

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

ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ

САПАЕВ ИБРОХИМ БАЙРАМДУРДИЕВИЧ

**КАДМИЙ СУЛЬФИДИ ВА КРЕМНИЙ ОРАСИДАГИ
ГЕТЕРОЎТИШЛАР АСОСИДАГИ ИНЖЕКЦИОН
ФОТОДИОДЛАРДАГИ ЭЛЕКТРОН ЖАРАЁНЛАР**

01.04.10 –Яримўтказгичлар физикаси

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

Тошкент – 2018

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

Сапаев Иброхим Байрамдурдиевич

Кадмий сульфиди ва кремний орасидаги гетероўтишлар асосидаги
инжек-цион фотодиодлардаги электрон жараёнлар 3

Сапаев Иброхим Байрамдурдыевич

Электронные процессы в инжекционных фотодиодах на основе
гетеро-переходов между сульфидом кадмия и кремнием 23

Sapaev Ibrohim Bayramdurdievich

The electron processes in the injection diodes between cadmium sulfide
and silicon 43

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works 47

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

ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ

САПАЕВ ИБРОХИМ БАЙРАМДУРДИЕВИЧ

**КАДМИЙ СУЛЬФИДИ ВА КРЕМНИЙ ОРАСИДАГИ
ГЕТЕРОЎТИШЛАР АСОСИДАГИ ИНЖЕКЦИОН
ФОТОДИОДЛАРДАГИ ЭЛЕКТРОН ЖАРАЁНЛАР**

01.04.10 –Яримўтказгичлар физикаси

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

Тошкент – 2018

**Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси
Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида
В2017.1.PhD/FM38 рақам билан рўйхатга олинган**

Диссертация Физика-техника институтида бажарилган.

Диссертация автореферати икки тилда (ўзбек, рус) веб-саҳифанинг fti-kengash.uz ҳамда «Ziyo Net» ахборот-таълим портали www.ziyo.net манзилларига жойлаштирилган.

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

Расмий оппонентлар: **Абдурахманов Каххар Паттахович**
физика-математика фанлари доктори, профессор

Камалов Амангелди Базарбаевич
физика-математика фанлари доктори, профессор

Етакчи ташкилот: Намангон давлат университети

Диссертация ҳимояси Физика-техника институти, Ион-плазма ва лазер технология-лари институти, Самарқанд давлат университети ҳузуридаги 27.06.2017. FM./T.34.01 рақамли Илмий кенгашининг 2018 йил «___» _____ соат ___ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100084, Тошкент шаҳри, Бодомзор йўли кўчаси, 2Б-уй. Тел./факс: (99871) 235-42-91; e-mail: info.fti@uzsci.net, Физика-техника институти мажлислар зали.).

Диссертация билан Физика-техника институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин. (___ рақам билан рўйхатга олинган.). Манзил: 100084, Тошкент шаҳри, Бодомзор йўли кўчаси, 2Б-уй. Физика-техника институти. Тел./факс: (99871) 235-30-41.

Диссертация автореферати 2018 йил «___» _____ да тарқатилди.
(2018 йил «___» _____ даги ___ рақамли реестр баённомаси.)

С.А. Бахрамов

Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш раиси ф.-м.ф.д., ЎзР ФА академики

А.В. Каримов

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

И.Г. Атабаев

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

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертациясининг аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳонда бугунги кунда интенсиф ривожланаётган яримўтказгичлар соҳасида истиқболли йўналишлардан бири бўлган оптикэлектрон асбобларнинг янги турларини барпо қилишга, шунингдек инжекцияли фотодиодларни такомиллаштириш муаммоларига алоҳида эътибор қаратилмоқда. Бу борада инжекцияли фотодиодларнинг ишлаш принципи, уларга қўйилган кучланишнинг электрон-ковак жуфтликларининг генерацияланиши ва электромагнит нурланиши таъсирида база қаршилигининг модуляцияланиш жараёнларини тадқиқ қилиш фотодиодларнинг янги турини яратишдаги муҳим вазифалардан бири бўлиб ҳисобланади.

Ҳозирги кунда дунёда ярим ўтказгичлар физикаси соҳасида инжекцияли фотодиодларнинг физик хусусиятларининг шаклланишида база параметларининг ролини аниқлашга катта аҳамият берилмоқда. Бу борада мақсадли илмий тадқиқотларни, жумладан, қуйидаги йўналишлардаги илмий изланишларни амалга ошириш муҳим вазифалардан ҳисобланади ва буларга: тадқиқ қилинадиган тузилмаларда содир бўлаётган физик жараёнларни мукамал ўрганиш ва фотоэлектрик характеристикаларининг шаклланиш механизмларини аниқлаш; инжекцияли фотодиодларни тайёрлаш технологик усуларини мукамаллаштириш; кадмий сулфиди ва кремний асосидаги гетеротузилмали фотодиодларнинг спектрал характеристикаларининг гетерочегарадаги жараёнлар билан боғлиқлигини аниқлаш; уларнинг функционал параметрларини оптималлаштириш усулларини излаш; ҳамда уларни тайёрлаш технологиясини мукамаллаштириш киради.

Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантиришнинг Ҳаракатлар стратегиясига кўра, илмий ва инновация ютуқларини амалиётга жорий этишнинг самарали механизмларини яратиш масалаларига алоҳида эътибор қаратилмоқда. Жумладан микроэлектроника ва яримўтказгичли гетеротузилмаларда кечадиган электрон жараёнларни ва спектрал характеристикаларини бошқариш имкониятларини аниқлаш амалиётга тадбиқ қилиш муҳим вазифалардан бири ҳисобланади. Фаол тадбиркорлик, инновацион ғоялар ва технологияларни қўллаб-қувватлаш йилида олинган илмий натижаларни ҳозирги замон талабларига жавоб берадиган даражага олиб чиқишга алоҳида эътибор қаратиш зарур. Бунда ҳар хил спектрал диапазонга мўлжалланган гетеротузилмали фотодиодларнинг функционал характеристикаларини оптималлаштириш орқали уларнинг самандорлигини ошириш муҳим аҳамият касб этади. Бу борада турли ташқи таъсирлар орқали сирқиш тоқларини камайтириш усуллари ишлаб чиқилган. Шулар қаторида кадмий сулфиди ва кремний асосидаги гетеротузилмали фотодиодларнинг спектрал характеристикаларининг шаклланишини, динамик ва статик характеристикаларини изоҳлайдиган электрон жараёнларни аниқлаш, фотоэлектрик параметрларининг самарандорлигини ошириш ҳамда уларни яратишнинг янги технологияларини ишлаб чиқиш муҳим аҳамиятга эга.

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

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

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Шу кунга қадар олимлар ва ишлаб чиқарувчиларнинг эътибори гетеротузилмаларда кечувчи электрон жараёнларни ўрганишга ва уларнинг фотоэлектрик параметрларини оптималлаштириш усулларини ишлаб чиқишга қаратилган. Шундай гетеротузилмалардан бири инжекцияли фотодиодлар бўлиб, улар яримўтказгичли фотодиодлар ичида фотоқабулқилгичларнинг янги синфини ташкил қилади ва узун базали диодлар туркумига киради.

Инжекцияли фотодиодларнинг илк намуналари бу соҳада етакчи бўлган етук олим В.И. Стафеев ва унинг шогирдлари томонидан яратилган. Янги турдаги фотоқабулгич тузилмаларини ишлаб чиқиш, уларнинг спектрал диапазонини база материалнинг параметрларига боғлиқ ҳолда бошқариш бўйича маълум натижалар кремний ва галлий арсениди асосида М.К. Бахадирханов, А.Т. Мамадалимов ва А.В. Каримов¹ каби олимлар раҳбарлигида амалга оширилган.

Ўз навбатида инжекцияли фотодиодларнинг янги турларини яратиш яхши ўрганилган материалларга, яъни адабиётларда физикавий, физик-кимёвий ва технологик хусусиятлари ҳақида етарлича аниқ маълумотлар келтирилган яримўтказгич материалларга мурожаат қилишни талаб қилади. Бирок, A^4B^4 ва A^2B^6 бирикмали яримўтказгичлар яхши ўрганилганлигига қарамасдан, улар асосида инжекцияли фотодиодлар ишлаб чиқишга кам эътибор қаратилган. Бундан ташқари шу пайтгача кремний тагликлар юзасига CdS яримўтказгич бирикмаларини ўтқозиш ва улар асосида фотодиодларни тайёрлаш технологиялари ҳам ишлаб чиқилмаган.

Тадқиқотнинг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация

¹Диссертациянинг мавзуси бўйича муаммони ўрганилганлик даражаси Karimov A.V., Karimova D.A. Three-junction Au/AlGaAs(n)/GaAs(p)/Ag photodiode. Science in Semiconductor Processing. Volume 6, Issues 1-3, 2003, Pages. 137-142, Инжекционно-полевой фотодиод Патент РУз № IAP 03974 от 09.06.20.09. Расмий ахборотнома. – 2009. - № 7 ва бошқа манбалар асосида бажарилган.

ция иши ЎзР ФА «Физика – Қуёш» ИИЧБ ФТИ илмий тадқиқотлари доира-сидаги қуйидаги лойиҳалар бўйича: АЗ-ФА-011242 «Саноатда металл қотишмалар таркибидаги элементларни тезкор аниқлаш учун кўчма спекро-анализаторни ишлаб чиқиш» (2012-2014 й.й.); ФА-АЗ-Ф024 «Газ алангали қозонлар учун аланга ёнганлигини назорат қилишнинг компакт тизимини ишлаб чиқиш» (2015-2017 й.й.) деган мавзуларда бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади $n^+CdS - nCdS - pSi$ ва $n^+CdS - nCdS - nSi$ -гетеротузилмалари асосидаги инжекцияли фотодиодларнинг ток ташиш меха-низмларини ҳамда уларнинг динамик ва статик характеристикаларини изохлайдиган электрон жараёнларни аниқлашдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

тадқиқ қилинадиган тузилмани ва уни яратиш учун зарур бўлган ярим ўтказгич материални танлаш критерийларини аниқлаш;

инжекцияли фотодиодларнинг экспериментал намуналарини тайёрлаш-нинг технологик усулини ишлаб чиқиш, технологик қурилмани тайёрлаш ва материалларга ишлов бериш;

тадқиқ қилинадиган инжекцияли фотодиодлар тузилмасининг экспери-ментал намуналарини тайёрлаш;

тайёрланган инжекцияли фотодиодлар намуналарини морфологик тадқиқ қилиш;

$n^+CdS - nCdS - pSi$ ва $n^+CdS - nCdS - nSi$ -гетеротузилмаларининг вольт-фарада, қоронғулик ва ёруғлик вольтампер характеристикаларини тадқиқ қилиш;

$n^+CdS - nCdS - pSi$ ва $n^+CdS - nCdS - nSi$ -гетеротузилмаларида ток ўтиш механизмини таҳлил қилиш.

Тадқиқотнинг объекти вакуумда CdS қуқунини термик пуркаш йўли билан кремний тагликда олинган CdS юпка қатламлари, улар асосида яра-тилган $n^+CdS - nCdS - pSi$ - ва $n^+CdS - nCdS - nSi$ -гетеротузилмалардан иборат.

Тадқиқот предмети $n^+CdS - nCdS - pSi$ - ва $n^+CdS - nCdS - nSi$ -гетеро-тузилмалардаги ток ўтиш механизмлари ва уларнинг спектрал сезгирлик-ларининг шаклланиш жараёнларидан иборат.

Тадқиқот усуллари. Тадқиқотларни амалга оширишда вольтампер, вольтфарада ва спектрал характеристикаларни олишнинг синалган усул-ларидан, солиштирма қаршиликни ўлчашнинг стандарт бир зондли ва тўрт зондли усулларида, LINK ISIS (Япония) энергодисперс спектрометри (ЭДС)ни қўллаб Jeol-JXA-8900 микроаналитик комплексида бажариладиган морфологик тадқиқот услубларидан фойдаланилган.

Ишнинг илмий янгилigi қуйидагилардан иборат:

квазиёпиқ вакуум тизимида CdS қуқунини термик пуркаш йўли билан илк бор кремний тагликда CdS юпка қатламлари олиниб, улар асосида ички кучайтиришга ва созланувчи спектрал сезгирлик диапазонига эга бўлган инжекцияли фотоқабуллагич сифатида ишлайдиган $n^+CdS - nCdS - pSi$ - ва $n^+CdS - nCdS - nSi$ -гетеротузилмаларни тайёрлаш технологияси ишлаб чиқилган;

$n^+CdS - nCdS - pSi$ -гетеротузилма 389 – 1238 nm тўлқин узунликлар оралигида жойлашган кенг қамровли спектрал сезгирлик диапазонида «чўққиси» 475 nm тўлқин узунликда ётган битта катта ва мос равишда 618 nm, 740 nm ва 821,8 nm тўлқин узунликларда ётган учта кичик «чўққи»лар ҳар хил сатҳларга эга бўлган киришмалар мавжудлигини тасдиқлаган;

термодинамик мувозанат ҳолатида $nCdS - pSi$ -гетероўтиш чегарасида сирт потенциалнинг қиймати $\psi_s = 0,04$ eV га тенг бўлган акцептор типидagi манфий зарядланган сирт ҳолатлари ҳосил бўлиши, сирт потенциали ψ_s манфий кутбли бўлганда, сирт ҳолатлари зичлиги (N_{ss}) катта қийматларга, ψ_{ss} мусбат бўлганда эса кичик қийматлар қабул қилиши асосланган;

тўғри йўналишдаги кучланишнинг ортиши билан pSi -тагликдан база соҳасига электронлар инжекциясининг ортиши фототокнинг ортишига ва спектрал диапазоннинг қисқа тўлқин томонига кенгайиши ток ташувчиларнинг йиғилиш коэффиценти ортиши билан боғлиқлиги исботланган;

373 Kга қиздирилган $nCdS - pSi$ - ва $nCdS - nSi$ -гетеротузилмалар юзасига индийни вакуумда термик пуркаш ва кейинчалик 673 K ҳароратда 30 сек, давомида термик ишлов бериш йўли билан $nCdS$ юпқа қатлами устида кучли легирланган юпқа n^+CdS қатламни шакллантириш ва контакт олишнинг режимлари оптималлаштирилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

CdS кукунини 10^{-5} Torr вакуумда Si -тагликка термик пуркаш йўли билан $n^+CdS - nCdS - pSi$ ва $n^+CdS - nCdS - nSi$ -гетеротузилмалар олинган. Улар асосида ички кучайтиришга эга ва созланувчи спектрал сезгирлик диапазонида эга бўлган инжекцияли фотодиодлар тайёрланган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги солиштирма қаршилик, вольтампер, вольтфарада ва спектрал характеристикаларни ўлчашнинг синалган анъанавий усулларидан фойдаланиш билан таъминланган.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.

Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти шундан иборатки, олиб борилган тадқиқотлар инжекцияли фотодиодлар тўғрисидаги тушунчалар соҳасини янада кенгайтди.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти, созланувчи фотосезгирлик диапазонида ва фототокнинг инверсиясига эга бўлган инжекцияли фотодиодларни яратишда улардан фойдаланиш мумкинлигидадир.

Тадқиқот натижаларининг амалиётга жорий қилиниши. $n^+CdS - nCdS - pSi$ - ва $n^+CdS - nCdS - nSi$ -гетеротузилмалари асосидаги инжекцияли фотодиодлардаги ток ташиш механизмлари ҳамда уларнинг динамик ва статик характеристикаларини изоҳлайдиган электрон жараёнларни аниқлаш натижалари асосида:

юпқа қатлам юзасига контакт олишнинг технологик режимлари Т15МН-001 рақамли «Қопланган тиббиёт асбобларига металлоценлар ва фуллерид металлларнинг физик ва антибактериал хусусиятларини тадқиқ қилиш ва медицина асбобларида қўллаш имкониятларини аниқлаш» (2015-2017 й.й.) халқаро лойихасида юпқа қатламли намуналарга омик контакт олишда қўлланилган (Беларусь Миллий академияси Иссиқлик ва масса алмашинуви

институтининг 2017 йил 11 октябрдаги маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш нанотузилмали намуналарга контакт олиш ва намуналар ток характеристикаларининг физик хусусиятларини тадқиқ қилиш имконини берган;

кадмий сульфидига вакуумда магнетронли пуркаш йўли билан контакт олиш усули Ф2-ФА-Ф161-рақамли (2012-2016 й.й) «Эркин юпка қатламлар (Al, Cu, Ag, ва Cu-Si) ва хажмий кристаллар (W, WOn, TiN, CdTe и SiO₂) юзасида ион имплантацияси усули билан наноўлчамли гетеротузилмаларнинг шаклланиш механизмларини ва физик-кимёвий хусусиятларини ўрганиш» деган мавзудаги грант лойиҳасида наноқатламлар устида омик қаршилиги кичик бўлган контактлар олишда қўлланилган (Фан ва технологиялар агентлигининг 2017 йил 21 ноябрдаги ФТА-02-11/1150-рақамли маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш эркин юпка қатламлардан қайтган ва улар орқали ўтган электронлар энергия йўқотиш характеристик спектрларининг дисперсиясини аниқлаш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Диссертация ишининг асосий натижалари 3 та халқаро ва 2 та республика илмий-амалий конференцияларида баён этилган ва муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича жами 9 та илмий иш чоп қилинган бўлиб, шулардан 4 таси Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг диссертация ишларининг илмий натижаларини чоп этиш тавсия қилинган илмий нашрларда чоп этилган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертациянинг таркиби кириш, тўртта боб, хулоса, чоп этилган адабиётлар рўйхатидан иборат бўлиб, 20 та расм, 4 та жадвал ва 78 номдаги фойдаланилган адабиётлар рўйхатини ўз ичига олган ва унинг ҳажми 116 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

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

Диссертациянинг «**Инжекцияли фотоқабуллагичларнинг олиниши, хусусиятлари, асосий характеристикалари ва ривожланиш тамойиллари**» деб номланган биринчи бобида, турли тадқиқотчилар томонидан яратилган ИФҚларнинг турлари, уларнинг олиниши, хусусиятлари, асосий характеристикалари ва ривожланиш тамойиллари қараб чиқилган. Турли ярим ўтказгич материаллар асосида олинган инжекцияли диодлар, улардаги

ток ўтиш ва фототокнинг кучайиш механизмлари, шунингдек улар фотосезгирликларининг спектрал боғлиқликлари баён қилинган.

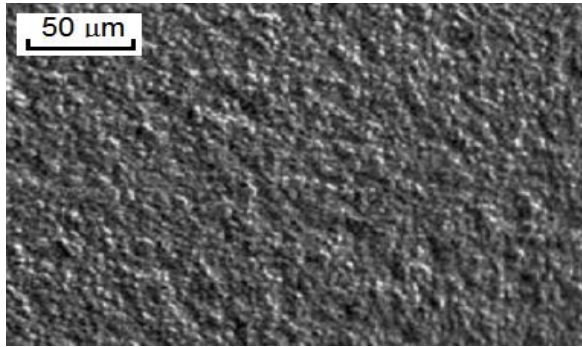
« $n^+CdS - nCdS - pSi$ ва $n^+CdS - nCdS - nSi$ -гетеротузилмалар асосида инжекцияли фотоқабуллагичларнинг намуналарини тайёрлаш ва уларнинг асосий параметрлари» деб номланган иккинчи бобда юпқа қатламларни олишнинг турли усуллари баён қилинган. Диссертация ишида тадқиқ қилинган ФҚларни яратиш учун қўлланилган $n^+CdS - nCdS - pSi$ - ва $n^+CdS - nCdS - nSi$ -гетеротузилмаларни шакллантиришда CdS қатламларини олишда вакуумли термик пуркаш усулининг афзалликлари кўрсатиб берилган. Кремний тагликлар сиртига ишлов беришнинг улар юзасида олинган CdS қатламларининг ҳамда улар асосида яратилган тузилмаларнинг электрофизикавий хусусиятларига таъсири кўрсатиб берилган. Шунингдек, CdS юпқа қатламларни олишнинг ва улар асосида $n^+CdS - nCdS - pSi$ - ва $n^+CdS - nCdS - nSi$ - гетеротузилма намуналарини яратишнинг технологик режимлари, ҳамда олинган CdS қатламларнинг параметрлари келтирилган.

Олинган юпқа қатламларни морфологик тадқиқ қилиш орқали, кристаллитларнинг ўлчамлари технологик режимларга, энг аввало тагликнинг ҳарорати T_s га кучли боғлиқ эканлиги кўрсатилган. Масалан, $T_s = 300^\circ C$ бўлганда тайёрланган CdS қатламлари кристаллитларининг ўлчамлари $\sim 3 \div 4 \mu m$ га тенг бўлиб, $w \approx 2 \mu m$ қалинликка эга бўлган юпқа қатламни бутунлай қоплаб олган бўлиб, уларнинг солиштирма қаршиликлари $\rho \geq (2-3) \cdot 10^6 \Omega \cdot cm$ га тенг бўлган n -ўтказувчанликка эга бўлган. Шундай тарзда олинган CdS юпқа қатламлари намуналарининг сиртини МИИ-4 микроскопи ёрдамида олиб борилган тадқиқотлар, юпқа қатламларнинг ўсиш йўналиши бўйича ориентацияланган ва азимут бўйича ориентацияланмаган зич тахланган устунсимон кристаллитлардан иборатлигини кўрсатган (1-расм).

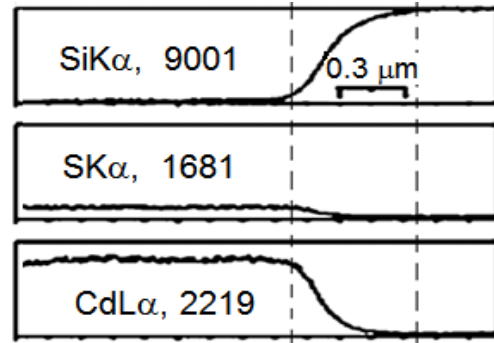
LINK ISIS ЭДС (энергодисперсион спектрометр) ёрдамида Jeol – JXA-8900 микроаналитик комплексида CdS қатламининг қалинлиги бўйича кимёвий элементларнинг тақсимоли аниқланган (2-расм). Ўлчаш шартлари: $U = 20 kV$, $I = 10 nA$. Эталонлар: табиий соф ҳолда топилган Cd ва Si, S учун эса – синтетик яратилган FeS; бунда ўлчаш хатолиги $\pm 2.0\%$ ни ташкил этади. ИФД тузилмалари намуналарини тайёрлашда тузилмаларга контактлар, орқа томондан Si-тагликка яхлит, юза томондан эса n^+CdS қатлам юзасига «П» кўринишда индий (In) ни вакуумда пуркаш йўли билан олинган. 50 \AA қалинликка эга бўлган кучли легирланган n^+CdS қатлам сиртига тагликнинг ҳарорати $373 K$ бўлган ҳолда қолдиқ босим $10^{-5} Torr$ га тенг бўлган вакуумда $25 \div 30 s$ давомида In нинг юпқа қатламини пуркаш ва кейин $300 s$ давомида $673 K$ да термик ишлов бериш йўли билан олинган. Сўнгра ушбу кучли легирланган n^+CdS -қатлам сиртида юзаси $3 mm^2$ га тенг бўлган «П» кўринишдаги омик контакт худди шундай In ни вакуумда пуркаш йўли билан олинган.

Бўлиниш чегарасидаги ҳолат ҳақидаги маълумотларни олиш учун частотали вольтфарада характеристика (ВФХ) усули қўлланилган. Тузилмаларнинг ВФХ тўғри ва тесқари силжиш кучланишларида $f = (0,4-50) kГц$ частоталарда ўлчанди. Бундай частоталардаги $C(U)$ -характеристикалар бир

хил шаклга эга бўлганлиги учун фақатгина $f = 10$ кГц частота учун битта характеристика келтирилди.

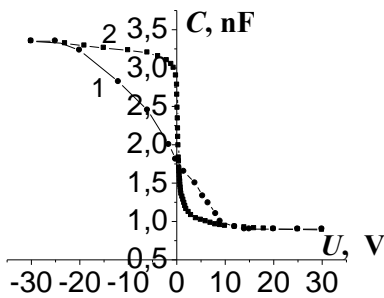


1-расм. CdS эпитаксиал юпка қатлам сиртининг микросурати

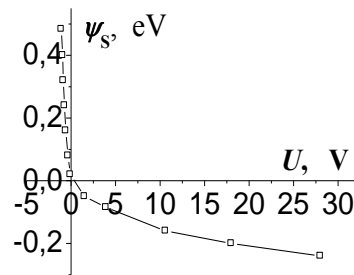


2-расм. pSi-тагликка ўтқазилган nCdS қатламнинг қалинлиги бўйича кимёвий элементларнинг тақсимооти

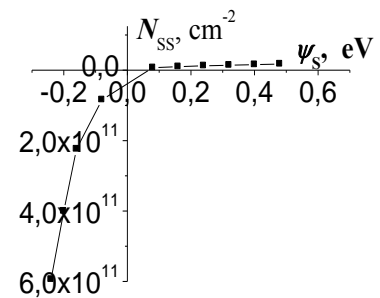
Гетеротузилмалардаги сирт ҳолатлари зичлиги экспериментал $C(U)$ -характеристиканинг сиғимнинг айнан бир хил қийматларида $N_{SS} = \Delta U \cdot C / q$ бўйича ҳисобланган характеристикага нисбатан силжишидан аниқланган. 3-расмда pSi – nCdS – n⁺CdS-гетеротузилманинг экспериментал ва (1-эгри чизик) ва ҳисобланган (2-эгри чизик) $C(U)$ -характеристикалари келтирилган. Экспириментал $C(U)$ -характеристика (3-расм, 1-эгри чизик) хона ҳароратида тест частотасининг $f = 10$ kHz қийматида олинган, чунки шу частотада М(металл) – Д(диэлектрик) – Я(ярим ўтказгич) тузилмасининг $C(U)$ -характеристикаси анча яққол намоён бўлади. Бу эса гетероўтишда мавжуд бўлган сирт ҳолатларининг зичлиги N_{SS} сушт кечадиган сирт ҳолатлари эканлигини англатади. (ψ_s) нинг экспериментал аниқланган кучланиш U га боғлиқлиги 4-расмда, N_{SS} нинг ψ_s га боғлиқлиги эса 5-расмда келтирилган.



3-расм. pSi – nCdS – n⁺CdS-гетеротузилманинг $C(U)$ -характеристикаси



4-расм. Сирт потенциалининг қўйилган кучланишга боғлиқлиги

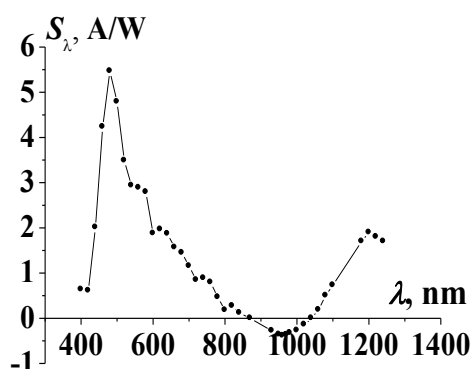


5-расм. Сирт ҳолатлари эффе́ктив зичлигининг сирт потенциалга боғлиқлиги

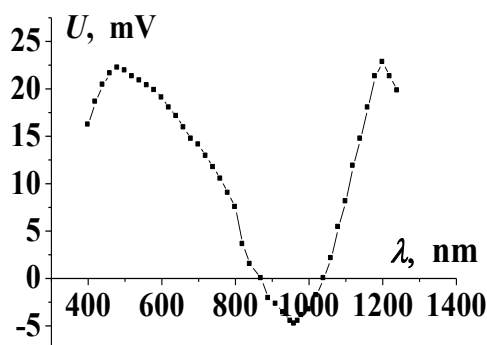
«pSi – nCdS – n⁺CdS ва nSi – nCdS – n⁺CdS-гетеротузилмаларнинг спектрал характеристикалари» деб номланган учинчи бобда pSi – nCdS – n⁺CdS-гетеротузилманинг қоронғилик ва ёруғликдаги, шунингдек силжитиш кучланишининг тўғри ва тескари йўналишларидаги фототокларнинг спектрал боғлиқлик тадқиқотларидан олинган натижалар келтирилган.

Тузилмалар фотосезгирлигининг спектрал боғлиқлиги хона ҳароратида (300 К) 3MP-3 монохроматорида ўлчанди. Бунда нурланиш манбаи сифатида йўл қўйиладиган энг кам қувват режимида ишлайдиган ва ёруғлик доирасининг марказида 53000 lm ёруғлик оқимини ва 120 Mcd/m² гача бўлган ёрқинликни таъминлайдиган ДКСШ-1000 типдаги ксенон лампа хизмат қилди. Лампанинг нурланиши кварц дарчали РТЭ-9 термоэлементи ёрдамида абсолют бирликларда градуировка қилинган. ДКСШ-1000 лампаси ультрабинафша ва кўзга кўринадиган тўлқин узунликлар соҳасида яхлит спектрга эга.

6-расмда $n^+CdS - nCdS - pSi$ -гетеротузилмали типик фотодиод учун токнинг тўғри йўналишида силжиш кучланиши бўлмаган ҳолатда фотосезгирликнинг спектрал боғлиқлиги (S_λ) келтирилган. Бунда токнинг мусбат йўналиш деб pSi тағлиқка «+» потенциал, аксинча «-» потенциал қўйилган ҳолат қабул қилинган. 6-расмдан кўринадики, спектрал сезгирлик эгри чизиғида $\lambda = 389 - 1238,46$ nm тўлқин узунликлар оралиғида бир қатор хусусиятлар мавжуд. Яъни тузилманинг спектрал сезгирлиги $\lambda = 389$ nm дан бошланади ва кескин ортиб бориб, $\lambda = 475$ nm да ўзининг максимумига («чўққи»сига) эришади ва бунда спектрал сезгирлик $S_\lambda = 5,49$ A/W қийматга эга бўлади. Шундан кейин S_λ аста-секин камайиб бориб, $\lambda = 872,7$ nm тўлқин узунликда нолгача тушади.



6-расм. $pSi - nCdS - n^+CdS$ -гетеротузилма фотосезгирлиги (S_λ) нинг силжитиш кучланиши бўлмаган ҳолатдаги спектрал боғлиқлиги



7-расм. $pSi - nCdS - n^+CdS$ -гетеротузилма фото-ЭЮК (U_{ph}) нинг спектрал боғлиқлиги

Бундан ташқари яна, фотосезгирликнинг пасайиш тарафида $\lambda = 541,84 - 578,56$ nm ораликда поғоналар ва мос равишда $\lambda = 618$ nm, $\lambda = 740$ nm ва $\lambda = 821,8$ nm тўлқин узунликларида учта «чўққи» мавжуд бўлиб, улар CdS қатламларида шу тўлқин узунликларга мос энергетик сатҳларга эга бўлган киришмаларнинг мавжудлиги билан тушунтирилади. Шундан сўнг S_λ нол қийматдан бошлаб, ишорасини ўзгартирган ҳолда тескари йўналишда ўса бошлайди ва $\lambda = 961,8$ nm да манфий максимумга эришиб, $S_\lambda = 0,4$ A/W га тенг бўлади. Ундан кейин S_λ нинг силлиқ пасайиши ва $\lambda = 1042,8$ nm да нолга эришиб яна $\lambda = 1200,3$ nm да ишорасини ўзгартириб, ўсиши ва кейинчалик арзимаган камайиши кузатилади.

Аввалги бўлимда баён қилинган спектрал сезгирликнинг ҳолатини тушунтириш мақсадида тузилмадаги фото-ЭЮК(U_{ph}) нинг спектрал боғлиқлиги 7-расмда келтирилган ва тўлқин узунликка боғлиқлиги $U(\lambda)$ ўрганилган. Натижада $S_\lambda(\lambda)$ ва $U(\lambda)$ ларни ўзаро таққослаш уларнинг бир бирига мос кўринишга эга эканлигини кўрсатди. Уларда λ нинг бир хил қийматларига мос келган максимум ва минимумларда умумий экстремал нуқталар мавжуд бўлиб, бу ҳолат $S_\lambda(\lambda)$ нинг кўриниши $U(\lambda)$ га боғлиқ дейишга асос бўла олади. $\lambda = 475 \text{ nm}$ тўлқин узунликда катта чўққининг пайдо бўлиши изотип $n^+CdS - nCdS$ -ўтиш соҳасида номувозанатланган ток ташувчиларнинг юзага келиши ва йўқотишларсиз бўлиниши билан боғлиқдир.

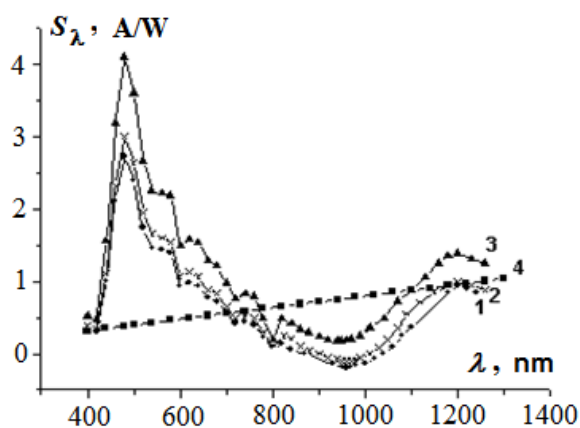
Фотосезгирликнинг ишора ўзгаргандан кейинги ортиши фототашувчиларнинг бўлинишида $pSi - nCdS$ -гетероўтишнинг ҳиссаси билан боғлиқ ҳолда, бундан кейинги камайишда ишоранинг ўзгариши ва $\lambda = 1200,3 \text{ nm}$ ($S_\lambda = 0,96 \text{ A/W}$ бўлганда) да максимумнинг пайдо бўлиши, ток ташувчиларнинг диффузияси ва дрейфи жараёнига $pSi - nCdS$ -гетероўтиш улушининг устун келиши билан тушунтирилади. $\lambda = 1200,3 \text{ nm}$ даги фотосезгирлик катталиги $pSi - nCdS$ -гетероўтиш нурланиши натижасида генерацияланган электрон-ковак жуфтликларни самарали ажратишини кўрсатади. Бироқ бунда $\lambda = 1200,3 \text{ nm}$ даги спектрал сезгирлик $\lambda = 475 \text{ nm}$ дагидан сезиларли даражада кичик бўлган. Бу ҳолат $pSi - nCdS$ -гетероўтишнинг эффективлиги изотип $n^+CdS - nCdS$ -ўтишдагига қараганда ёмонроқ эканлигини кўрсатади.

Изотип $n^+CdS - nCdS$ -ўтишдан инжекцияланган ток ташувчилар фото-ЭЮК таъсирида, электронейтралликни таъминлаш учун пайдо бўладиган ковакларнинг диффузион оқимини ҳосил қиладилар. Спектрал сезгирликнинг максимум ($\lambda = 475 \text{ nm}$) даги катталиги электромагнит нурланишнинг ушбу тўлқин узунликдаги идеал ФКнинг спектрал сезгирлигидан ($S_\lambda = 0,6 \text{ A/W}$) анчагина ортиқ экани аниқланган (8-расм). Бу ерда идеал фотоқабуллагич деб, тушадиган барча фотонлар ютилиб, электрон-ковак жуфтлиги ҳосил бўлиб, йўқотишларсиз ҳажмий заряд майдони ҳисобига бўлинадиган фотоқабуллагичга айтилади. S_λ нинг кузатилган ортиши, бундай тузилмада бирламчи фототокнинг кучайиши рўй беради, деб тасдиқлашга имкон беради. Бундай кучайтиришнинг механизми икки хил сабабга кўра, яъни параметрик ёки мусбат тескари алоқа туфайли бўлиши мумкин.

Бундан ташқари, учинчи бобда $pSi - nCdS - n^+CdS$ -гетеротузилмага силжитиш кучланиши берилмаганда ва токнинг тескари йўналишида турлича катталиқдаги силжитиш кучланиши берилгандаги спектрал сезгирлиги қараб чиқилган (9-расм). Ушбу расмдан кўриниб турибдики, силжитиш кучланиши бўлмаганида спектрал сезгирлик диапазони $\lambda = 350-1350 \text{ nm}$ тўлқин узунликлар соҳасида ётади ҳамда фототок манфий қийматларга эга бўладиган $\lambda_1 \approx 480 \text{ nm}$ ва $\lambda_2 \approx 1248 \text{ nm}$ да энг юқори қийматларга эришади.

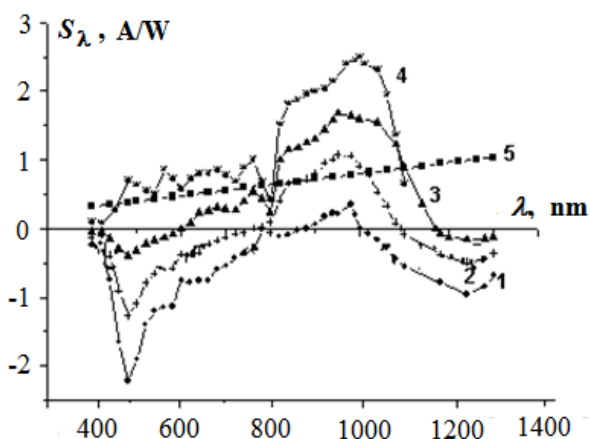
Фототокнинг спектрал боғлиқликдаги инверсия нуқталари тузилманинг базасида бир-бирига қарама-қарши йўналган дрейф ва фототоклар базанинг маълум бир d_λ чуқурлигида бир-бирини тўлиқ мувозанатлайди, деб тасдиқлашга асос бўлади. Базанинг бу қалинлиги λ тўлқин узунликка эга бўлган электромагнит нурланишнинг ютилиш чуқурлигига мос келади.

Фотосезгирлик инверсия нуқталарининг қисқа тўлқин узунликлари томонига силжиши биполяр дрейф тоқининг катталиги билан аниқланади ва бу ток асосан электронларнинг $n\text{CdS} - p\text{Si}$ -гетероўтишдан базага инжекцияси билан боғлиқ бўлади. Инверсия нуқталарини тескари йўналишда кичик силжитиш кучланишларни бериш билан амалга оширилади. Тажрибалар кўрсатадики, $U \geq 8,5 \text{ mV}$ га тенг ва ундан юқори кучланиш берилганда тузилмадаги биполяр дрейф тоқи асосий ҳал қилувчи бўлиб қолади ва, шунинг учун ҳам, фотосезгирлик спектрида фототок ишорасининг инверсияси пайдо бўлмайди.



1– силжиш кучланиши бўлмагандаги спектрал сезгирлик, 2– 0,5 мВ, 3– 2 мВ, 4– идеал фотоқабуллагич учун

8-расм. $n^+\text{CdS} - n\text{CdS} - p\text{Si}$ -гетеротузилма фотосезгирлигининг тўғри йўналишдаги турли қийматлардаги силжиш кучланиши берилгандаги ва у бўлмагандаги спектрал боғлиқлиги



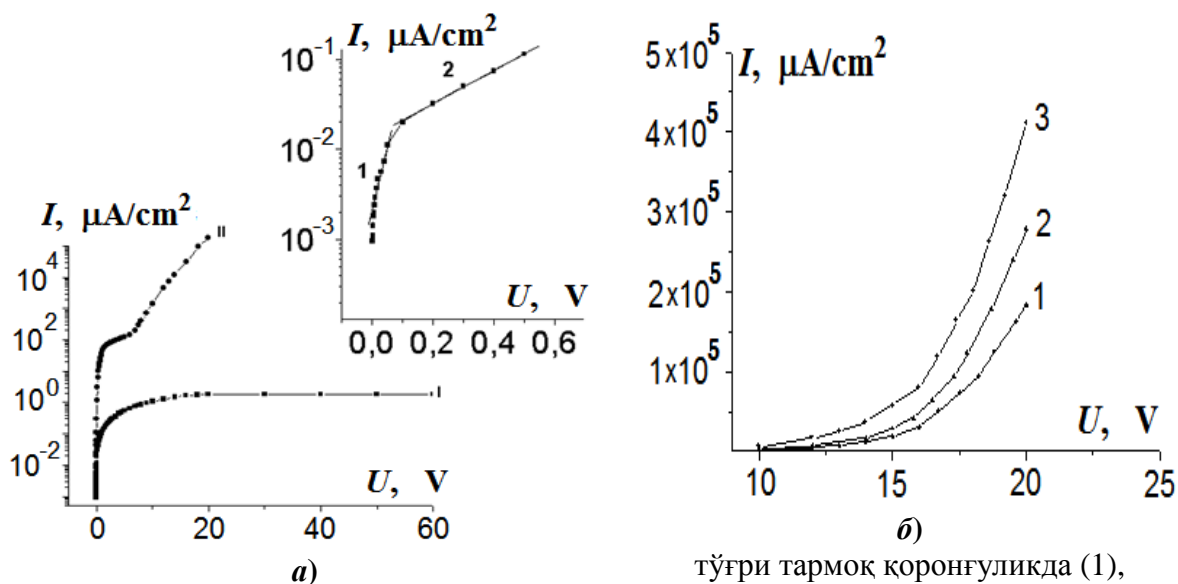
1– силжиш кучланиши бўлмагандаги спектрал сезгирлик, 2– 4 мВ, 3– 6 мВ, 4– 8.5 мВ, 5– идеал фотоқабуллагич учун

9-расм. $n^+\text{CdS} - n\text{CdS} - p\text{Si}$ -гетеротузилма фотосезгирлигининг тескари йўналишдаги турли қийматлардаги силжиш кучланиши берилгандаги ва у бўлмагандаги спектрал боғлиқлиги

« $n^+\text{CdS} - n\text{CdS} - p\text{Si}$ - ва $n^+\text{CdS} - n\text{CdS} - n\text{Si}$ -гетеротузилмаларнинг вольтампер характеристикалари ва ток ўтказиш механизмлари» деб номланган тўртинчи бобда $n^+\text{CdS} - n\text{CdS} - p\text{Si}$ - ва $n^+\text{CdS} - n\text{CdS} - n\text{Si}$ -гетеротузилмаларнинг қоронғилик ва ёруғликдаги ВАХлари ва бирламчи ток ўтказиш механизмлари тадқиқ қилинган.

Биз тайёрлаган $p\text{Si} - n\text{CdS} - n^+\text{CdS}$ -гетеротузилмаларнинг ВАХлари қоронғуликда, ҳамда $E = 0,1 - 50 \text{ lux}$ ёритилганликда хона ҳароратида (300К), токнинг тўғри ва тескари йўналишларида ўлчанди. Тузилмаларни ёритиш икки усулда: $(0,01 - 0,75) \text{ mW/cm}^2$ қувват интервалида $\lambda = 0,625 \mu\text{m}$ тўлқин узунликли лазер (ЛГ-75 типдаги газ лазери) нури билан, шунингдек кўрсаткичлари оқ нур эталон лампасига деярли мос келадиган чўғлинма лампа орқали амалга оширилди. Бунда электромагнит нурланиш спектрининг кўзга кўринадиган соҳасида бир люмен $9,1 \cdot 10^{-3} \text{ W}$ қувватга тенглигини эслатиб ўтиш лозим.

10-расмда $pSi - nCdS - n^+CdS$ -гетеротузилма ВАХларининг тўғри ва тескари тармоқлари ярим логарифм масштабларда келтирилган. Юқорида таъкидлаб ўтилганидек, тузилмага тўғри йўналишда кучланиш берилганда pSi -контактига « + » қутбли потенциал, тескари йўналишда « - » потенциал берилади. ВАХ нинг таҳлили тузилма тўғрилаш хусусиятига эга эканлигини, унинг ($U = 20$ В бўлган белгиланган силжитиш кучланишида тўғри ва тескари тоқларнинг нисбатидан аниқланадиган) тўғрилаш коэффициенти $K \approx 10^5$ қийматга эга эканлигини кўрсатади.



а) I – тўғри тармоқ, II – тескари тармоқ. Жойланмада ВАХ тескари тармоғининг биринчи (1) ва иккинчи (2) хуудлари кўрсатилган

б) тўғри тармоқ қоронғуликда (1), $E = 10$ lux оқ нур билан ёритилганда (2) ва тўлқин узунлиги $\lambda = 0,625$ nm ва қуввати $P = 100 \mu W/cm^2$ бўлган лазер нури билан ёритилганда (3)

10-расм. $pSi - nCdS - n^+CdS$ -гетеротузилманинг вольтампер характеристикаси

Таҳлилни қулайлаштириш мақсадида 10а-расмда тузилма ВАХининг тескари тармоғи тоқнинг мусбат қийматлари учун келтирилган. ВАХ тескари тармоғининг таҳлили тоқ зичлигининг $I \approx (1,3 \cdot 10^{-9} \div 1,1 \cdot 10^{-8})$ А/см² қийматлари оралиғида тузилмада термоэлектрон тоқлар оқишини кўрсатади. Бунда термоэлектрон тоқ қуйидаги формула билан тавсифланади:

$$I = AT^2 e^{-\frac{V_D}{kT}} \left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right), \quad (1)$$

бу ерда A – Ричардсон доимийси $A = 12 \cdot 10^5$ А/(м²·К²); V_D – потенциал тўсиқ баландлиги; U – силжиш кучланиши; T – Кельвин шкаласи бўйича ҳарорат; k – Больцман доимийси.

Тоқ зичлигининг $I \approx (1,3 \cdot 10^{-8} \div 2, 2 \cdot 10^{-7})$ А/см² оралиғида ВАХ $I = I_{02} \cdot \exp(qU/ckT)$ кўринишдаги экспоненциал боғлиқлик билан тавсифланиб, ундаги экспонента кўрсаткичи $c_2 = 8,2$ га, экспонента олди кўпайтгичи эса $I_{02} = 1,8 \cdot 10^{-8}$ А/см² га тенг бўлиб, Стафеев В.И. назариясига кўра, базанинг қаршилиги анчагина катта бўлган тузилмаларда диффузион тоқ оқиб ўтади ва у қуйидаги аналитик ифода билан тавсифланади:

$$I = I_{02} \cdot \exp(qU/c_2kT), \quad (2)$$

бу ерда

$$c_2 = (2b + chw/L + 1)/(b + 1), \quad (3)$$

бу ерда $b = \mu_n/\mu_p$ – электрон ва коваклар ҳаракатчанлигининг нисбати, w – база қалинлиги.

ВАХ нинг иккинчи соҳасидан аниқланадиган $c_2 = 8.2$ экспериментал қийматини (3) формулага қўйиб, $b = 38$, $w = 2 \mu\text{m}$, $\mu_n = 285 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ и $\mu_p = 7 \div 8 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ қийматларида ковакларнинг диффузия узунлиги $L_p = 0,45 \mu\text{m}$, $\mu_p\tau_p = 7,8 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{V}$ (коваклар яшаш вақтининг ҳаракатчанликка кўпайтмаси) ни топамиз. I_{02} катталиқ тахминан токка тенг бўлганлиги учун база соҳасининг ўтказувчанлиги инжекция туфайли икки мартага ортади, яъни база қалинлигининг мувозанатдаги ва номувозанатдаги қалинликлари тенглашиб, инжекциянинг юқори даражаларига ўтиш бошланади.

Бунда $I_{02} = 1,8 \cdot 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ қиймат ВАХнинг иккинчи соҳаси бошланғич (0,1 V) кучланишига мос келади деб ҳисоблаб, базанинг солиштирма қаршилиги $\rho = 2,6 \cdot 10^{10} \Omega\cdot\text{cm}$ га тенглигини топамиз, бу эса $n\text{CdS}$ қатламнинг $3 \cdot 10^{10} \Omega\cdot\text{cm}$ га тенг қиймати билан яхшигина мос келади. Электронлар инжекциясининг мавжудлигини $\mu_p\tau_p = 7,8 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{V}$ кўпайтмани ҳисоблаш орқали аниқланадиган бошқа қийматлар ҳам тасдиқлайди. Бунинг учун силжитиш кучланиши бўлмаган ҳолат учун релаксация эгри чизиклари олинган. Бундай эгри чизикларнинг кўтарилиши ва пасайиши бўйича релаксациянинг $\tau = 7 \cdot 10^{-8} \text{ c}$ ва $\tau = 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ c}$ га тенг вақт доимийлари аниқланган. Ундан кейин бу катталиқлар ковакларнинг яшаш вақтига тенг деб фараз қилиниб, $\mu_p\tau_p$ кўпайтма бўйича $\mu_p = 1,1 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ва $\mu_p = 0,78 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ қийматларни топамиз.

Силжитиш кучланиши (U) нинг кейинги ортиши билан $p\text{Si} - n\text{CdS}$ – гетероўтишнинг хусусиятлари ўзгариб боради – у ноидеалга айланиб, $p\text{Si}$ томонга ковакларни ўтказиб юбора бошлайди. Бунда $n^+\text{CdS} - n\text{CdS}$ -изотип ўтиш деярли идеаллигича қолади ва унда тескари силжиш кучланишининг ортиши билан коваклар учун потенциал тўсиқ V_b ортади. Шунинг учун $n^+\text{CdS} - n\text{CdS}$ -изотип ўтиш атрофида номувозанат коваклар концентрацияси ошиб боради, коваклар концентрациясининг градиенти эса, $p\text{Si} - n\text{CdS}$ -гетероўтиш яқинидагидан юқори бўлади. Бу ковакларнинг $p\text{Si} - n\text{CdS}$ томонга йўналган диффузион оқимини пайдо қилади. Бу диффузион ва дрейф оқимлари гетероўтиш томондан келаётган диффузион оқимларга қарши йўналган бўлади.

Бирламчи фототокнинг кучайишини исботлаш мақсадида $n\text{CdS} - p\text{Si}$ -гетероўтишнинг қоронғилиқ ва ёруғлик ВАХ лари тадқиқ қилинди (10б-расм). Ёруғлик ВАХлари ёритилганлик (E) нинг турли даражаларида оқ ёруғлик билан ва $\lambda = 625 \text{ nm}$ тўлқин узунликли лазер нурланишининг турлича қувват (P) ларида ўлчанди. Масалан, қуввати $P = 10 \mu\text{W/cm}^2$ бўлган лазер нурлари билан ёритилганда $S_\lambda = 2,3 \cdot 10^4 \text{ A/W}$ га, хона ҳароратида $E = 0,1 \text{ lux}$ ёритилганликка эга бўлган оқ ёруғлик билан нурлантирилганида интеграл сезгирлик $S_{\text{int}} = 2,75 \cdot 10^4 \text{ A/lm}$ ($3 \cdot 10^6 \text{ A/W}$) га тенг бўлган (1-жадвалга қаранг).

Юқорида таъкидлаб ўтилганидек, тадқиқ қилинаётган тузилма ёритилганликнинг кичик даражаларига ҳам ўта сезгир бўлиб, у спектрал ва интеграл сезгирликнинг ёруғлик ютилишининг хусусий соҳасида ҳам, аралашмали (киришмали) соҳасида ҳам жуда катта қийматларига эга бўлади (1-жадвалга қаранг). Бундан ташқари, оқ ёруғликнинг ёритилганлик даражаси ва лазер нурланиши қуввати даражасининг ортиши билан силжитиш кучланишининг бир хил катталигида ҳам S_{int} нинг, ҳам S_{λ} нинг камайиши рўй беради. Тўғри йўналишдаги силжитиш кучланишининг ортиши билан эса спектрал ва интеграл сезгирликнинг қиймати ортиб боради.

1-жадвал

Фототок (I_{ph}), интеграл сезгирлик (S_{int}), спектрал сезгирлик (S_{λ}) ларнинг ёритилганликка (E_{lux}), лазер нурланиши қувватига (P) ва силжитиш кучланишига (U) боғлиқлиги

| Оқ нур | | | | | Лазер нурланиши | | |
|--------------|--------|------------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------------|----------------------------|
| E (lux) | U, V | $I_{ph}, \frac{\mu A}{cm^2}$ | $S_{int}, \frac{A}{lm}$ | $S_{int}, \frac{A}{W}$ | $P, \frac{\mu W}{cm^2}$ | $I_{ph}, \frac{\mu A}{cm^2}$ | $S_{\lambda}, \frac{A}{W}$ |
| 0.1 | 5 | 148.6 | 14.8 | $0.2 \cdot 10^4$ | 10 | 133 | 13.3 |
| | 10 | 2354.4 | 235.44 | $2.6 \cdot 10^4$ | | 2000 | 200 |
| | 14 | 17000 | 1700 | $1.87 \cdot 10^5$ | | 11200 | 1120 |
| | 20 | 274500 | 27450 | $3 \cdot 10^6$ | | 233560 | 23356 |
| 1 | 5 | 178 | 1,78 | $0.2 \cdot 10^3$ | 50 | 369.2 | 7.4 |
| | 10 | 3020 | 30,2 | $3.32 \cdot 10^3$ | | 6075.6 | 121.5 |
| | 14 | 18000 | 180 | $1.98 \cdot 10^4$ | | 38937.1 | 778.7 |
| | 20 | 310220 | 3102 | $3.4 \cdot 10^5$ | | 416333 | 8326 |
| 10 | 5 | 184 | 0.184 | $0.2 \cdot 10^2$ | 100 | 456 | 4.56 |
| | 10 | 3600 | 3.6 | $4 \cdot 10^2$ | | 7524 | 75.24 |
| | 14 | 21000 | 21 | $2.31 \cdot 10^3$ | | 44025 | 440.25 |
| | 20 | 410500 | 410 | $4.5 \cdot 10^4$ | | 448320 | 4483.2 |

Ёруғлик ВАХларининг оқ ёруғлик ёритилганлигининг турли даражалари ва турлича қувватдаги лазер нурланишида ўтказилган таҳлили шуни кўрсатдики, улар шакл бўйича ўхшаш ва силжиш токига нисбатан бир хил қонуниятга эга бўлиб (10а-расмга қаралсин), интеграл ва спектрал сезгирликнинг максимал қиймати ВАХ тўғри тармоғининг тўртинчи соҳасига тўғри келар экан.

ВАХнинг тўртинчи соҳасида ток силжитиш кучланишига даражали боғланиш билан тавсифланиб, номувозанат ташувчиларнинг рекомбинацияси, асосан, ичида электрон алмашинуви рўй берадиган мураккаб комплексларда содир бўлиб, бунда дрейф токи асосий аниқловчи ток бўлиб ҳисобланади. Бу эса бирламчи фототок кучайишининг асосий омили амбиполяр ҳаракатчанликдир, деб тасдиқлашимизга асос бўлади.

Амбиполяр ҳаракатчанликнинг модуляцияси чуқур ёпишқоқлик сатҳларининг бўшаб қолиши натижасида содир бўлади. Баҳолашлар қоронғилик-

да тўртинчи соҳада дрейфнинг биполяр тезлиги $v_a \approx 5,6 \cdot 10^6$ cm/s эканлигини кўрсатди. Биполяр дрейф қийматининг бундай катталиги $\tau \approx 10^{-8}$ s (электрон-ковак плазмасининг яшаш вақти) биполяр дрейфнинг $L_{dr} \approx 5,6 \cdot 10^{-2}$ cm узунлигини таъминлайди, бу эса биполяр диффузия узунлиги ($L = 0,24$ μ m) дан уч тартибдан ортиқроқ каттадир. Бу баҳолаш, биринчидан, ВАХнинг тўртинчи соҳасида дрейф механизми устунликка эгаллигини тўлиқ тасдиқлайди, иккинчидан, ёруғлик берилганда, айниқса киришма соҳасида, биполяр дрейф тезлигининг модуляцияланишини, яъни унинг камайишини кўрсатади.

Хулоса қилиб айтганда, ток зичлигининг ортиши билан $pSi - nCdS - n^+CdS$ -тузилмали ИФД базаси хоссаларининг ўзгариши содир бўлади, бу эса тадқиқ қилинаётган тузилмада ток оқимининг, силжитиш кучланиши ва ток ташиш механизмларига боғлиқ ҳолда, ўзгаришига олиб келади.

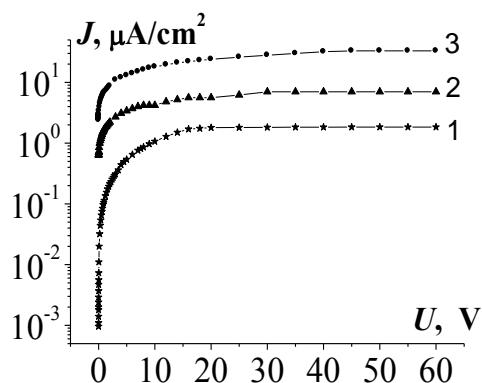
Бундай жараёнлар натижасида биполяр диффузия μ_a ва дрейф μ_1 харакатчанликлари, биполяр диффузия L_a ва дрейф L_{dr} узунликлари, шунингдек электрон-ковак плазмасининг яшаш вақти каби фундаментал катталиклар чуқур ўзгаришларга учрайди. Ярим ўтказгич материаллар микропараметрларининг бундай тубдан ўзгаришлари тузилма базасида кучли нобиржинслилик бўлганида ва идеал контакт яқинида асосий бўлмаган ташувчилар – ковакларнинг кучли нобиржинслилиги пайдо бўлганида рўй беради, улар электрон-ковак плазмаси ғалаёнлари релаксациясига генерация-рекомбинация жараёнлари улушини диффузия-дрейф оқимларининг релаксациясига нисбатан ҳисобга олмаса ҳам бўлишига имкон беради.

Бундай жараён коваклар биполяр дрейфининг узунлиги катта қийматларга эга бўлганида ($L_{dr} \gg L_a$ да) мумкин бўлади. Биполяр дрейфнинг бундай қийматида ёруғлик билан озгина нурлантириш ҳам бирламчи фототокнинг кучайиш жараёни ҳисобига дрейф токининг кескин ортишига олиб келади, бу эса интеграл ва спектрал сезгирлик қийматлари катталигини таъминлайди.

Ток зичлиги $I = 10^{-2} \div 5 \cdot 10^{-4}$ A/cm² бўлганида тузилмада «узун» диодлар режими амалга ошиши ва бунда S_{int} билан S_λ катталиклар энг катта қийматларга эришиши аниқланган. Масалан, ёритилганликнинг $E = 0,1$ lux қийматида $S_{int} = 2,8 \cdot 10^4$ A/lm ($3 \cdot 10^6$ A/W) га ва $\lambda = 625$ nm ли лазер нурланиши билан ёритилганда $S_\lambda = 2,3 \cdot 10^4$ A/W бўлади. Интеграл ва спектрал сезгир-ликнинг бу катталиклари хона ҳарорати учун энг юқори натижа ҳисобланади.

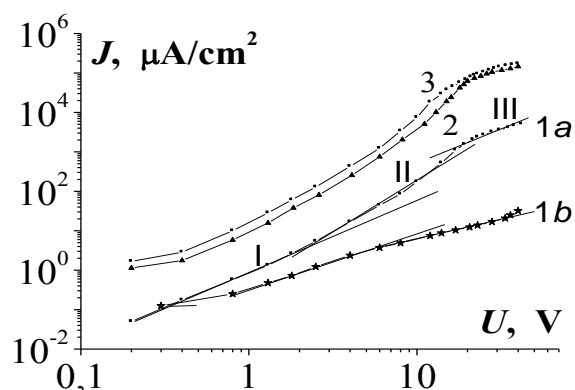
Оқ ёруғлик билан ёритилганда ҳамда тўлқин узунлиги $\lambda = 0,625$ μ m ва қуввати $P = 10$ μ W/cm² бўлган лазер нурлари билан ёритилганда 11- расмда келтирилган ВАХнинг чизиклига яқин кўринишдаги участкасининг ҳолати катта қизиқиш уйғотади. Расмдан келиб чиқадики, ёруғлик ва қоронғилик ВАХлари бир хил қонуниятга эга бўлиб, фақатгина токнинг катталиги бўйича фарқ қилар экан. Улар орасидаги фарқ лазер билан ёритилганда $\sim 1,5$ тартибга тенг бўлиб, оқ нур билан ёритилганда эса, ток қиймати тўрт марта катта бўлади. Мисол учун, лазер нури билан ёритилганда силжитиш кучланиши $U = 60$ V бўлганда $S_\lambda \approx 3,28$ A/W га тенг бўлиб, шу $U = 60$ V кучланишда $E = 0,1$ lux бўлган оқ ёруғлик билан ёритилганда эса интеграл сезгирлик $S_{int} \approx 0,69$ A/lm (~ 76 A/W) қийматга эга бўлади. Бу натижалар

(2-жадвалга қаралсин) шу нарсани кўрсатадики, лазер ва оқ ёруғлик билан ёритилганда ВАХнинг чизиклига яқин бўлган соҳасида бирламчи фототокнинг кучайиши содир бўлади, бу эса идеал ФҚнинг тўлқин узунлиги $\lambda = 0,625 \mu\text{m}$ ва қуввати $P = 10 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ бўлган лазер нури билан ёритилгандаги фотосезгирлигидан ($S_\lambda \approx 0,5 \text{ A}/\text{W}$) 6 марта катта, ёритилганлиги $E = 0,1 \text{ lux}$ бўлган оқ ёруғлик билан ёритилганда эса, идеал ФҚнинг $\lambda = 0,625 \mu\text{m}$ даги спектрал фотосезгирлигига қараганда деярли 20 марта катта фотосезгирликка эга бўлади.



тескари тармоқ қоронғиликда (1); тескари тармоқ $E = 0,1 \text{ lux}$ оқ нур билан ёритилганда (2); тескари тармоқ $\lambda = 625 \text{ nm}$, қуввати $P = 10 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ бўлган лазер нури билан ёритилганда (3)

11-расм. $n^+\text{CdS}-n\text{CdS}-n\text{Si}$ -гетеротузилманинг қоронғилик ва ёруғлик ВАХлари ярим логарифмик масштабда



қоронғиликда (1a эгри чизик – тўғри тармоқ, 1b эгри чизик – тескари тармоқ); $E = 4 \cdot 10^{-1} \text{ lux}$ оқ нур билан ёритилганда (II эгри чизик, тўғри тармоқ) ва $\lambda = 625 \text{ nm}$ ва қуввати $P = 10 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ бўлган лазер нури билан ёритилганда (III эгри чизик, тескари тармоқ)

12-расм. $n^+\text{CdS}-n\text{CdS}-n\text{Si}$ -гетеротузилманинг қоронғилик ва ёруғлик ВАХлари иккиланма логарифмик масштабда

2-жадвал

Фототок (I_{ph}) нинг, интеграл сезгирлик (S_{int}) нинг, спектрал сезгирлик (S_λ) нинг силжитиш кучланиши (U) га боғлиқлиги

| Оқ ёруғликда | | | | | Лазер нурида | | |
|--------------|---------|--|--|---|--------------------------------------|--|--|
| E (lux) | U , V | $I_f, \frac{\mu\text{A}}{\text{cm}^2}$ | $S_{\text{int}}, \frac{\text{A}}{\text{lm}}$ | $S_{\text{int}}, \frac{\text{A}}{\text{W}}$ | $P, \frac{\mu\text{W}}{\text{cm}^2}$ | $I_f, \frac{\mu\text{A}}{\text{cm}^2}$ | $S_\lambda, \frac{\text{A}}{\text{W}}$ |
| 0.1 | 5 | 3.65 | 0.365 | 40.1 | 10 | 13.1 | 1.31 |
| | 10 | 4.3 | 0.43 | 47.36 | | 18.83 | 1.883 |
| | 60 | 6.9 | 0.6916 | 76 | | 32.8 | 3.28 |

12-расмда $n^+\text{CdS} - n\text{CdS} - n\text{Si}$ -гетеротузилманинг қоронғилик ва ёруғлик ВАХлари иккиланма логарифмик масштабда келтирилган. Бунда 1a-эгри чизик силжишнинг тўғри йўналишига, 1b-эгри чизик эса, тескари йўналишига мос келади. $E = 4 \cdot 10^{-1} \text{ lux}$ ёритилганликка эга бўлган оқ нур билан ёритилгандаги тўғри тармоққа 2-эгри чизик ва тўлқин узунлиги $\lambda \approx 625 \text{ nm}$,

қуввати $0,75 \text{ mW/cm}^2$ бўлган лазер нури билан ёритгандаги тўғри тармоққа эса 3-эгри чизик тўғри келади. Келтирилганлардан кўриниб турибдики, $n^+\text{CdS} - n\text{CdS} - n\text{Si}$ -гетеротузилманинг ёруғлик ВАХлари силжиш кучланишининг бир хил қийматларида токнинг катталиги бўйича қоронғилик ВАХларидан жуда катта фарқ қилади. Бундан ташқари, U силжиш кучланишининг қиймати қанча катта бўлса, улар орасидаги фарқ шунчалик катта бўлади. Масалан, $U = 10 \text{ V}$ бўлганда қоронғиликдаги ток $184 \cdot 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ бўлса, қуввати $0,75 \text{ mW/cm}^2$ бўлган лазер нури таъсирида, ҳамда $E = 4 \cdot 10^{-1} \text{ lux}$ ёритилганликка эга бўлган оқ нур таъсирида ўлчанган тоқлар силжитиш кучланишининг айнан бир хил қийматларида, мос равишда, $7700 \cdot 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ ва $1430 \cdot 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ га тенг бўлади.

Бундан тадқиқ қилинаётган тузилмада бирламчи фототокнинг ички кучайиши содир бўлиши келиб чиқади. Фототок (I_{ph}) учун бажарилган ҳисоб-китоблар ҳам бу тахминнинг тўғрилигини исботлайди. Ҳисоблашларда фотонлар кўринишида тушаётган ёруғлик энергиясининг барчаси номувозанат ток ташувчиларни ҳосил қилади ва улар потенциал тўсиқлар орқали йўқотишларсиз ажралиб, фототокка ўз хиссасини қўшади деб қабул қилинади. Бунда $\lambda \approx 625 \text{ nm}$ тўлқин узунликка ва $0,75 \text{ mW/cm}^2$ қувватга эга бўлган лазер нурлари идеал ФҚ нинг фототокига тенг бўлган $I_{\text{ph}} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ A/cm}^2$ токни келтириб чиқаради. Юқорида кўрсатилганидек бундай ФҚ мавжуд эмас ва уни амалда яратиш ҳам мумкин эмас. Шунга қарамасдан, фототокнинг бу катталиги берилган қувватдаги лазер нурлари билан ёритилганда ўлчанган I_{ph} нинг катталигидан 25 мартадан ортиқроқ кичик эканлиги аниқланган.

Бу ерда кадмий сульфиди учун ($\lambda = 0.625 \text{ }\mu\text{m}$) лазерли ёритиш киритмали нурланиш эканини таъкидлаб ўтиш лозим бўлади. Ўтказилган тажрибалар кўрсатадики, лазер нурланиши қувватининг камайиши билан спектрал сезгирликнинг (S_λ) қиймати ортиб боради. Масалан, энергия $P = 10 \text{ }\mu\text{W/cm}^2$ бўлганда ва $U = 10 \text{ V}$ кучланишда спектрал сезгирлик $\approx 1080 \text{ A/W}$ қийматга эга бўлса, кучланишнинг шу қийматида $P = 0,75 \text{ mW/cm}^2$ бўлганида $6,7 \text{ A/W}$ га тенг бўлади.

Сезгирликнинг кичик ёруғлик сигналларида юқори бўлиши намунани оқ нур билан ёритилганда яққол намоён бўлади. Масалан, юзаси $S \approx 4 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2$ бўлган намуна ёритилганлиги $E = 1 \text{ lux}$ бўлган оқ ёруғлик билан ёритилганда, унга электромагнит нурланишининг кўзга кўринадиган қисмида $3.6 \cdot 10^{-8} \text{ W}$ га тенг бўлган ёруғлик қуввати тушади ва бунда тушаётган квантлар сони $N = 1,2 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}$ га, фототок эса $2 \cdot 10^{-8} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ га тенг бўлади. Квантларнинг бундай сони қуйидаги фаразлардан олинган, яъни ҳамма энергия фотонларнинг энергиясидан иборат бўлиб, у $490 \text{ nm} - 1300 \text{ nm}$ спектрал ораликда тушаётган квантларнинг ўртача эенргиясига тенгдир, яъни $\eta\nu = \{2,53 \text{ eV} (\lambda = 490 \text{ nm}) + 0,95 \text{ eV} (\lambda = 1300 \text{ nm})\} / 2 = 1,75 \text{ eV} (\lambda_{\text{ўр}} = 895 \text{ nm})$. Бундай йўл билан ҳисобланган I_{ph} катталиги $U = 10 \text{ V}$ кучланишда тажрибада олинган фототокнинг катталигидан $7 \cdot 10^5$ марта кам. Эслатиб ўтамизки, ҳисоблаб чиқарилган фототок $\lambda = 895 \text{ nm}$ ($\eta\nu = 1,75 \text{ eV}$) да идеал ФҚ нинг фототокига мос

келади, шунинг учун бу катталик оширилган бўлиб, унинг реал катталиги эса, анчагина кичикдир.

Тажрибалар шу нарсани кўрсатадики, S_{int} катталик лазер нурунинг ҳам, оқ нурнинг ҳам энергияси ортиши билан камаяди. Масалан, оқ нурнинг ёритилганлиги $2,5 \cdot 10^{-2}$ lux дан $25 \cdot 10^{-2}$ lux гача 10 марта орттирилганда, интеграл сезгирликнинг катталиги ўша $U = 10$ V кучланишда уч мартага камаяди. Ўтказилган таҳлилнинг кўрсатишича, қоронғиликда ўлчанган ВАХнинг тўғри тармоғи иккита соҳадан иборат бўлиб, улар токнинг кучланишга $I \sim U^2$ ва $I \sim U^3$ кўринишдаги даражали боғлиқликлар билан тавсифланади (12-расмга қаранг).

Шундай қилиб, солиштирма қаршилиги $\rho \approx 10^8$ Ом·см га эга бўлган кучли компенсацияланган CdS поликристал юпқа қатлами асосида $w/L \geq 10$ га тенг бўлган, ривожланган аккумуляцияли n^+ CdS – nCdS – nSi диод тузилмаси яратилган. Қоронғилик ва ёруғликдаги ВАХларнинг $I \sim U^2$ ва $I \sim U^3$ кўринишдаги кетма-кетликлари тадқиқ қилинаётган тузилма равожланган аккумуляцияли тузилма эканини ишонарли тасдиқлайди. Чунки, фақат шундай тузилмалардагина бир-бирига қарама-қарши йўналган диффузион ва дрейф оқимлари мавжуд бўлгандагина «инжекцияли камбағаллашув» соҳаси пайдо бўлади. Токнинг кичик қийматларида кичик қаршиликка эга бўлган «инжекцияли камбағаллашув» соҳаси пайдо бўлади. Шу ҳолат билан ВАХнинг тўғри тармоғидаги $I \sim U^2$, $I \sim U^3$ боғлиқликларнинг кетма-кетлиги тушунтирилади. Эслатиб ўтамизки, $I \sim U^2$ боғланиш ярим ўтказгичга инжекцияланган плазма орқали ток ташиш механизми билан боғлиқ, $I \sim U^3$ боғланиш эса, изоляторга инжекцияланган плазма билан боғлиқдир.

ХУЛОСА

n^+ CdS – nCdS – pSi ва n^+ CdS – nCdS – nSi-гетеротузилмалари асосидаги инжекцияли фотодиодларнинг ток ташиш механизмларини, ҳамда уларнинг динамик ва статик характеристикаларини изоҳлайдиган электрон жараёнларни аниқлаш асосида қуйидаги ҳулосалар қилинди:

1. Кремний пластинкаларига квазиёпиқ вакуум тизимида CdS кукунини термик пуркаш йўли билан n^+ CdS – nCdS – pSi- ва n^+ CdS – nCdS – nSi-гетеротузилмаларни олиш технологияси ишлаб чиқилган.

2. Силжитиш кучланишининг тўғри йўналишида n^+ CdS – nCdS-ўтиш хона ҳароратида аккумуляцияловчи режимда бўлиб, $E = 0.1$ lux бўлган оқ нур билан ёритилганда у $S_{\text{int}} = 2,8 \cdot 10^4$ А/лм ($3 \cdot 10^6$ А/В) интеграл сезгирликка, тўлқин узунлиги $\lambda = 0,625$ nm, қуввати $P = 10$ μ W/cm² бўлган лазер нури билан ёритилганда эса $S_{\lambda} \approx 2,3 \cdot 10^4$ А/В спектрал сезгирликка эга бўлиши тасдиқланган.

3. Тўғри йўналишда уланган pSi – nCdS-гетероўтишнинг бўлиниш чега-расида мавжуд бўлган, кремнийнинг тақиқланган зонасининг пастки ярмида жойлашган сирт ҳолатлари орқали кремнийдан (pSi-таглик) база (nCdS)га ковакларнинг туннелланиши аниқланган.

4. Силжитиш кучланишининг тескари йўналишида $n^+CdS - nCdS - pSi$ -гетеротузилманинг $pSi - nCdS$ -гетероўтиши ноидеал инжекцияловчи (электронлар учун) контактга айланиб, шу вақтнинг ўзида у $nCdS$ -база томонидан эффектив аккумуляцияловчи контакт ва коваклар учун ношаффоф бўлиши ВАХда нимчизиқли соҳа пайдо бўлишига олиб келиши кўрсатилган.

5. Электромагнит нурланишининг қисқа тўлқин узунликлар ($\lambda = 350 \div 865 \text{ nm}$) соҳасида ҳам, узун тўлқин узунликлар ($\lambda = 865 \div 1300 \text{ nm}$) соҳасида ҳам $n^+CdS - nCdS - pSi$ -гетеротузилмалар фотосезгирлиги ишорасининг инверсия нуқталари диод тузилмалар базасида бир-бирига қарама-қарши йўналган ёруғлик ва қоронғилик тоқларининг тўлиқ компенсацияланиши ҳисобига пайдо бўлиши ўрнатилган.

6. Хона ҳароратида $n^+CdS - nCdS - pSi$ -гетеротузилма тескари йўналишда уланганда унинг ВАХи ток ўтказиш механизмлари бир биридан фарқ қиладиган тўртта соҳадан иборатлиги, яъни биринчи соҳада ток ташишнинг асосий механизми термоэлектрон эмиссия, иккинчи соҳада диффузион, учинчи соҳада дрейф токига қарама-қарши йўналган диффузион, тўртинчи соҳада эса диффузион-дрейф механизмлари ўринли эканлиги топилган.

7. Термодинамик мувозанат ҳолатида $nCdS - pSi$ -гетероўтиш чегарасида сирт потенциалининг қиймати $\psi_s = 0,04 \text{ eV}$ га тенг бўлган акцептор типига манфий зарядланган сирт ҳолатлари ҳосил бўлиши ва сирт потенциали ψ_s манфий кутбли бўлганда, сирт ҳолатлари зичлиги (N_{ss}) юқори қийматларга, ψ_s нинг мусбат қийматларида эса паст қийматлар қабул қилиши асосланган.

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

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

САПАЕВ ИБРОХИМ БАЙРАМДУРДЫЕВИЧ

**ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ИНЖЕКЦИОННЫХ
ФОТОДИОДАХ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОПЕРЕХОДОВ МЕЖДУ
СУЛЬФИДОМ КАДМИЯ И КРЕМНИЕМ**

01.04.10 – Физика полупроводников

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

Ташкент – 2018

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за номером B2017.1.PhD/FM38

Диссертация выполнена в Физико-техническом институте АН РУз.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице по адресу fti-kengash.uz и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» по адресу www.ziyo.net.

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

Официальные оппоненты: **Абдурахманов Каххар Паттахович**
доктор физико-математических наук, профессор

Камалов Амангелди Базарбаевич
доктор физико-математических наук, профессор

Ведущая организация: Наманганский государственный университет

Защита диссертации состоится «___» _____ 2018 года в ___ часов на заседании Научного совета 27.06.2017. FM./T.34.01 при Физико-техническом институте, Институте ионно-плазменных и лазерных технологий, Самаркандском государственном университете. (Адрес: 100084, г. Ташкент, ул. Бодомзор йули, дом 26. Административное здание Физико-технического института, зал конференций. Тел./Факс: (99871) 235-30-41; e-mail: lutp@uzsci.net).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Физико-технического института (зарегистрирована за № ___). Адрес: 100084, г. Ташкент, ул. Бодомзор йули, дом 26. Административное здание Физико-технического института, зал конференций. Тел./Факс: (99871) 235-30-41.

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2018 г.
(протокол рассылки № _____ от «___» _____ 2018 г.)

С.А. Бахрамов

Председатель научного совета по присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н., академик АН РУз

А.В. Каримов

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

И.Г. Атабаев

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

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время во всем мире уделяется особое внимание проблемам создания новых видов оптоэлектронных приборов, а также усовершенствованию инжекционных фотодиодов, как одному из перспективных направлений в области развивающейся физики полупроводников. При этом исследование принципов работы инжекционных фотодиодов, влияния напряжения смещения на генерацию электронно-дырочных пар и процессов модуляции сопротивления базы под воздействием электромагнитного излучения считаются основными задачами создания нового вида фотодиодов.

В настоящее время в мире в области физики полупроводников уделяется большое внимание определению роли параметров базы в формировании физических свойств инжекционных фотодиодов. При этом проведение целевых исследований, в том числе выполнение научных изыскательских работ в следующих направлениях считается важными задачами: глубокое изучение физических процессов, происходящих в исследуемых системах и определение механизмов формирования фотоэлектрических характеристик, усовершенствование технологических способов изготовления инжекционных фотодиодов, определение зависимости спектральных характеристик фотодиодов с гетероструктурой на основе сульфида кадмия и кремния от процессов, происходящих на гетерогранице, нахождение путей оптимизации их функциональных параметров, а также решение проблемы усовершенствования технологии их получения.

По Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан обращается особое внимание вопросам создания механизмов применения в практику достижений науки и инновации. В том числе определение возможностей управления электронными процессами, происходящими в микроэлектронных и полупроводниковых гетероструктурах и управление спектральными характеристиками считается одним из важных задач. В год поддержки инновационных идей и технологий, активного предпринимателя, поднятие полученных научных результатов на современный уровень достоин особого внимания. При этом повышение эффективности путем оптимизации функциональных характеристик фотодиодных гетероструктур, предназначенных на различный спектральный диапазон, имеет важное значение. В этом аспекте разработаны способы уменьшения токов утечек различными внешними воздействиями. На ряду с этими, выяснение причин, влияющих на формирование спектральных характеристик гетероструктур на основе сульфида кадмия и кремния, определение электронных процессов, характеризующих статических и динамических характеристик и повышения эффективности фотоэлектрических параметров, а также разработка технологии создания гетероструктурных фотодиодов на основе сульфида кадмия и кремния имеет важное значение.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, указанных в Указе Президента Республики Узбекистан

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

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

Степень изученности проблемы. До настоящего времени ученые и производители оптоэлектронных приборов обращали внимание на изучение электронных процессов, происходящих в гетероструктурах и разработке способов оптимизации их фотоэлектрических параметров. Одними из таких гетероструктур являются инжекционные фотодиоды, которые образуют новый класс фотоприемников и относятся к типу диодов с длинной базой.

Первые образцы инжекционных фотодиодов были созданы ведущим ученым в этой области В.И. Стафеевым и его учениками. Известные результаты по разработке новых структур фотоприемников, управлению их спектральным диапазоном в зависимости от параметров материала базы были осуществлены под руководством таких ученых, как М.К. Бахадирханов, А.Т. Мамадалимов и А.В. Каримов¹ на основе кремния и арсенида галлия.

В свою очередь создание инжекционных фотодиодов нового типа требует обращения к уже достаточно хорошо изученным материалам, о физических, физико-химических и технологических свойствах которых имеются достаточно надежные и конкретные данные в литературе. Однако, несмотря на хорошую изученность полупроводниковых соединений A^4B^4 и A^2B^6 , обращено незначительное внимание на разработку инжекционных диодов на их основе. Кроме того, не разработаны технологии получения полупроводниковых соединений CdS на кремниевых подложках и фотодиодов на их основе.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнена в рамках проектов научных исследований ФТИ НПО «Физика – Солнце» АН РУз по темам: АЗ-ФА-011242 «Разработка мобильного спектроанализатора для экспрессной оценки элементного состава металлических сплавов на производстве» (2012-2014г.г.); ФА-АЗ-Ф024 «Разработка компактной системы контроля

¹Диссертациянинг мавзуси бўйича муаммони ўрганилганлик даражиси Karimov A.V., Karimova D.A. Three-junction Au/AlGaAs(n)/GaAs(p)/Ag photodiode. Science in Semiconductor Processing, Volume 6, Issues 1-3, 2003, Pages. 137-142, Инжекционно-полевой фотодиод Патент РУз № IAP 03974 от 09.06.20.09. Расмий ахборотнома. – 2009. - № 7 ва бошқа манбалар асосида бажарилган.

пламени горения для котлов с газовыми горелками» (2015-2017г.г.).

Целью диссертационной работы является определение электронных процессов, характеризующих динамических и статических характеристик, а также механизмов переноса тока в инжекционных фотоприемниках на основе $n^+CdS - nCdS - pSi$ - и $n^+CdS - nCdS - nSi$ -гетероструктур.

Задачи исследования:

определение критериев выбора исследуемой структуры и полупроводникового материала, необходимого для его создания;

разработка технологического способа изготовления экспериментальных образцов инжекционных фотодиодов, подготовка технологического оборудования и материалов;

изготовление экспериментальных образцов структур, исследуемых инжекционных фотодиодов;

морфологические исследования изготовленных образцов инжекционных фотодиодов;

исследование вольтфарадных, темновых и световых вольтамперных характеристик $n^+CdS - nCdS - pSi$ - и $n^+CdS - nCdS - nSi$ -гетероструктур;

анализ механизмов переноса тока в $n^+CdS - nCdS - pSi$ - и $n^+CdS - nCdS - nSi$ -гетероструктурах.

Объектами исследования являются пленки CdS, полученные на кремниевых подложках термическим напылением порошков CdS в вакууме, гетероструктуры $n^+CdS - nCdS - pSi$ - и $n^+CdS - nCdS - nSi$, созданные на их основе.

Предметами исследования являются механизмы переноса тока в $n^+CdS - nCdS - pSi$ - и $n^+CdS - nCdS - nSi$ -гетероструктурах и формирования их спектральной чувствительности.

Методы исследований. В работе использованы апробированные методы измерения вольтамперных, вольтемкостных и спектральных характеристик, стандартные однозондовый и четырехзондовый методы измерения удельного сопротивления, морфологические исследования на микроаналитическом комплексе Jeol-JXA-8900 с применением энергодисперсионного спектрометра (ЭДС) LINK ISIS (Япония).

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем: впервые разработана технология получения тонких пленок CdS на кремниевых подложках путем напыления порошков CdS в квазизамкнутой вакуумной системе и на их основе созданы гетероструктуры $n^+CdS - nCdS - pSi$ и $n^+CdS - nCdS - nSi$, работающие в качестве инжекционных фотоприемников с внутренним усилением и перестраиваемым диапазоном спектральной чувствительности;

расположенные в широком спектральном диапазоне длин волн 389 – 1238 nm в гетероструктуре $n^+CdS - nCdS - pSi$ один высокий «пик» при длине волны 475 nm и три небольших «пика» при длинах волн 618 nm, 740 nm и 821.8 nm подтверждает наличие различных примесных уровней;

экспериментально установлено, что в состоянии термодинамического равновесия на границе раздела $nCdS - pSi$ -гетероперехода при значениях

поверхностного потенциала $\psi_s = 0,04$ eV образуются отрицательно заряженные поверхностные состояния акцепторного типа, при отрицательных значениях ψ_s плотность поверхностных состояний (N_{SS}) имеет высокие, а при положительных значениях ψ_s низкие значения;

показано, что рост инжекции электронов из pSi -подложки в базу с увеличением напряжения прямого смещения, приводит к росту фототока и расширению диапазона спектральной чувствительности в сторону коротких длин волн;

найлены оптимальные технологические режимы формирования сильнолегированного тонкого n^+CdS -слоя и получения контакта на поверхности пленки $nCdS$ -пленки путем вакуумного напыления индия на поверхности нагретых до 373 К $nCdS - pSi$ - и $nCdS - nSi$ -гетероструктур с последующей термической обработкой при 673 К в течение 30 сек.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

путем термического напыления порошков CdS на Si -подложки в вакууме 10^{-5} Торр получены гетероструктуры $n^+CdS - nCdS - pSi$ и $n^+CdS - nCdS - nSi$. На их основе изготовлены инжекционные фотодиоды с внутренним усилением и перестраиваемым диапазоном спектральной чувствительности.

Достоверность результатов исследований обеспечивается применением апробированных традиционных методик измерения удельного сопротивления, вольтамперных, вольт-фарадных и спектральных характеристик.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследований заключается в том, что в результате проведенных исследований еще больше расширились представления об инжекционных фотодиодах.

Практическая значимость результатов исследований заключается в возможности использовании их при изготовлении инжекционных фотодиодов с управляемым диапазоном fotocувствительности и инверсией фототока.

Внедрение результатов исследования.

По результатам определения электронных процессов характеризующих динамические и статические характеристики, а также механизмы переноса тока в инжекционных фотоприемниках на основе $n^+CdS - nCdS - pSi$ - и $n^+CdS - nCdS - nSi$ -гетероструктур:

технологические режимы получения контакта на поверхности тонких пленок применены при выполнении международного проекта № T15MH-001 (2015-2017 г.г.) на тему «Исследование физических и антибактериальных свойств фуллеридов металлов и металлоценов, выявление возможностей их применения в покрытиях медицинских инструментов» для получения омических контактов к тонким слоям образцов (Справка Института тепло- и массообмена НАН Беларуси от 2017 года 11 октября). Применение научных результатов позволило получить контакты к наноструктурным образцам и провести исследований физических особенностей токовых характеристик;

способ получения контакта путем магнетронного напыления в вакууме применен в проекте № Ф2-ФА-Ф161 (2012-2016 г.г.) на тему «Изучение механизмов формирования наноразмерных гетероструктур, созданных

способом ионной имплантации на поверхности свободных тонких пленок (Al, Cu, Ag, и Cu-Si) и массивных кристаллов (W, WO_n, TiN, CdTe и SiO₂) и их физико-химических свойств» для получения контактов с малым омическим сопротивлением на поверхности нанопленок. (Справка Агентства науки и технологий Республики Узбекистан за № ФТА-02-11/1150 от 21 ноября 2017 г.). Применение научных результатов позволило определить дисперсию характеристик спектров потери энергии электронами, отраженных и прошедших сквозь свободных тонких пленок.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на 3 международных и 2 республиканских научно-практических конференциях.

Публикации результатов исследования. По теме диссертации опубликовано всего 9 научных трудов, из них 4 статьи в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных работ.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка опубликованных работ, содержит 20 рисунков, 4 таблиц, список использованной литературы из 78 наименований и она изложена на 116 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

В первой главе «**Получение, свойства, основные характеристики и тенденция развития инжекционных фотоприемников**» рассмотрены различные виды ИФП, созданных различными исследователями, их получение, свойства, основные характеристики и тенденция развития. Анализированы особенности параметров и свойств ИФД, созданных на основе различных полупроводниковых материалов. Описаны механизмы токопрохождения, усиления в них, и их спектральные зависимости фоточувствительности.

Во второй главе «**Изготовление образцов инжекционных фотоприемников на основе $n^+CdS - nCdS - pSi$ - и $n^+CdS - nCdS - nSi$ -гетероструктур и их основные параметры**» изложены различные методы получения тонких пленок. Показаны преимущества метода вакуумного термического напыления слоев CdS для получения $n^+CdS - nCdS - pSi$ - и $n^+CdS - nCdS - nSi$ -гетероструктур, на основе которых были созданы образцы исследованных в диссертационной работе ФП. Показано влияние обработки поверхности кремниевых подложек на электрофизические свойства получен-

ных на них слоев CdS, а также структур, созданных на их основе. Также приведены технологические режимы получения пленок CdS и создания образцов $n^+CdS - nCdS - pSi$ - и $n^+CdS - nCdS - nSi$ -гетероструктур на их основе, а также параметры полученных слоев CdS.

Морфологическими исследованиями полученных пленок, показано, что размеры кристаллитов сильно зависят от технологических режимов, прежде всего от температуры подложки T_s . Например, изготовленные при $T_s = 300^\circ C$ пленки CdS имели размеры кристаллитов $\sim 3 \div 4 \mu m$, полностью пронизывающих пленку толщиной $w \approx 2 \mu m$, которые имели проводимость n -типа с удельным сопротивлением $\rho \geq (2-3) \cdot 10^6 \Omega \cdot cm$. Исследования поверхности образцов полученных таким образом пленок CdS при помощи микроскопа МИИ-4 показали, что пленки CdS состоят из плотно упакованных столбчатых кристаллитов (зерен) (рис.1), ориентированных в направлении роста пленок и разориентированных по азимуту.

Определено распределение химических элементов по толщине слоя CdS (рис.2) на микроаналитическом комплексе Jeol – JXA-8900 с помощью ЭДС (энергодисперсионный спектрометр) LINK ISIS. Условия измерений: $U = 20 kV$, $I = 10 nA$. Эталоны: самородные Cd и Si, а для S-синтетический FeS; при этом погрешность измерения составляла $\pm 2.0\%$. Приведено, что при изготовлении образцов структур ИФД, контакты к структурам получались напылением индия (In) в вакууме, с тыльной стороны на Si-подложку сплошными, а с фронтальной стороны «П»-образными. Сильнолегированный n^+CdS слой толщиной порядка 50 \AA был создан путем напыления тонкого слоя индия (In) в течение $25 \div 30 s$ на поверхность пленки CdS в вакууме с остаточным давлением $10^{-5} Torr$ при температуре подложки $373K$ с последующим отжигом при $673 K$ в течение $300 s$. Затем на поверхности этого сильнолегированного n^+CdS -слоя был получен токоъемный «П»-образный омический контакт с площадью $3 mm^2$ также методом вакуумного испарения In.

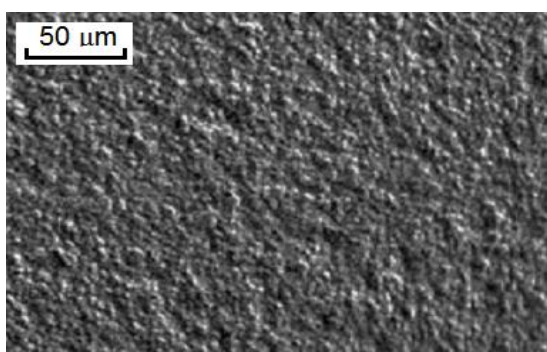


Рис.1. Микроснимок поверхности пленки CdS

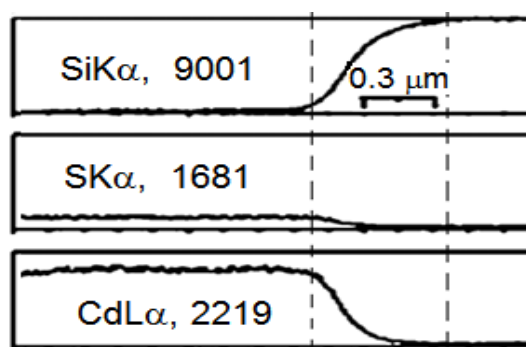


Рис.2. Распределение химических элементов по толщине слоя $nCdS$, осажденной на pSi -подложке

Для получения информации о состоянии границы раздела был применен метод частотной вольтфарадной характеристики (ВФХ). ВФХ структур измерялись при прямом и обратном напряжении смещения и частотах $f = (0,4-$

50) кГц. Поскольку $C(U)$ -характеристики при этих частотах имеют одинаковые формы, приводится только одна характеристика для $f=10$ кГц.

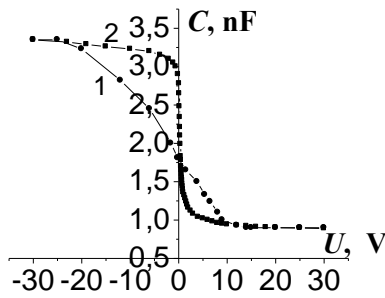


Рис.3. $C(U)$ -характеристика $pSi - nCdS - n^+CdS$ -гетероструктуры.

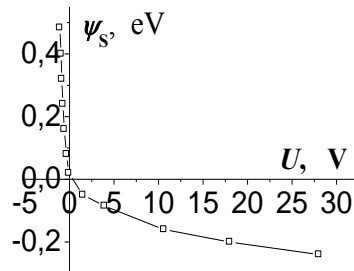


Рис.4. Зависимость поверхностного потенциала от приложенного напряжения

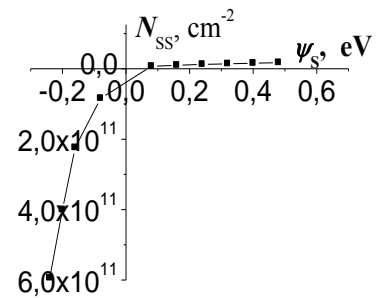


Рис.5. Зависимость эффективной плотности поверхностных состояний от поверхностного потенциала

Плотность поверхностных состояний в гетероструктуре определялся по сдвигу экспериментальной $C(U)$ -характеристики по отношению рассчитанной по $N_{SS} = \Delta U \cdot C / q$ кривой при одном и том же значении емкости. На рис.3 представлены экспериментальная (кривая 1) и расчетная (кривая 2) $C(U)$ -характеристики $pSi - nCdS - n^+CdS$ -гетероструктуры. Экспериментальная $C(U)$ -характеристика (рис.3, кривая 1) была получена при комнатной температуре на частоте тестового сигнала $f = 10$ kHz, так как при данной частоте $C(U)$ -характеристика структуры М(металл) – Д(диэлектрик) – П(полупроводник) проявляется более четко. Это означает, что плотности поверхностных состояний N_{SS} , имеющиеся в гетеропереходе являются медленными поверхностными состояниями. Экспериментально определенная зависимость (ψ_s) от напряжения U приведена рис.4, а зависимость N_{SS} от ψ_s – на рис.5.

В третьей главе «Спектральные характеристики $pSi - nCdS - n^+CdS$ - и $nSi - nCdS - n^+CdS$ -гетероструктур» приведены результаты исследований спектральной зависимости фототока $pSi - nCdS - n^+CdS$ -гетероструктуры в темноте и на свету, а также в прямом и обратном направлениях смещения.

Спектральные зависимости фоточувствительности структур измерялись на монохроматоре ЗМР-3 при комнатной температуре (300 К). При этом в качестве источника излучения служила ксеноновая лампа типа ДКСШ-1000, работающая в режиме минимально допустимой мощности и обеспечивающая световой поток 53000 lm и яркость до 120 Mcd/m^2 в центре светового пятна. Излучение лампы отградуировано в абсолютных единицах при помощи термоэлемента РТЭ-9 с кварцевым окошком. Лампа ДКСШ-1000 имеет сплошной спектр в ультрафиолетовой и видимой области длин волн.

На рис.6 приведена спектральная зависимость фоточувствительности (S_λ) в отсутствие напряжения смещения в прямом направлении тока для типичного фотодиода с гетероструктурой $n^+CdS - nCdS - pSi$. При этом прямым направлением тока считается, когда к подложке pSi прикладывается «+» потенциал, а обратным «-» потенциал. Из рис.6 видно, что на кривой

спектральной чувствительности имеется ряд особенностей в спектральном диапазоне $\lambda = 389 \div 1238,46$ nm. То есть, спектральная чувствительность структуры начинается с $\lambda = 389$ nm и стремительно растет, достигая своего максимума (пика) при $\lambda = 475$ nm и при этом спектральная чувствительность имеет значение $S_\lambda = 5,49$ A/W. Далее фототок, постепенно уменьшаясь, при длине волны $\lambda = 872,7$ nm падает до нуля.

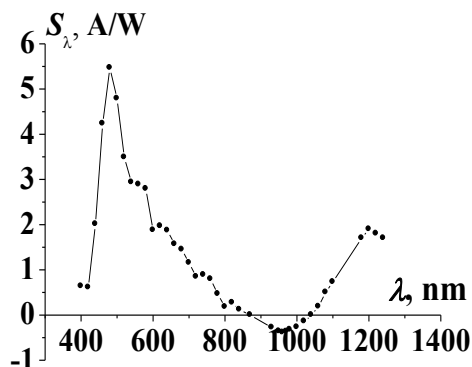


Рис.6. Спектральная зависимость фоточувствительности (S_λ) $pSi-nCdS-n^+CdS$ -гетероструктуры без смещения

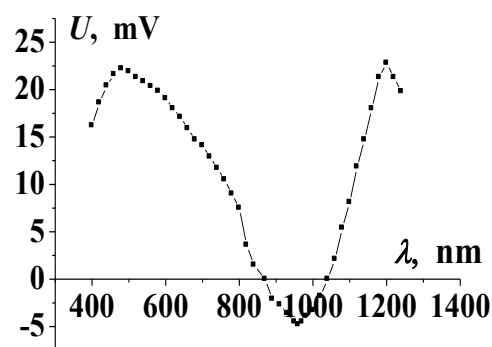


Рис.7. Спектральная зависимость фото-ЭДС (U_{ph}) $pSi-nCdS-n^+CdS$ -гетероструктуры

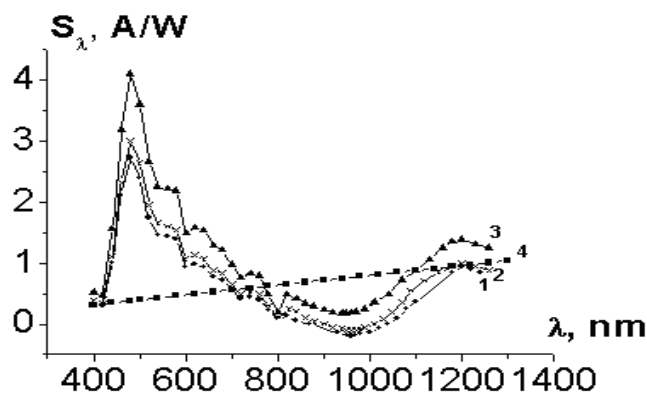
Кроме того еще, на стороне спада фоточувствительности имеются ступеньки в интервале $\lambda = 541,84 \div 578,56$ nm и три малых пика при длинах волн $\lambda = 618$ nm, $\lambda = 740$ nm и $\lambda = 821,8$ nm, соответственно, объясняющиеся наличием примесей в слоях CdS. Далее, после своего нулевого значения S_λ , меняя знак, начинает расти в противоположную сторону и достигает отрицательного максимума при $\lambda = 961,8$ nm и спектральная чувствительность имеет значение $S_\lambda = 0,4$ A/W. Затем наблюдается плавный спад S_λ и достижение до нуля при $\lambda = 1042,8$ nm и дальше вновь происходит ее рост со сменой знака до $\lambda = 1200,3$ nm с последующим незначительным уменьшением.

Для объяснения поведения зависимости спектральной чувствительности, описанного в предыдущем разделе, была изучена спектральная зависимость фото-ЭДС (U_{ph}) структуры, которая приведена на рис.7. Сопоставление зависимостей $S_\lambda(\lambda)$ и $U(\lambda)$ показывает, что они имеют соответствующий друг другу вид. В них имеются общие экстремальные точки, соответствующие максимумам и минимумам, находящиеся при одних и тех значениях λ . Это обстоятельство дает основание утверждать, что зависимость $U(\lambda)$ определяет вид $S_\lambda(\lambda)$. Появление большого пика при $\lambda = 475$ nm обусловлено генерацией и разделением неравновесных носителей (фотоносителей) без потерь в области изотипного $n^+CdS - nCdS$ -перехода.

Дальнейшее увеличение фоточувствительности после смены знака связано с вкладом $pSi - nCdS$ -гетероперехода в разделение фотоносителей. Последующая смена знака и появление максимума при $\lambda = 1200,3$ nm ($S_\lambda = 0,96$ A/W) с дальнейшим уменьшением объясняется преобладающим вкладом

гетероперехода $pSi - nCdS$ в процессы диффузии и дрейфа носителей. Величина фоточувствительности при $\lambda = 1200,3 \text{ nm}$ показывает, что гетеропереход $pSi - nCdS$ эффективно разделяет генерированные излучением электронно-дырочные пары. Однако, при этом спектральная чувствительность при $\lambda = 1200,3 \text{ nm}$ значительно меньше, чем при $\lambda = 475 \text{ nm}$. Это свидетельствует о том, что эффективность гетероперехода хуже, чем у изотипного $n^+CdS - nCdS$ -перехода.

Носители тока, инжектированные изотопным $n^+CdS - nCdS$ -переходом под воздействием фото-ЭДС, образуют диффузионные потоки дырок, которые появляются для обеспечения электронейтральности. Величина спектральной чувствительности в максимуме ($\lambda = 475 \text{ nm}$) значительно превышает спектральную чувствительность идеального фотоприемника ($S_\lambda = 0,6 \text{ A/W}$) при данной длине волны электромагнитного излучения (рис.8). Идеальным фотоприемником считается фотоприемник, в котором все падающие фотоны поглощаются и генерируют электронно-дырочные пары, которые без потерь разделяются объемным зарядом перехода. Наблюдаемое превышение S_λ позволяет утверждать, что в такой структуре происходит усиление первичного фототока. Механизм такого усиления может быть двояким: параметрическим или положительная обратная связь.



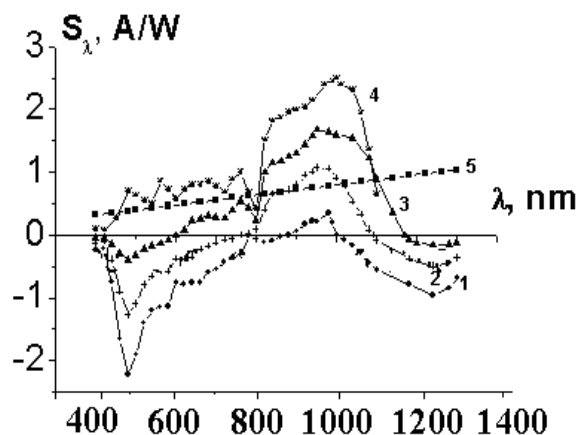
1– спектральная чувствительность в отсутствии напряжения смещения, 2- 0,5 мВ, 3- 2 мВ, 4- для идеального фотоприемника

Рис.8. Спектральная зависимость фоточувствительности $n^+CdS-nCdS-pSi$ -гетероструктуры в отсутствие и при подаче напряжения смещения различного значения в прямом направлении

Кроме того, в третьей главе рассмотрена спектральная чувствительность $pSi - nCdS - n^+CdS$ -гетероструктуры в обратном направлении тока в отсутствие и при наличии напряжения смещения различной величины (рис.9). Как видно из данного рисунка в отсутствие напряжения смещения диапазон спектральной чувствительности лежит в области длин волн $\lambda = 350 \div 1350 \text{ nm}$ и имеет наиболее высокие значения при $\lambda_1 \approx 480 \text{ nm}$ и $\lambda_2 \approx 1248 \text{ nm}$, где фототоки имеют отрицательные значения.

Имеющиеся на спектральной зависимости фототока точки инверсии дает основание утверждать, что противоположно направленные дрейфовый и фототок в базе структуры, полностью компенсируют друг друга в опре-

деленной толщине базы d_λ . Эта толщина базы соответствует глубине поглощения электромагнитного излучения с длиной волны λ .



1- спектральная чувствительность в отсутствии напряжения смещения, 2-4 мВ, 3-6 мВ, 4- 8.5 мВ, 5-для идеального фотоприемника

Рис.9 Спектральная зависимость фоточувствительности $n^+CdS-nCdS-pSi$ -гетероструктуры в отсутствие и при подаче напряжении смещения различного значения в обратном направлении тока

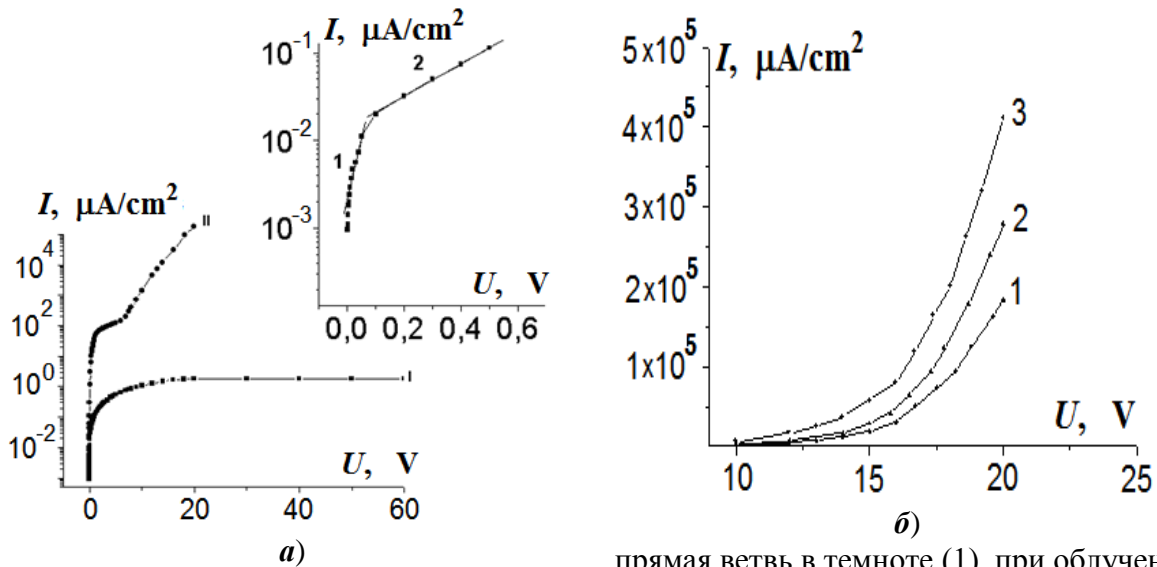
Сдвиг точки инверсии фоточувствительности в сторону коротких длин волн определяется величиной биполярного дрейфового тока, который связан в основном с инжекцией электронов из $nCdS-pSi$ -гетероперехода в базу. Сдвиг точки инверсии осуществляется путем подачи малых обратных напряжений смещения. Эксперимент показывает, что после подачи напряжения смещения $U \geq 8,5$ мВ биполярный дрейфовый ток в структуре становится определяющим и поэтому в спектре распределения фоточувствительности не появляется инверсия знака фототока.

В четвертой главе «**Вольтамперные характеристики $n^+CdS-nCdS-pSi$ - и $n^+CdS-nCdS-nSi$ -гетероструктур и механизмы переноса тока**» исследованы темновые и световые вольтамперные характеристики (ВАХ) $n^+CdS-nCdS-pSi$ - и $n^+CdS-nCdS-nSi$ -гетероструктур и механизмы переноса тока.

Вольтамперные характеристики (ВАХ) изготовленных нами $pSi-nCdS-n^+CdS$ -гетероструктур измерялись в прямом и обратном направлении тока в темноте, а также на свету при освещенностях $E=0,1 \div 50$ lux при комнатной температуре (300 К). Освещение структур производилось двумя способами: лазерным излучением (газовый лазер типа ЛГ-75) с длиной волны $\lambda = 0,625$ μm в интервале мощностей $(0,01 \div 0,75)$ mW/cm^2 , а также от лампы накаливания, параметры которой практически соответствует эталонной лампе белого света. Следует напомнить, что один люмен электромагнитного излучения в видимой области спектра содержит мощность $9,1 \cdot 10^{-3}$ W.

На рис.10 представлены прямая и обратная ветви ВАХ $pSi-nCdS-n^+CdS$ -гетероструктуры в полулогарифмическом масштабе. Как было упомянуто выше, прямым направлением тока в структуре считается, когда к pSi -контакту прикладывается потенциал полярностью «+», а обратным поляр-

ностью « – ». Анализ ВАХ показывает, что структура обладают выпрямляющими свойствами и его коэффициент выпрямления (определяемый как отношение прямого и обратного токов при фиксированном напряжении смещения $U = 20$ В), имеет значение $K \approx 10^5$.



I – прямая ветвь, II – обратная ветвь. На вставке рисунка приведены первый (1) и второй (2) участки обратной ветви ВАХ

прямая ветвь в темноте (1), при облучении белым светом с $E = 10$ lux (2) и при лазерном облучении с $\lambda = 0,625$ nm и мощностью $P = 100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ (3)

Рис.10. Вольтамперная характеристика гетероструктуры $p\text{Si} - n\text{CdS} - n^+\text{CdS}$

Для удобства анализа обратная ветвь ВАХ структуры на рис.10а (вставка) представлена для положительных значений тока. Анализ обратной ВАХ показывает, что в интервале плотности тока $I \approx (1,3 \cdot 10^{-9} \div 1,1 \cdot 10^{-8}) \text{ A}/\text{cm}^2$ в структуре протекают термоэлектронные токи. При этом термоэлектронный ток описывается формулой:

$$I = AT^2 e^{-\frac{V_D}{kT}} (e^{\frac{eU}{kT}} - 1), \quad (1)$$

где A – постоянная Ричардсона $A = 12 \cdot 10^5 \text{ A}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^2)$; V_D – высота потенциального барьера; U – напряжение смещения; T – температура по шкале Кельвина; k – постоянная Больцмана.

В диапазоне плотностей тока $I \approx (1,3 \cdot 10^{-8} - 2, 2 \cdot 10^{-7}) \text{ A}/\text{cm}^2$ ВАХ описывается экспоненциальной зависимостью типа $I = I_{02} \cdot \exp(qU/c_k T)$, у которой показатель экспоненты $c_2 = 8,2$, а предэкспоненциальный множитель $I_{02} = 1,8 \cdot 10^{-8} \text{ A}/\text{cm}^2$. Согласно теории Стафеев В.И. в структурах со значительным сопротивлением базы, протекает диффузионный ток, и он описывается следующим аналитическим выражением

$$I = I_{02} \cdot \exp(qU/c_2 kT), \quad (2)$$

где

$$c_2 = (2b + chw/L + 1)/(b + 1), \quad (3)$$

здесь $b = \mu_n/\mu_p$ – отношение подвижностей электронов и дырок, w – толщина базы. Подставляя в формулу (3) экспериментальное значение $c_2 = 8,2$, опре-

деленное из второго участка ВАХ, находим, что диффузионная длина дырок $L_p = 0,45 \text{ }\mu\text{m}$, $\mu_p \tau_p = 7,8 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{V}$ (произведение подвижности на время жизни дырок) при значениях: $b = 38$, $w = 2 \text{ }\mu\text{m}$, $\mu_n = 285 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{c}$ и $\mu_p = 7 \div 8 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{c}$. Поскольку величина I_{02} примерно равна току, при котором проводимость базовой области увеличивается инжекцией в два раза, т.е. равновесная и неравновесная проводимости толщи базы сравниваются, и наступает переход к высоким уровням инжекции.

При этом, допуская, что значение $I_{02} = 1,8 \cdot 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ соответствует к начальному напряжению (0,1 V) второго участка ВАХ, находим, что удельное сопротивление базы $\rho = 2,6 \cdot 10^{10} \text{ }\Omega\cdot\text{cm}$, что хорошо согласуется с удельным сопротивлением пленки $n\text{CdS}$, равным $3 \cdot 10^{10} \text{ }\Omega\cdot\text{cm}$. Еще о наличии инжекции электронов свидетельствует и другая оценка, проведенная по произведению $\mu_p \tau_p = 7,8 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{V}$. Для этого были сняты кривые релаксации в отсутствии напряжения смещения. По нарастанию и по спаду этих кривых были определены постоянные времени релаксации, которые оказались, соответственно, равны $\tau = 7 \cdot 10^{-8} \text{ c}$ и $\tau = 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ c}$. Далее, предполагая, что эти величины являются временами жизни дырок, из произведения $\mu_p \tau_p$, находим значения для $\mu_p = 1,1 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{c}$ и $\mu_p = 0,78 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{c}$.

С дальнейшим увеличением напряжения смещения (U) происходит изменение свойств гетероперехода $p\text{Si} - n\text{CdS}$, он становится неидеальным и начинает пропускать дырок в сторону $p\text{Si}$. При этом изотипный $n^+\text{CdS} - n\text{CdS}$ -переход остается почти идеальным и у него повышается потенциальный барьер V_b для дырок с повышением обратного напряжения смещения. Поэтому концентрация неравновесных дырок около этого изотипного $n^+\text{CdS} - n\text{CdS}$ -перехода становится больше, а градиент концентрации дырок выше, чем возле $p\text{Si} - n\text{CdS}$ -гетероперехода. Это создает диффузионные потоки дырок, направленных к гетеропереходу $p\text{Si} - n\text{CdS}$. Эти дрейфовые и диффузионные потоки направлены навстречу диффузионным потокам, идущим от гетероперехода.

Для доказательства усиления первичного фототока были исследованы темновые и световые ВАХ $n\text{CdS} - p\text{Si}$ -гетероперехода (рис.10б). Световые ВАХ были измерены при различных уровнях освещенности (E) белым светом и лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 625 \text{ nm}$ для различных мощностей (P). Например, при облучении лазерным излучением мощностью $P = 10 \text{ }\mu\text{W/cm}^2$, $S_\lambda = 2,3 \cdot 10^4 \text{ A/W}$, а при облучении белым светом с освещенностью $E = 0,1 \text{ lux}$ интегральная чувствительность $S_{\text{int}} = 2,75 \cdot 10^4 \text{ A/lm}$ ($3 \cdot 10^6 \text{ A/W}$) при комнатной температуре (см. табл.1).

Как указывалось выше, исследуемая структура очень чувствительна к малым уровням освещенностей, при котором она приобретает очень высокие значения интегральной и спектральной чувствительностей как в собственной, так и в примесной областях поглощения света (см.табл.1). Кроме того, установлено, что с повышением величины уровня освещенности белого света и мощности лазерного облучения происходит уменьшение как S_{int} , так и S_λ , при той же величине напряжении смещения, а с увеличением прямого напряжения смещения величины спектральной и интегральной чувствительностей

возрастают. Исследования световых ВАХ, проведенные для различных уровней освещенностей белого света и лазерного облучения при различных мощностях показали идентичность их по форме и подчинение одинаковым закономерностям зависимости тока от напряжения смещения, а самые максимальные значения интегральной и спектральной чувствительностей приходятся на четвертый участок прямой ветви ВАХ.

Таблица 1

Зависимости фототока (I_{Ph}), интегральной чувствительности (S_{int}), спектральной чувствительности (S_{λ}) от освещенности (E_{lux}), мощности лазерного облучения (P) и напряжении смещения (U)

| Белый свет | | | | | Лазерное облучение | | |
|--------------|--------|------------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------------|----------------------------|
| E (lux) | U, V | $I_{Ph}, \frac{\mu A}{cm^2}$ | $S_{int}, \frac{A}{lm}$ | $S_{int}, \frac{A}{W}$ | $P, \frac{\mu W}{cm^2}$ | $I_{Ph}, \frac{\mu A}{cm^2}$ | $S_{\lambda}, \frac{A}{W}$ |
| 0.1 | 5 | 148.6 | 14.8 | $0.2 \cdot 10^4$ | 10 | 133 | 13.3 |
| | 10 | 2354.4 | 235.44 | $2.6 \cdot 10^4$ | | 2000 | 200 |
| | 14 | 17000 | 1700 | $1.87 \cdot 10^5$ | | 11200 | 1120 |
| | 20 | 274500 | 27450 | $3 \cdot 10^6$ | | 233560 | 23356 |
| 1 | 5 | 178 | 1,78 | $0.2 \cdot 10^3$ | 50 | 369.2 | 7.4 |
| | 10 | 3020 | 30,2 | $3.32 \cdot 10^3$ | | 6075.6 | 121.5 |
| | 14 | 18000 | 180 | $1.98 \cdot 10^4$ | | 38937.1 | 778.7 |
| | 20 | 310220 | 3102 | $3.4 \cdot 10^5$ | | 416333 | 8326 |
| 10 | 5 | 184 | 0.184 | $0.2 \cdot 10^2$ | 100 | 456 | 4.56 |
| | 10 | 3600 | 3.6 | $4 \cdot 10^2$ | | 7524 | 75.24 |
| | 14 | 21000 | 21 | $2.31 \cdot 10^3$ | | 44025 | 440.25 |
| | 20 | 410500 | 410 | $4.5 \cdot 10^4$ | | 448320 | 4483.2 |

На четвертом участке ВАХ зависимость тока от напряжения смещения описывается степенной зависимостью, и рекомбинация неравновесных носителей происходит преимущественно через сложные комплексы, внутри которых происходит электронный обмен и, в нем определяющим является дрейфовый ток. Это дает основание утверждать, что в процессе усиления первичного фототока основным фактором является модуляция амбиполярной подвижности.

Модуляция величины амбиполярной подвижности происходит в результате опустошения глубоких уровней прилипания. Оценка показывает, что на четвертом участке в темноте биполярная скорость дрейфа имеет значение $v_a \approx 5,6 \cdot 10^6$ cm/s. Такая величина скорости биполярного дрейфа обеспечивает длину биполярного дрейфа $L_{dr} \approx 5,6 \cdot 10^{-2}$ cm при значении $\tau \approx 10^{-8}$ s (время жизни электронно-дырочной плазмы), которая более в три порядка превышает длину биполярной диффузии ($L = 0.24 \mu m$). Эта оценка, во-первых, полностью подтверждает, что на четвертом участке ВАХ дрейфовый механизм является преобладающим; во-вторых, она указывает, что при освещении светом, особенно в примесной области, модулируется скорость биполярного дрейфа, т.е. она уменьшается.

В резюме можно сказать, что с ростом плотности тока происходит изменение свойств базы ИФД со структурой $pSi-nCdS-n^+CdS$, приводящее к изменению закономерности протекания тока в зависимости от напряжения смещения и механизма переноса тока в исследуемой структуре.

В результате этих процессов подвергаются к глубокому изменению такие фундаментальные величины как подвижности биполярной диффузии μ_α и дрейфа μ_1 , длины биполярной диффузии L_α и дрейфа L_{dr} , а также время жизни электронно-дырочной плазмы. Такие кардинальные изменения микропараметров полупроводниковых материалов происходит тогда, когда в базе структуры имеется сильная неоднородность и возле идеального контакта создается высокий градиент неосновных носителей – дырок, которые позволяют пренебрегать вкладом генерационно-рекомбинационных процессов в релаксацию возмущений электронно-дырочной плазмы по сравнению с релаксацией диффузионно-дрейфовых потоков.

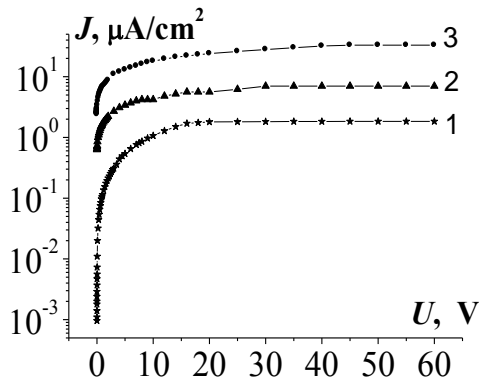
Такой процесс допустимо тогда, когда длина биполярного дрейфа дырок приобретает большие значения (т.е. когда $L_{dr} \gg L_\alpha$). При таком значении длины биполярного дрейфа даже малое излучение светом приводит к резкому возрастанию дрейфового тока из-за процесса усиления первичного фототока, что обеспечивает больших величин интегральной и спектральной чувствительности.

Обнаружено, что при плотностях тока $I = 10^{-2} - 5 \cdot 10^{-4} \text{ A/cm}^2$ в структуре реализуется режим «длинных» диодов и при этом величины S_{int} и S_λ становятся самыми высокими. Например, $S_{int} = 2,8 \cdot 10^4 \text{ A/lm}$ ($3 \cdot 10^6 \text{ A/W}$) при значении освещенности $E = 0,1 \text{ лк}$ и $S_\lambda = 2,3 \cdot 10^4 \text{ A/W}$ при облучении лазерным излучением с $\lambda = 625 \text{ nm}$. Эти величины для интегральной и спектральной чувствительностей являются рекордными для комнатной температуры. Таким образом, можно сделать вывод о том, что механизм усиления первичного фототока при больших плотностях тока, в основном, определяется модуляцией амбиполярной подвижности носителей тока.

Представляет большой интерес поведение сублинейного участка ВАХ при освещении белым светом и примесного освещения лазерным излучением с длиной волны $\lambda = 0,625 \mu\text{m}$ и мощностью $P = 10 \mu\text{W/cm}^2$, которые приведены на рис.11. Из этого рисунка следует, что световые и темновые ВАХ имеют одинаковую закономерность, и они отличаются только лишь по величине тока. Разница между ними при освещении лазером более $\sim 1,5$ порядка, а при освещении белым светом в четыре раза больше по величине тока.

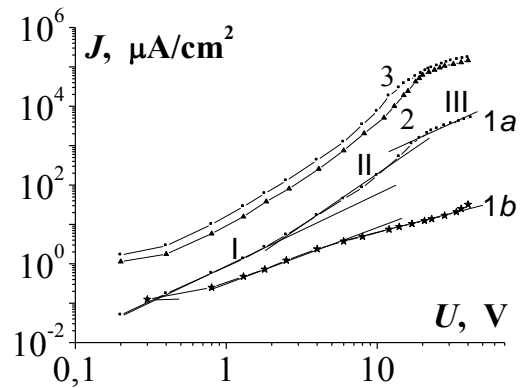
При облучении лазером спектральная чувствительность $S_\lambda \approx 3,3 \text{ A/W}$ при напряжении смещения $U = 60 \text{ V}$, а при освещении белым светом освещенностью $E = 0,1 \text{ lux}$ и $U = 60 \text{ V}$ интегральная чувствительность имеет значение $S_{int} \approx 0.69 \text{ A/lm}$ ($\sim 76 \text{ A/W}$). Эти результаты показывают (см.табл.2), что при облучении лазером и белым светом на сублинейном участке происходит усиление первичного фототока, которое в более 6 раз превышает фоточувствительность идеального фотоприемника ($S_\lambda \approx 0,5 \text{ A/W}$) при освещении лазером с длиной волны $\lambda = 0,625 \mu\text{m}$ и мощностью $P = 10 \mu\text{W/cm}^2$, а при освещении белым светом с интенсивностью $E = 0,1 \text{ lux}$ значение S_{int} почти в двад-

цать раз больше, по сравнению со спектральной чувствительностью идеального фотоприемника при $\lambda = 0,625 \mu\text{m}$.



обратная ветвь в темноте (1), обратная ветвь при облучении белым светом с $E = 0,1 \text{ lux}$ (2), обратная ветвь при лазерном облучении с $\lambda = 625 \text{ nm}$ мощностью $P = 10 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ (3)

Рис.11. Темновые и световые ВАХ $n^+\text{CdS}-n\text{CdS}-n\text{Si}$ -гетероструктуры в полулогарифмическом масштабе



в темноте (кривая 1a, прямая ветвь, кривая 1b, обратная ветвь); при освещении белым светом с $E = 4 \cdot 10^{-1} \text{ lux}$ (кривая II, прямая ветвь) и при лазерном облучении с $\lambda \approx 625 \text{ nm}$ и мощностью $0,75 \text{ mW}/\text{cm}^2$ (кривая III, обратная ветвь)

Рис.12. Темновые и световые ВАХ $n^+\text{CdS}-n\text{CdS}-n\text{Si}$ -гетероструктуры в логарифмическом масштабе

Таблица 2

Зависимости фототока (I_{ph}), интегральной чувствительности (S_{int}), спектральной чувствительности (S_{λ}) от напряжения смещения (U)

| Белый свет | | | | | Лазерное облучение | | |
|------------|---------|--|--|---|--------------------------------------|--|--|
| E (lux) | U , V | $I_f, \frac{\mu\text{A}}{\text{cm}^2}$ | $S_{\text{int}}, \frac{\text{A}}{\text{lm}}$ | $S_{\text{int}}, \frac{\text{A}}{\text{W}}$ | $P, \frac{\mu\text{W}}{\text{cm}^2}$ | $I_f, \frac{\mu\text{A}}{\text{cm}^2}$ | $S_{\lambda}, \frac{\text{A}}{\text{W}}$ |
| 0.1 | 5 | 3.65 | 0.365 | 40.1 | 10 | 13.1 | 1.31 |
| | 10 | 4.3 | 0.43 | 47.36 | | 18.83 | 1.883 |
| | 60 | 6.9 | 0.6916 | 76 | | 32.8 | 3.28 |

На рис.12 представлены темновые и световые ВАХ типичного образца $n^+\text{CdS} - n\text{CdS} - n\text{Si}$ -гетероструктуры в двойном логарифмическом масштабе. При этом кривая 1a соответствует прямому, а кривая 1b обратному направлению смещения. Прямая ветвь при освещении белым светом освещенностью $E = 4 \cdot 10^{-1} \text{ lux}$ (кривая 2) и прямая ветвь при освещении лазерным лучом с $\lambda \approx 625 \text{ nm}$ мощностью $0,75 \text{ mW}/\text{cm}^2$ (кривая 3). Из этого видно, что световые ВАХ $n^+\text{CdS} - n\text{CdS} - n\text{Si}$ -гетероструктуры сильно отличаются от темновых ВАХ по величине тока при одном и том же значении напряжения смещения. Кроме того отличие между ними тем больше, чем больше величина напряжения смещения – U . Например, когда ток при $U = 10 \text{ V}$ в темноте имеет значение $I_t = 184 \cdot 10^{-6} \text{ A}/\text{cm}^2$, то токи, измеренные под действием лазерного излучения мощностью $0,75 \text{ mW}/\text{cm}^2$ и белого света с

освещенностью $E = 4 \cdot 10^{-1}$ lux, соответственно, равны $7700 \cdot 10^{-6}$ А/см² и $1430 \cdot 10^{-6}$ А/см², при том же напряжении смещения.

Отсюда следует, что в исследуемой структуре происходит внутреннее усиление первичного фототока. Проведенный расчет для фототока (I_{ph}) также подтверждает данное предположение. При расчете допускалось, что вся падающая световая энергия в виде фотонов, генерирует неравновесных носителей, которые без потерь разделяются потенциальными барьерами и вносят вклад в фототок. В этом случае лазерное облучение с $\lambda \approx 625$ nm и мощностью $0,75$ мВт/см² будет генерировать $I_{ph} = 3 \cdot 10^{-4}$ А/см², который является фототоком идеального фотоприемника. Такого фотоприемника, как указывалось выше, не существует и его невозможно создать в принципе. Тем не менее, эта величина фототока более 25 раз меньше величины I_{ph} , измеренного при лазерном облучении с данной мощностью.

Отметим, что лазерное излучение ($\lambda = 0.625$ μm) для сульфида кадмия является примесным освещением. Приведенный эксперимент показывает, что с уменьшением мощности лазерного излучения возрастает величина спектральной чувствительности (S_λ). Например, при энергии $P = 10$ μВт/см² спектральная чувствительность имеет значение ≈ 1080 А/Вт при $U = 10$ В, тогда как при $P = 0,75$ мВт/см² она равна $6,7$ А/Вт при том же напряжении смещения.

Возрастание чувствительности к малым световым сигналам наглядно проявляется при облучении образца белым светом. При освещенности $E = 1$ lux на образец с активной площадью $S \approx 4 \cdot 10^{-2}$ см² падает $3,6 \cdot 10^{-8}$ Вт световая мощность в видимой части электромагнитного излучения. При этом число квантов, падающих на образец, составляет $N = 1,2 \cdot 10^{11}$ см⁻²·с, а фототок равен $2 \cdot 10^{-8}$ А·см⁻². Такое число квантов получено при следующих предположениях, вся энергия состоит из энергии фотонов, которая равна средней энергии квантов, падающих на образец в спектральном диапазоне $490 \div 1300$ nm, т.е. $\eta\nu = \{2,53$ eV ($\lambda = 490$ nm) + $0,95$ eV ($\lambda = 1300$ nm) $\}/2 = 1,75$ eV ($\lambda_{cp} = 895$ nm). Вычисленная таким путем величина I_{ph} в $7 \cdot 10^5$ раза меньше, чем величина фототока измеренного на эксперименте при напряжении смещения $U = 10$ В. Напомним, что вычисленный фототок соответствует величине фототока идеального ФП, работающего при $\lambda_{cp} = 895$ nm ($\eta\nu = 1,75$ eV), поэтому эта величина завышена, а реальная его величина, намного меньше.

Эксперименты показали, что величина S_{int} уменьшается, с увеличением энергии как белого света, так и при лазерном облучении. Например, при увеличении освещенности белого света в 10 раз от $2,5 \cdot 10^{-2}$ лк до $25 \cdot 10^{-2}$ lux величина интегральной чувствительности уменьшается в три раза притом же напряжении смещения $U = 10$ В. Проведенный анализ показывает, что прямая ветвь ВАХ, измеренная в темноте имеет два участка, которые описываются степенными зависимостями тока от напряжения в виде $I \sim U^2$ и $I \sim U^3$.

Таким образом, на основе сильно компенсированной поликристаллической пленки CdS с $\rho \approx 10^8$ Ом·см создана диодная структура $n^+CdS - nCdS - nSi$ с развитой аккумуляцией, у которой $w/L \geq 10$. Последовательность ВАХ

$I \sim U^2$ и $I \sim U^3$ в темноте и на свету (рис.12) также убедительно подтверждает, что исследуемая структура является структурой с развитой аккумуляцией, ибо только в такой структуре из-за наличия диффузионных и дрейфовых потоков, направленных навстречу друг другу, образуются области «инжекционного обеднения». При малых величинах тока образуется область «инжекционного обеднения» сравнительно с малым сопротивлением. Этим обстоятельством объясняется последовательность зависимости $I \sim U^2$, $I \sim U^3$ в прямой ветви ВАХ. Напомним, что зависимость $I \sim U^2$ обусловлен с механизмом переноса тока плазмой, инжектированной в полупроводник, а зависимость $I \sim U^3$ плазмой, инжектированной в изолятор.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе определения электронных процессов, характеризующих динамических и статических характеристик, а также механизмов переноса тока в инжекционных фотоприемниках на основе $n^+CdS - nCdS - pSi$ - и $n^+CdS - nCdS - nSi$ -гетероструктур сделаны следующие выводы:

1. Определены технологические условия получения $n^+CdS - nCdS - pSi$ - и $n^+CdS - nCdS - nSi$ - гетероструктур путем напыления порошков CdS на кремниевые пластины в квазизамкнутой вакуумной системе.

2. Показано, что в условиях комнатной температуры $n^+CdS - nCdS$ -переход, в прямом направлении смещения находится в режиме аккумуляции. При освещении белым светом с освещенностью $E = 0.1$ lux, он имеет интегральную чувствительность $S_{int} = 2,8 \cdot 10^4$ A/lm ($3 \cdot 10^6$ A/W), а при освещении лазерным лучом с длиной волны $\lambda = 0,625$ нм и мощностью $P = 10$ μ W/cm², спектральную чувствительность $S_\lambda \approx 2.3 \cdot 10^4$ A/W.

3. Выявлено туннелирование дырок из кремния p -типа (pSi -подложка) в базу ($nCdS$) через поверхностные состояния, имеющиеся на границе раздела и расположенные в нижней половине запрещенной зоны кремния в условиях прямого смещения гетероперехода $pSi - nCdS$.

4. Показано, что $pSi - nCdS$ -гетеропереход при обратном смещении гетероструктуры $n^+CdS - nCdS - pSi$ является неидеальным инжектирующим контактом (для электронов), в то же время со стороны $nCdS$ -базы он является эффективным аккумулялирующим контактом и не прозрачным для дырок, что обуславливает появление сублинейного участка ВАХ.

5. Установлено, что имеющаяся точка инверсии знака фоточувствительности $n^+CdS - nCdS - pSi$ -гетероструктуры как в коротковолновой ($\lambda = 350 \div 865$ nm), так и в длинноволновой ($\lambda = 865 \div 1300$ nm) областях спектра электромагнитного излучения, происходит за счет полной компенсации светового и темнового токов, направленных навстречу друг другу.

6. Показано, что при комнатной температуре обратная ветвь ВАХ $n^+CdS - nCdS - pSi$ -гетероструктуры состоит из четырех участков и основным механизмом переноса тока на первом участке является термоэлектронная эмиссия, на втором участке диффузионный, на третьем участке направленный противоположно к дрейфовому току диффузионный, на четвертом участке диффузионно-дрейфовый механизмы.

7. Экспериментально выявлено, что при термодинамическом равновесии, на границе раздела $n\text{CdS} - p\text{Si}$ -гетероперехода при значениях поверхностного потенциала $\psi_s = 0,04 \text{ eV}$ образуются отрицательно заряженные поверхностные состояния акцепторного типа; при отрицательных значениях ψ_s плотность поверхностных состояний (N_{ss}) имеет высокие, а при положительных значениях ψ_s низкие значения.

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

PHYSICO-TECHNICAL INSTITUTE

SAPAYEV IBROHIM BAYRAMDURDIEVICH

**THE ELECTRON PROCESSES IN THE INJECTION DIODES BETWEEN
CADMIUM SULFIDE AND SILICON**

01.04.10 – Physics of semiconductors

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

TASHKENT–2018

The theme of dissertation of doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences was registered at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2017.1.PhD/FM38

Dissertation has been prepared at physical-technical institute.

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

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

Official opponents: **Abdurakhmanov Kakhkhar Pattakhovich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Kamalov Amangeldi Bazarbaevich
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Leading organization: Namangan State University

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

Dissertation is possible to review in Information-resource centre at Physical-technical institute (is registered № _____) (Address: 100084, Uzbekistan, Tashkent,2B Bodomzor yuli street. Phone/fax: (+99871) 235-42-91, e-mail: lutp@uzsci.net).

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

S. A. Bakhrarov

Chairman of scientific council on award of scientific degrees, D.F.-M.S., academician AS UzR

A. V. Karimov

Scientific secretary of scientific council on award of scientific degrees, D.F.-M.S., professor

I. G. Atabaev

Chairman of scientific Seminar under Scientific Council on award of scientific degrees, D.F.-M.S., professor

INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

The aim of research work is to establish the mechanisms of current transfer in $n^+\text{CdS} - n\text{CdS} - p\text{Si}$ - и $n^+\text{CdS} - n\text{CdS} - n\text{Si}$ - heterostructures that act as injection photodetectors with internal amplification and tunable range of spectral sensitivity and patterns of formation of their volt-farad, dark and light current characteristics.

The objects of the research work are CdS films obtained on silicon substrates by thermal spraying of CdS powders in a vacuum, $n^+\text{CdS}-n\text{CdS}-p\text{Si}$ - and $n^+\text{CdS}-n\text{CdS}-n\text{Si}$ heterostructures based on them, as well as their volt-ampere, volt-farad and spectral characteristics.

Scientific novelty of the research work:

for the first time developed the technology of the obtaining thin CdS films on silicon substrates by sputtering CdS powders in a quasi-closed vacuum system, and $n^+\text{CdS} - n\text{CdS} - p\text{Si}$ and $n^+\text{CdS} - n\text{CdS} - n\text{Si}$ heterostructures using them as injection photodetectors with internal amplification and tunable range of the spectral sensitivity;

it has been experimentally established that $n^+\text{CdS} - n\text{CdS} - p\text{Si}$ heterostructures have a wide range of spectral sensitivity located in the wavelength range 389-1238 nm, with one high «peak» at 475 nm and three small "peaks" have different levels at wavelengths of 618 nm, 740 nm and 821.8 nm, respectively;

it has been proved experimentally that thermodynamic equilibrium at the interface of the $n\text{CdS}-p\text{Si}$ - heterojunction creates surface states of an acceptor type with a surface potential $\psi_s = 0,04$ eV, which acquire high values (N_{SS}) for negative polarities of the surface potential ψ_s , and when ψ_{ss} is positive it acquires small values;

it was proved that with increasing bias voltage, the injection of electrons from the $p\text{Si}$ substrate into the base region leads to an increase in the photocurrent and an expansion of the spectral range toward short wavelengths is due to increase of the coefficient of accumulation of the charge carriers;

optimized technological regimes for obtaining the contact region were found, to thin films of cadmium sulphide consisting of spraying indium in a vacuum to a heterostructure heated to 373 K followed by thermal annealing at 673 K for 30 seconds.

Implementation of the research results. The results of investigations of electronic processes in injection photodiodes based on $n^+\text{CdS} - n\text{CdS} - p\text{Si}$ and $n^+\text{CdS} - n\text{CdS} - n\text{Si}$ -heterostructures were applied:

technological regimes for obtaining contact to the surface of thin ones were used in the international project T15MH-001 «Investigation of physical and antibacterial properties of metal and metallocene fuscillerides, identification of their application in medical instrument coatings» for obtaining ohmic contacts to thin layers of samples. (Reference of the Institute of Heat and Mass Transfer of the NAS of Belarus from 2017 on October 11). Application of scientific results

allowed to get contacts to nanostructured samples and to conduct research of physical features of current characteristics.

to obtain contacts with a small ohmic resistance on the surface of nanofilms in the implementation of the project $\Phi 2-\Phi A-\Phi 161$ «Study of the mechanisms of formation of nanosized heterostructures created by the method of ion implantation on the surface of free thin films (Al, Cu, Ag, and Cu-Si) and massive crystals (W, WO_n , TiN, CdTe and SiO_2) and their physicochemical properties» (Reference № $\Phi TA-02-11/1150$ of 21 November 2017 of the Agency of Science and Technology of the Republic of Uzbekistan). Application of scientific results allowed to determine the dispersion of the characteristic spectra of energy loss by electrons reflected and passed through free thin films;

Structure and scope of the dissertation. The thesis consists of an introduction, four chapters, a conclusion and a list of used literature. It is set out on 116 pages of text, contains 20 figures, 4 tables and a list of used literature consists of 78 titles.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙЎХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; part I)

1. Сапаев И.Б. Инжекционный фотодиод на основе nSi-nCdS-n⁺CdS-структуры // Физическая инженерия поверхности. – Харьков, 2013, № 3 – vol.11. – С. 260–262. (01.00.00.№91)

2. Mirsagatov Sh.A., Sapaev I.B. Injection photodiodes based on a p-Si-n-CdS-n⁺CdS // Semiconductors, 2014, vol. 48, № 10, pp. 1363-1369. (№11. Springer, IF: 0.602).

3. Mirsagatov Sh.A., Sapaev I.B. Photoelectric and electrical properties of a reverse – biased p-Si/-n-CdS/-n⁺CdS heterostructure // Inorganic Materials may 2014, vol. 50, Issue 5, pp. 437-442. (№11. Springer, IF: 0.602).

4. Сапаев И.Б. Технология получения инжекционного фотодиода на основе n⁺CdS-nCdS-nSi и n⁺CdS-nCdS-pSi структуры // Доклады Академии Наук РУз. – Ташкент, 2016. – Вып. 3. – С. 28-30. (01.00.00.№7)

II бўлим (II часть; part II)

5. Sapaev I.B., Sapaev V., Aitbaev V. Получение пленок CdS на Si подложках методом вакуумного испарения // International conference «Crystal materials 2010» ICCM 2010. Program and Abstracts Book. Kharkov, Ukraine. – С. 42.

6. Сапаев И.Б., Мирсагатов Ш.А. Спектральная характеристика pSi-nCdS- n⁺CdS структуры // Яримўтказгичлар физикаси ва қурилмалари ҳамда уларни ўқитишнинг муоммалари худудий илмий анжуман, Наманган, 26 апрель 2013. – С. 96-98

7. Сапаев И.Б., Мирсагатов Ш.А. Инжекционный фотодиод на основе фоточувствительной поликристаллической пленки CdS // IV Международная конференция по актуальным проблемам молекулярной спектроскопии конденсированных сред. 29-31 май 2013, Самарканд – С. 157-158

8. Сапаев И.Б., Мирсагатов Ш.А. Распределение плотности поверхностных состояний по ширине запрещенной зоны кремния // Материалы международной конференции посвященной 70-летию физико-технического института «Физика-Солнце». – 14-15 ноября 2013, Ташкент – С. 181-183.

9. Сапаев И.Б., Мирсагатов Ш.А. Инжекционный фотодиод на основе фоточувствительной поликристаллической пленки CdS // Фундаментальные и прикладные вопросы физики. Сборник тезисов докладов республиканской конференции, посвященной 100-летию академика С.А.Азимова. 6-7 ноября 2014, Ташкент – С. 120-121.

Авторефератнинг ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги нусхалари
«Тил ва адабиёт таълими» журнали таҳририясида таҳрирдан ўтказилди
(10.12.2017 йил).

Босишга рухсат этилди: 30.01.2018 йил.
Бичими 60x44 ¹/₁₆, «Times New Roman»
гарнитурда рақамли босма усулида босилди.
Шартли босма табағи 3. Адади: 100. Буюртма: № 19.

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

«АКАДЕМИЯ НОШИРЛИК МАРКАЗИ»
Давлат унитар корхонасида чоп этилди.