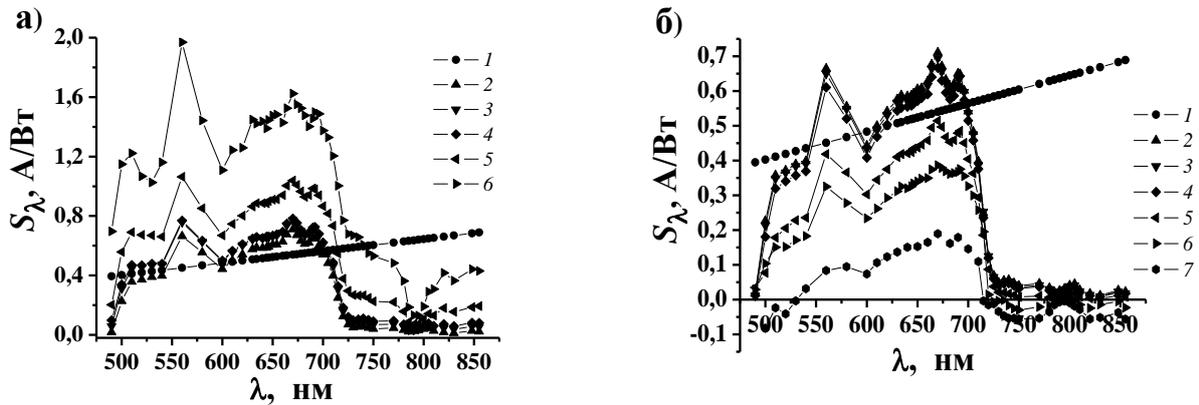
По длинноволновому краю спектров пиков, расположенных при длинах волн 670 нм и 692 нм, определены значения энергии активации первого (~ 1.71 эВ) и второго (~ 1.63 эВ) пиков, соответственно. По-видимому, эти величины связаны с ширинами запрещенных зон контактирующих твердых растворов $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ и $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}_y\text{S}_{1-y}$. Пики, наблюдаемые во второй области спектральной зависимости фототока, связаны с гексагональными (1.53 эВ, 795 нм) и кубическими (1.44 эВ, 848 нм) модификациями теллурида кадмия.

При приложении к гетероструктуре обратных напряжений в интервале от 0.5 В до 5 В, ее спектральная фоточувствительность растет во всем диапазоне спектра длин волн в интервале 490÷855 нм (рис. 11, а). Однако наибольшее увеличение S_λ наблюдается в областях коротких и длинных волн спектра. Например, при приложении к структуре напряжения - 5 В, при длине волны $\lambda=490$ нм значение S_λ возрастает в 38 раз, в области длинных волн при $\lambda=725$ нм, возрастает только в 10 раз, а в интервале длин волн $\lambda=540\div 700$ нм, увеличивается всего в 2.5÷3 раза, в отношении к спектральной чувствительности структуры без смещения.

Из приведенных выше экспериментальных данных следует, что в гетероструктуре происходит внутреннее усиление первичного фототока.

В прямом направлении смещения при напряжениях 0.05÷0.4 В, зависимость $S_\lambda(\lambda)$ уменьшается во всем диапазоне спектральной чувствительности (рис. 11, б). Известно, что такой эффект уменьшения величины тока с ростом напряжения смещения происходит в случае, когда в $p\text{-}i\text{-}n\text{-}$ структуре протекают встречные токи. Встречные токи могут реализоваться только тогда, когда у одного инжектирующего контакта скапливаются неравновесные неосновные носители, т.е. когда происходит эффект аккумуляции. В этом случае диффузионные и дрейфовые потоки неравновесных носителей заряда направлены навстречу друг другу, что и приводит к уменьшению тока в гетероструктуре. Появление инверсии знака фототока и сдвиг границы фоточувст-

вительности в длинновую область спектра обусловлено ростом диффузионного тока с увеличением прямого напряжения.



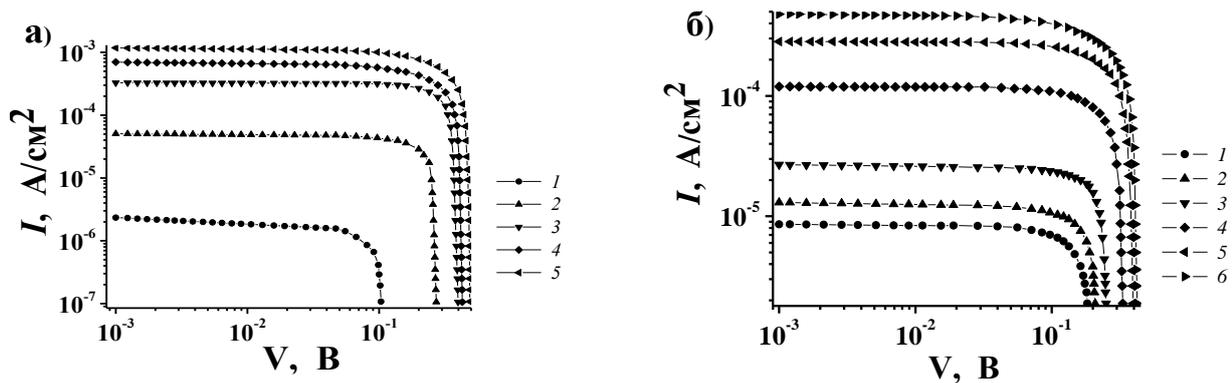
а) 1 – фоточувствительность идеального фотоприемника, 2 – спектральная фоточувствительность в отсутствии напряжения смещения, 3 – 0.5 В, 4 – 1 В, 5 – 3 В, 6 – 5 В

б) 1 – фоточувствительность идеального фотоприемника, 2 – спектральная фоточувствительность в отсутствии напряжения смещения, 3 – 0.05 В, 4 – 0.1 В, 5 – 0.2 В, 6 – 0.3 В, 7 – 0.4 В

Рис. 11. Спектральная зависимость фоточувствительности (S_λ) $\text{In-}n^+\text{-CdS-}n\text{-CdS}_x\text{Te}_{1-x}\text{-}p\text{-Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te-Mo}$ -гетероструктуры, при приложении обратного (а) и прямого (б) напряжения

На рис. 12 представлены прямые ветви экспериментальных ВАХ гетероструктуры, при освещении белым светом в различной степени освещенности (а), и лазерным излучением различной мощности (б). Из рис. 12а видно, что с увеличением уровня освещенности белого света от 0.044 лк до 264.7 лк, величина напряжения смещения, при которой происходит инверсия знака фототока, увеличится от 0.12 В до 0.49 В. На этом участке световой ВАХ наблюдается сублинейная зависимость тока от напряжения, причем протяженность этой зависимости возрастает с увеличением уровня освещенности. Такой эффект наблюдается в $p\text{-}i\text{-}n$ ($p\text{-}n(i)\text{-}n^+$)-структуре в том случае, когда один из переходов является идеальным, а другой неидеальным, и при этом толщина базы (i -слоя) должна быть длинной. $p\text{-}n(i)\text{-}n^+$ -структура с указанными выше свойствами, может обеспечить встречно направленных диффузионных и дрейфовых потоков неравновесных носителей тока, ответственных за появление сублинейного участка ВАХ, приводящих к инверсии знака фототока.

Из рис. 12 (б) следует, что точки инверсии фототока сдвигаются в сторону больших напряжений смещения с увеличением мощности лазерного излучения. Например, с увеличением мощности лазерного излучения, от $1.6 \cdot 10^{-7}$ Вт/см² до $13.6 \cdot 10^{-3}$ Вт/см², величина напряжения, при которых происходит инверсия знака фототока, сдвигается от 0.18 В на 0.42 В. Некоторые параметры гетероструктуры, вычисленные из сублинейного участка, для разных уровней освещенности белым светом и различной мощности лазерного излучения, приведены в табл. 1.



Е, лк: 1 – 0.044, 2 – 1.1, 3 – 13.23, 4 – 83.8, 5 – 264.7, P, Вт/см²: 1 – $1.6 \cdot 10^{-7}$, 2 – $6 \cdot 10^{-7}$, 3 – $1.4 \cdot 10^{-6}$, 4 – $2.59 \cdot 10^{-3}$, 5 – $8.43 \cdot 10^{-3}$, 6 – $13.6 \cdot 10^{-3}$

Рис. 12. Прямая ветвь ВАХ $\text{In-}n^+\text{-CdS-}n\text{-CdS}_x\text{Te}_{1-x}\text{-}p\text{-Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te-Mo}$ гетероструктуры, в интервале напряжений $V=0.05 \div 0.5$ В, в двойном логарифмическом масштабе: а) при различных уровнях освещенности белым светом, и б) при облучении лазерным светом ($\lambda=632$ нм), при различной мощности излучения

Экспериментальные данные, приведенные в табл. 1 показывают, что при освещении белым светом в интервале освещенностей $E=0.044 \div 1.1$ лк, величина интегральной чувствительности гетероструктуры имеет наиболее высокое значение. Дальнейший рост уровня освещенности приводит к стремительному падению интегральной чувствительности и при освещенностях $E=264.7$ лк имеет значение $S_{\text{int}}=4.56$ А/Вт. Такое поведение величины S_{int} связано с опустошением глубоких уровней прилипания с ростом уровня освещенности, так как в этом случае они не могут повлиять на процесс аккумуляции дырок около $n\text{-}n^+$ -гетероперехода. Величины биполярной скорости дрейфа носителей заряда v_α и концентрация уровней прилипания N_t , вычисленные из сублинейного участка световой ВАХ приведены в табл. 1.

Основным критерием появления сублинейного участка в световой ВАХ, при механизме модуляции заполнения глубоких уровней прилипания для неосновных неравновесных носителей заряда, является выполнение условия $\alpha J w \geq 2$. Произведение $\alpha J w$ можно определить из сублинейного участка ВАХ по формуле $v = V_0 e^{J w}$ (V_0 -напряжение, соответствующее концентрации уровней прилипания на аккумулялирующем контакте, J - плотность тока, α - некий параметр, w - длина базы).

Проведенные расчеты показали, что величина $\alpha J w < 2$ при уровнях освещенности $E_1=0.044$ лк и $E_2=1.1$ лк, а при других уровнях освещенности она равна или больше двух. Это подтверждает появление сублинейного участка на световой ВАХ при экспериментах, связанного с модуляцией заполнения глубоких уровней прилипания для дырок.

Из данной таблицы видно, что величины параметров v_α , N_t возрастают с ростом уровней освещенности. Рост значения этих параметров обусловлено ростом концентрации дырок около $n\text{-}n^+$ -барьера и увеличением диффузионных потоков в базе гетероструктуры, приводящих к сдвигу точки инверсии

фототока к более высоким значениям напряжении смещения. Появление точки инверсии означает равенство диффузионных и дрейфовых потоков, компенсирующих друг друга при данном напряжении смещения и уровне освещенности.

Таблица 1.

Зависимость концентрации уровней прилипания (N_t), биполярная скорость дрейфа (v_a), фототока (I_{Ph}), интегральной чувствительности гетероструктуры (S_{int}) от освещенности (E) и мощности лазера (P).

| Белый (интегральный) свет | | | | | Лазерное облучение | | | |
|---------------------------|-----------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------------------|---------------------|
| E , Лк | N_t , см ⁻³ | v_a , см/с | I_{Ph} , А/см ² | S_{int} , А/лм | S_{int} , А/Вт | P , Вт/см ² | I_{Ph} , А/см ² | S_{int} , А/Вт |
| | | | | | | $1.6 \cdot 10^{-7}$ | $8.58 \cdot 10^{-6}$ | 53.6 |
| 0.044 | 10^8 | $8 \cdot 10^3$ | $1.8 \cdot 10^{-6}$ | 0.41 | 45 | $6 \cdot 10^{-7}$ | $1.3 \cdot 10^{-5}$ | 21.7 |
| 1.1 | $1.2 \cdot 10^9$ | $1.4 \cdot 10^4$ | $4.7 \cdot 10^{-6}$ | 0.43 | 47 | $1.4 \cdot 10^{-6}$ | $2.68 \cdot 10^{-5}$ | 19.1 |
| 13.23 | $4 \cdot 10^9$ | $1.8 \cdot 10^4$ | $3.3 \cdot 10^{-4}$ | 0.25 | 27.47 | $2.59 \cdot 10^{-3}$ | $1.2 \cdot 10^{-4}$ | 0.047 |
| 83.8 | $6.8 \cdot 10^9$ | $1.9 \cdot 10^4$ | $6.3 \cdot 10^{-4}$ | 0.076 | 8.35 | $8.43 \cdot 10^{-3}$ | $2.82 \cdot 10^{-4}$ | 0.033 |
| 264.7 | $8 \cdot 10^9$ | $2 \cdot 10^4$ | $1.1 \cdot 10^{-3}$ | 0.0415 | 4.56 | $13.6 \cdot 10^{-3}$ | $4.78 \cdot 10^{-4}$ | 0.035 |
| E , Лк | U, В | I_{Ph} , А/см ² | | S_{int} , А/лм | S_{int} , А/Вт | P , Вт/см ² | I_{Ph} , А/см ² | S_{int} , А/Вт |
| 0.044 | 6 | $1.32 \cdot 10^{-2}$ | | 700 | 14500 | $1.6 \cdot 10^{-7}$ | $1.08 \cdot 10^{-2}$ | 4125 |

Полученные экспериментальные результаты показывают, что исследуемая гетероструктура при больших напряжениях, особенно в интервале напряжений 4 В ÷ 6 В прямого смещения, работает как инжекционный фотодиод и при этом усиление первичного фототока обусловлено двумя механизмами – положительной обратной связью (ПОС) и параметрическим усилением (ПУ). После инверсии знака фототока резко возрастают величина фототока, соответственно и S_{int} , с ростом напряжения смещения, причем, чем больше уровень освещенности, тем резче рост фототока. При этом световая ВАХ описывается зависимостью $I \sim V^\alpha$, где $\alpha > 2$. Вслед участком квадратичной зависимости ВАХ следует участок линейного роста фототока, который затем опять сменяется участком, описываемым квадратичной зависимостью тока от напряжения. Такая последовательность ВАХ, как было указано выше, обусловлена наличием твердого раствора $n\text{-CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ различного состава.

Поскольку твердые растворы с разными составами имеют разные ширины запрещенных зон и разные удельные сопротивления, то они при разных плотностях тока вносят соответствующий вклад в величину тока в структуре. Из участка квадратичной зависимости световой ВАХ была вычислена интегральная чувствительность в зависимости от напряжения и от уровня освещенности. Полученные результаты показали, что усиление первичного фототока растет с увеличением величины напряжения, при постоянном значении

уровня освещенности. Усиление первичного фототока показано, также расчетным путем. Расчет фототока произведен для случая, когда освещенность имела значение $E=0.044$ лк, а напряжение $V=6$ В. При этом было предположено, что все падающие фотоны поглощаются и генерируют неравновесных носителей заряда, которые без потерь разделяются барьерами и вносят свой вклад в величину фототока. При расчетах была взята средняя энергия фотонов, поглощаемых в гетероструктуре в спектральном диапазоне чувствительности. Расчеты показали, что величина рассчитанного фототока $I_{\text{Ph}}=1.1 \cdot 10^{-6}$ А/см² сильно отличается от его экспериментального значения $I_{\text{Ph.exp}}=1.32 \cdot 10^{-2}$ А/см², что подтверждает сильное усиление (в порядке 10^4 раз) первичного фототока.

Исследованы ВАХ $\text{In-}n^+\text{-CdS-}n\text{-CdS}_x\text{Te}_{1-x}\text{-}p\text{-Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te-Mo}$ -гетероструктуры при облучении лазерным излучением длиной волны $\lambda=632$ нм, при мощностях: 0.16 мкВт/см², 0.6 мкВт/см², 1.4 мкВт/см², 2.59 мВт/см², 8.43 мВт/см² и 13.6 мВт/см², соответственно. При этом установлено, что световая ВАХ состоит из двух частей, как при облучении белым светом. При лазерном облучении в первой части ВАХ фототок имеет отрицательный знак относительно второй части, как в случае освещения белым светом. Световые ВАХ при всех мощностях лазерного облучения имеют сублинейные участки. Для этих сублинейных участков были вычислены спектральные чувствительности, результаты которых приведены в табл. 1. Для сравнения отметим, что при освещении белым светом с освещенностью $E=1.1$ лк ($\sim 5.2 \cdot 10^{-6}$ Вт/см², согласно проведенной градуировке) интегральная чувствительность имеет значение $S_{\text{int}}=47$ А/Вт, а при лазерном облучении с мощностью $1.6 \cdot 10^{-7}$ Вт/см² спектральная чувствительность имеет значение $S_{\lambda}=53.6$ А/Вт.

Из приведенных выше можно заключить, что в усилениях первичного фототока основную роль играют фотоны с энергиями $h\nu \approx 2 \text{ эВ} > E_g$, значительно превышающими ширину запрещенных зон ($E_g \approx 1.47$ эВ) высокоомных подслоев твердого раствора $n\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ с составом $x < 0.5$. Условие $\alpha J w \geq 2$ появления сублинейного участка ВАХ для всех мощностей лазерного облучения строго выполняется. Например, при приведенных ниже мощностях лазерного излучения $\alpha J w$ имеет следующие значения: $P=0.16$ мкВт/см² – 4.2; $P=0.6$ мкВт/см² – 4; $P=1.4$ мкВт/см² – 3.82; $P=2.59$ мВт/см² – 3.22; $P=8.43$ мВт/см² – 2.56 и $P=13.6$ мВт/см² – 2.67.

При больших мощностях лазерного облучения ($P=2.59$ мВт/см², $P=8.43$ мВт/см², $P=13.6$ мВт/см²) спектральная чувствительность имеет значение на уровне идеального фотоприемника. Это свидетельствует об отсутствии токовой модуляции уровней прилипания, как и при высоких уровнях освещенности белым светом, так как при таких уровнях освещенности они полностью опустошены.

В заключении хочу выразить свои благодарности научному руководителю д.ф.-м.н. профессору Ш.А. Мирсагатову, к.ф.-м.н., с.н.с. Р.Р. Кобулову, научным сотрудникам отдела полупроводников ФТИ АН РУз, коллективу лаборатории «Фотоэлектроника» и кафедры «Физика полупроводников» Каракалпакского государственного университета за оказанную помощь при

проведении экспериментальных исследований, их обсуждении и оформлении диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований по установлению механизмов токопереноса и фоточувствительности гетероструктур, созданных на основе твердых растворов $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}-\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$ с управляемым спектром фоточувствительности в видимой области спектра электромагнитного излучения сделаны следующие выводы:

1. Установлено, что пленки твердого раствора $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$, полученные при оптимальных технологических режимах ($T_{\text{подл}}=700^\circ\text{C}$, $\nu_{\text{H}_2}=1.5$ л/час) имеют состав $x=0.35$, кубическую модификацию с величиной постоянной кристаллической решетки 6.33 \AA и кристаллографическую ориентацию в направлении $hkl(111)$.

2. Впервые выявлено, что в процессе создания гетероперехода $n\text{CdS}-p\text{Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}$ между слоями твердого раствора $\text{Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}$ и слоем CdS образуются сильнокомпенсированные высокоомные ($\sim 10^9$ и $\sim 10^6 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) слои твердых растворов $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$, $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}_y\text{S}_{1-y}$, сглаживающие несоответствие параметров кристаллических решеток.

3. Обнаружено, что плотность поверхностных состояний на границе раздела $n(i)-p$ - гетероперехода, как в режиме аккумуляции, так и в режимах обеднения и обогащения (до $\psi_s = -0.18 \text{ эВ}$) мала, и не превышает $\sim 3.5 \cdot 10^{10} \text{ эВ}^{-1}\cdot\text{см}^{-2}$, что свидетельствует о хорошей согласованности параметров кристаллических решеток слоев, составляющих структуру.

4. Установлено, что прямая ветвь вольтамперной характеристики гетероструктуры $\text{In}-n^+-\text{CdS}-n-\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}-p-\text{Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}-\text{Mo}$ состоит из нескольких участков, в которых перенос тока в условиях высокого уровня инжекции, осуществляется за счет механизма биполярного дрейфа.

5. Показано, что изменение температуры гетероструктуры $\text{In}-n^+-\text{CdS}-n-\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}-p-\text{Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}-\text{Mo}$ в диапазоне $203 \div 373 \text{ K}$ приводит к изменениям механизмов переноса тока, которые объясняются многослойностью базы, перераспределением напряжения смещения на гетеропереходе и базовой области, изменением степени компенсации дрейфовой и диффузионной составляющих тока, а также долей участия простых локальных центрови сложных комплексов в рекомбинационных процессах.

6. Выявлено, что инжекционный фотодиод, созданный на основе гетероструктуры $\text{In}-n^+-\text{CdS}-n-\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}-p-\text{Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}-\text{Mo}$ обладает фоточувствительностью в широком спектральном диапазоне ($\lambda=0.49 \div 0.855 \text{ мкм}$), а также при относительно больших значениях напряжения смещения ($\sim 6 \text{ В}$) в прямом направлении тока и малых уровнях освещенности ($E=0.044 \text{ лк}$) белого света, обладает высокой интегральной чувствительностью $S_{\text{int}} \approx 700 \text{ А/лм}$ (14500 А/Вт), при 300 K .

7. Экспериментально показано, что усиление первичного фототока в гетероструктуре $\text{In}-n^+-\text{CdS}-n-\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}-p-\text{Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}-\text{Mo}$ происходит за счет

двух механизмов: положительной обратной связи (низкие напряжения смещения, $\alpha > 2$) и параметрического усиления (высокие напряжения смещения).

8. Научно-технические результаты, полученные при создании гетероперехода $n\text{CdS}-p\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$, могут быть рекомендованы для применения при изготовлении инжекционных фотодиодов с внутренним усилением, чувствительных в видимой области спектра электромагнитного излучения, используемых в оптоэлектронных приборах.

**SCIENTIFIC COUNCIL ON AWARDING OF SCIENTIFIC DEGREES
DSc.30.05.2018.FM/T.34.01 AT PHYSICAL-TECHNICAL INSTITUTE**

PHYSICAL-TECHNICAL INSTITUTE

ATABOEV OMONBOY KURBANBOYEVICH

**INJECTION PHOTODIODES BASED ON SOLID SOLUTIONS OF
 $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}-\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$ SEMICONDUCTOR COMPOUNDS A²B⁶**

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) was registered by the Supreme Attestation Commission under the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2017.2.PhD/FM101.

Dissertation has been prepared at Physical-technical institute.

The abstract of the dissertation was posted in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the website of the Scientific Council at www.fti.uz and on the website of «Ziyonet» informational and educational portal at www.ziyonet.uz.

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

Official opponents: **Utamuradova Sharifa Bekmuradovna**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
senior researcher

Mavlonov Giyosiddin Xaydarovich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences

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

The defense of the dissertation will be held on «____» _____2019 at _____ at the meeting of the Scientific Council No. DSc.30.05.2018.FM/T.34.01 at the Physical-technical institute (Address: 100084, Uzbekistan, Tashkent, Chyngyz Aitmatov street, 2 «B». Phone/fax: (+99871) 235-42-91, e-mail: ftikans@uzsci.net).

The dissertation can be looked through in the Information Resource Centre at the Physical-technical institute (is registered №____) (Address: 100084, Uzbekistan, Tashkent, Chyngyz Aitmatov street, 2 «B». Phone/fax: (+99871) 235-30-41).

Abstract of dissertation was distributed on «____» _____2018 year.

(Mailing report № _____ on «____» _____2018 year).

N.R. Avezova
Chairman of the Scientific Council on
Award of Scientific Degrees, Doctor of
Technical Sciences

O.A. Abdulkhaev
Scientific secretary of the Scientific
Council on Award of Scientific Degrees,
PhD in Physics and Mathematics

A. Abdurakhmanov
Chairman of the Scientific Seminar of the
Scientific Council on Award of Scientific
Degrees, Doctor of Technical Sciences,
Professor

INTRODUCTION (abstract of PhD dissertation)

Actuality and demand of the theme of dissertation. Currently, in the world practice in the rapidly developing field of semiconductor physics one of the urgent problems is the creation of photodiodes based on A^2B^6 compounds and their solid solutions with internal amplification, sensitive in the visible region ($\lambda=0.45\div 0.7\ \mu\text{m}$) of the electromagnetic radiation spectrum as well as the study of their mechanisms of current transfer and photosensitivity. In this aspect, the achievement of high photosensitivity of photodiode structures in a given region of the spectrum of electromagnetic radiation due to the selection of the composition of $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$ solid solution is one of the main tasks ensuring the maximum value of the photocurrent.

The aim of research work is to establish the mechanisms of current transfer and photosensitivity of heterostructures created on the basis of solid solutions $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}-\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$ with a controllable photosensitivity spectrum in the visible region of the electromagnetic spectrum.

Scientific novelty of research consists of the following:

optimized technological mode of manufacturing the $n\text{CdS}-p\text{Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}$ heterojunction by sputtering a layer of cadmium sulfide in vacuum, at a substrate temperature of 250°C , on the surface of the $\text{Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}$ solid solution film, which made it possible to eliminate the inconsistencies of the lattice parameters by the formation of a transition layer of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ and $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}_y\text{S}_{1-y}$ layers at the heterojunction, and on their basis photodiode structures were obtained photosensitivity in the visible region of the spectrum of electromagnetic radiation;

the property of detecting optical signals of the $n\text{CdS}-p\text{Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}$ heterojunction structure was experimentally detected without reducing photosensitivity in the spectral range from 0.49 to $0.735\ \mu\text{m}$ and, based on this, for the spectrum analyzer determining the chemical composition of metal alloys from the emission spectra of the atoms of a substance, a recording device - photodiode, which has a high photosensitivity in the mode of direct current, due to the low density of the surface state ($\sim 3.5 \cdot 10^{10}\ \text{eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$);

it has been found that recombination processes, both in darkness and when illuminated with white light and monochromatic laser radiation, in an $\text{In}-n^+-\text{CdS}-n-\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}-p-\text{Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}-\text{Mo}$ heterostructure, at low current densities, occur with the participation of simple local centers, and at high current densities complex complexes take part in recombination processes, within which electronic exchange takes place, as a result of which the inertia of the recombination process increases;

it has been experimentally shown that in photosensitive $\text{In}-n^+-\text{CdS}-n-\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}-p-\text{Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}-\text{Mo}$ heterostructure in the forward current mode conditions of a long diode in the temperature range $203 \div 373\ \text{K}$ are realized, with a bipolar drift transfer mechanism current;

It has been found that at low bias voltages in the $\text{In}-n^+-\text{CdS}-n-\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}-p-\text{Zn}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}-\text{Mo}$ heterostructure, the sign of the photocurrent in the short-wavelength $0.49 \div 0.53\ \mu\text{m}$ and the long-wave $0.71 \div 0.85\ \mu\text{m}$ photosensitivity

regions occurs due to the compensation of counter diffusion and drift flows of non-equilibrium charge carriers.

Application of the research results. On the base of results of studying the mechanisms of current transfer and photosensitivity of heterostructures based on $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}-\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$ solid solutions with a controlled photosensitivity spectrum in the visible region of the electromagnetic radiation spectrum were introduced:

the results of the study of recombination processes in the dark, when white and light were illuminated with monochromatic laser radiation, in heterostructures were used to carry out the fundamental project "Features of laser-induced nonlinear processes of defect formation in semiconductors" Karakalpak State University (Reference No. 89-03-1926 of May 19, 2018 of the Ministry of Higher and Secondary Special Education of the Republic of Uzbekistan). The use of scientific results allowed non-destructive express analysis of the defective structure of a semiconductor exposed to laser radiation;

The developed spectrum analyzer of the express emission method for determining the chemical composition of metal alloys was used in the joint stock company Tashkent Mechanical Plant of the joint stock company Uzbekiston Temir Yollari to determine the composition of manufactured structures (Reference No. NG/2653-18 dated 2018 May 28, Joint Stock Company «Uzbekiston Temir Yollari»). The use of scientific results made it possible to reduce the time for determining the composition of chemical elements (Cu, Fe, Si, In, Mo, Ni, W, Te, Ag, Au, C, Al, Zn, Ti, Cr, Mn) in metal alloys one order of magnitude compared with the known absorption method.

Structure and volume of dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, conclusion, a list of used references and applications. The text of the dissertation consists of 120 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; part I)

1. Атабоев О.К. Исследование обратной ветви вольтамперной характеристики инжекционного фотоприемника со структурой $\text{In-}n^+\text{CdS-}n\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}\text{-}p\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te-Mo}$ в зависимости от температуры // Узбекский физический журнал. – Ташкент, 2017, Т. 19, № 5. – с. 290-297. (01.00.00. №5).

2. Мирсагатов Ш.А., Атабоев О.К. Влияние ультразвукового облучения на плотность поверхностных состояний на границе раздела структуры- $\text{In-}n^+\text{CdS-}n\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}\text{-}p\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te-Mo}$ // Доклады Академии наук РУз. – Ташкент, 2016, № 6, – с. 24-27. (01.00.00. №7).

3. Mirsagatov Sh.A., Ataboev O.K., Zaveryukhin B.N., Nazarov Zh.T. Photoelectric properties of an injection photodetector based on Alloys of II–VI compounds // Semiconductors. – Saint-Petersburg (Russia), 2014, Vol. 48, No. 3, – pp. 354-359. (№11. Springer, IF: 0.72).

4. Mirsagatov Sh.A., Zaveryukhin B.N., Ataboev O.K., Zaveryukhina N.N. Cascade injection photodetector for the 500–650 nm spectral range on the basis of solid solution of A^2B^6 compounds // Ukrainian journal of physics. – Kyiv (Ukraine), 2013, Vol. 58, No. 5, – pp. 465-471. (№3. Scopus, IF: 0.30).

5. Мирсагатов Ш.А., Атабоев О.К., Заверюхин Б.Н. Спектральные свойства $\text{M-}n^+\text{CdS-}n\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}\text{-}p\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te-Mo}$ структуры для инжекционного фотоприемника // Физическая инженерия поверхности. – Харьков, 2013, Т. 11, №1. – с.4-10. (01.00.00. №91).

6. Мирсагатов Ш.А., Ускенбаев Д.Е., Исмаилов К.А., Атабоев О.К. Реальное строение $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te-Mo}$ – структуры // Доклады Академии наук РУз. – Ташкент, 2013, № 4. – с. 23-25. (01.00.00. №7).

7. Mirsagatov Sh.A., Leiderman A.Yu., Ataboev O.K. Mechanism of charge transfer in Injection photodiodes based on the $\text{In-}n^+\text{CdS-}n\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}\text{-}p\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te-Mo}$ structure // Physics of the solid state. – Saint-Petersburg (Russia), 2013, Vol. 55, No. 8, – pp.1635-1646. (№11. Springer, IF: 0.81)

8. Mirsagatov Sh.A., Ismaylov K.A., Ataboev O.K. Film injection photodetector based on solid solution of A^2B^6 -compounds // Functional Materials. – Ukraine, 2012, Vol. 19, No. 4, – pp. 1-3. (№3. Scopus, IF: 0.42).

II бўлим (II часть; part II)

9. Атабоев О.К. Изучение морфологии твердых растворов $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$ синтезированных методом газотранспортной эпитаксии в потоке водорода / Седьмая Международная конференция по Физической электронике IPES, – Ташкент, 2018 г., – с. 18-19.

10. Атабоев О.К., Герасименко С.Ю. Влияние ультразвукового облучения на вольт-амперные характеристики инжекционного фотодиода на основе $\text{In-}n^+\text{CdS-}n\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}\text{-}p\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te-Mo}$ структуры / Материалы 54-й междуна-

родной научной студенческой конференции МНСК–2016, Квантовая физика, – Новосибирск, 2016 г., – с. 8.

11. Мирсагатов Ш.А., Исмаилов К.А., Атабоев О.К. Механизм переноса тока в инжекционном фотоприемнике на основе структуры $\text{In-}n^+\text{CdS-}n\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}\text{-}p\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te-Mo}$ / Фундаментальные и прикладные вопросы физики, сборник тезисов докладов международной конференции, – Ташкент, 2015 г., – с. 86-90.

12. Мирсагатов Ш.А., Исмаилов К.А., Каланов М.У., Атабоев О.К. Спектральные характеристики инжекционного фотодиода на основе $\text{CdO-}n^+\text{CdS-}n\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}\text{-}p\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te-Mo}$ структуры / Яримўтказгичлар физикаси ва курилмалари ҳамда уларни ўқитишнинг муаммолари» худудий илмий анжумани, – Наманган, 2013 г., – с. 94-96.

13. Мирсагатов Ш.А., Исмаилов К.А., Атабоев О.К. Инверсионные и помехоустойчивые фотоприемники с внутренним усилением на основе $p\text{CdTe}$ / Структурная релаксация в твердых телах. Сборник материалы IV международной научно-практической конференции. – Винница (Украина), 2012 г., – с.236-238.

14. Мирсагатов Ш.А., Исмаилов К.А., Атабоев О.К. Пленочный инжекционный фотоприемник на основе твердых растворов A^2B^6 соединений / Структурная релаксация в твердых телах. Сборник материалы IV международной научно-практической конференции. – Винница (Украина), 2012 г., – с.242-243.

15. Атабоев О.К. Новый тип инжекционного фотоприемника / 14 Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике, – Санкт-Петербург, 2012 г., – с. 86.

Автореферат «Til va adabiyot ta'limi» журналы тахририятида тахрирдан ўтказилиб, ўзбек ва рус тилларидаги матнлари ўзаро мувофиқлаштирилди (10.12.2018 йил).