

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

---

**МУҲАММАД АЛ-ХОРАЗМИЙ НОМИДАГИ ТОШКЕНТ АХБОРОТ  
ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ УНИВЕРСИТЕТИ**

**ЖУМАНИЁЗОВ ИБРОҲИМ ОТАХОНОВИЧ**

**ФОТОСЕЗГИР  $Ga_xIn_{1-x}P/GaP$  ГЕТЕРОТУЗИЛМАЛАРГА ВА УЛАР  
АСОСИДАГИ ПОҒОНАЛИ ФОТОЎЗГАРТГИЧЛАРГА ТЎПЛАНГАН  
НУРЛАРНИНГ ТАЪСИРИ**

**01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси**

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

**Тошкент – 2019**

**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)  
of physical and mathematical sciences**

**Жуманиёзов Иброҳим Отахонович**

Фотосезгир  $Ga_xIn_{1-x}P/GaP$  гетеротузилмаларга ва улар асосидаги  
поғонали фотоўзгартгичларга тўпланган нурларнинг таъсири ..... 3

**Жуманиязов Иброҳим Отахонович**

Воздействие концентрированного света на фоточувствительные  
 $Ga_xIn_{1-x}P/GaP$  гетероструктуры и каскадные фотопреобразователи на их  
основе ..... 21

**Jumaniyozov Ibrohim Otakhonovich**

Influence concentrated light on photosensitive  $Ga_xIn_{1-x}P/GaP$  heterostructure  
and cascade photoconverters on their base ..... 39

**Эълон қилинган ишлар рўйхати**

Список опубликованных работ  
List of published works ..... 43

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

---

**МУҲАММАД АЛ-ХОРАЗМИЙ НОМИДАГИ ТОШКЕНТ АХБОРОТ  
ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ УНИВЕРСИТЕТИ**

**ЖУМАНИЁЗОВ ИБРОҲИМ ОТАХОНОВИЧ**

**ФОТОСЕЗГИР  $Ga_xIn_{1-x}P/GaP$  ГЕТЕРОТУЗИЛМАЛАРГА ВА УЛАР  
АСОСИДАГИ ПОҒОНАЛИ ФОТОЎЗГАРТГИЧЛАРГА ТЎПЛАНГАН  
НУРЛАРНИНГ ТАЪСИРИ**

**01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси**

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

**Тошкент – 2019**

**Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2017.3.PhD/FM105 рақам билан рўйхатга олинган.**

Диссертация Муҳаммад ал-Хоразмий номидаги Тошкент ахборот технологиялари университетида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифасида ([www.fti-kengash.uz](http://www.fti-kengash.uz)) ва «ZiyoNet» ахборот-таълим порталида ([www.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz)) жойлаштирилган.

**Илмий раҳбар:**

**Абдуқодиров Мухитдин Абдурашитович**  
техника фанлари доктори, профессор

**Расмий оппонентлар:**

**Каримов Абдулазиз Вахитович**  
физика-математика фанлари доктори, профессор

**Илиев Халмурат Миджитович**  
физика-математика фанлари доктори, профессор

**Етакчи ташкилот:**

**Ўзбекистон Миллий Университети**

Диссертация ҳимояси Физика-техника институти ҳузуридаги DSc.30.05.2018.FM/Т.34.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2019 йил «\_\_\_» \_\_\_\_\_ соат \_\_\_\_\_ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100084, Тошкент шаҳри, Чингиз Айтматов кўчаси, 2Б-уй. Физика-техника институти маъмурий биноси мажлислар зали. Тел./факс: (+99871) 235-42-91; e-mail: [info.fti@uzsci.net](mailto:info.fti@uzsci.net)).

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

Диссертация автореферати 2019 йил «\_\_\_» \_\_\_\_\_ да тарқатилди.

(2019 йил «\_\_\_» \_\_\_\_\_ даги \_\_\_ рақамли реестр баённомаси).

**Н.Р. Авезова**

Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш раиси, т.ф.д.

**А. Ғ. Комилов**

Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш илмий котиби, т.ф.н.

**А.В. Каримов**

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

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

**Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати.** Бугунги кунда дунёда яримўтказгичли фотоўзгартгичнинг жадал ривожланаётган соҳасида поғонали тузилмага эга тузилмаларда тўпланган қуёш нурланишини электр энергиясига ўзгартириш механизмини ўрганиш истикболли йўналишлардан бири ҳисобланади. Бу жабҳада фотоўзгартирувчи тузилмалар учун галлий фосфид тагликдаги индий-галлий-фосфид гетерокатламларни олиш технологиясини ишлаб чиқиш ва электромагнит ва фотон кўзғалишида уларда содир бўладиган физикавий жараёнларни ўрганиш, уларнинг поғонали кўринишида бажарилганидаги хусусиятларини аниқлаш қуёш энергиясини фотоэлектрик ўзгартиришнинг асосий муаммоларидан бири ҳисобланади.

Бугунги кунда жаҳонда поғонали фотоўзгартирувчи тузилмаларда қуёш нурланишини ўзгартиришнинг хусусиятларини, жумладан тўпланган қуёш оқими таъсирида салт юриш кучланиши ва қисқа туташув токини ўрганишга катта эътибор қаратилмоқда. Бу соҳада мақсадли тадқиқотларни, айнан эса, қуйида келтирилган йўналишларни амалга ошириш муҳим масалалардан бири ҳисобланади: суюқ фазали эпитаксияда  $Ga_xIn_{1-x}P$  юпка эпитаксиал қатламларнинг кристалланиш жараёнини ўрганиш; суюқ фазадан рухнинг паст ҳароратли диффузияси асосида  $pGa_xIn_{1-x}P$  p-n ўтишларнинг шаклланиш имкониятларини аниқлаш; таглик кристалининг фотоўзгартирувчи тузилмаларда механикавий кучланишларга таъсирини ўрганиш;  $Ga_xIn_{1-x}P$  қаттиқ қотишма таркибининг улар асосидаги фотоўзгартирувчи тузилмаларнинг электр ва оптик хоссаларига таъсирини аниқлаш; ёруғлик оқими концентрацияси даражасининг икки томонлама контакт тўрига эга фотоўзгартгичларнинг фотоэлектрик ва иссиқлик хоссаларига таъсирини ўрганиш; қуёш энергияси поғонали фотоўзгартгичларнинг самарадорлигини ошириш йўллариини излаш.

Мамлакатимизда фотоэлектрик ўзгартириш жараёни бўйича ишларга катта эътибор қаратилмоқда, жумладан монокристалл кремний асосидаги кремнийли қуёш модуллари ишлашининг чегаравий имкониятлари аниқланди, иссиқ шароитларга мос келадиган энг мақбул ишчи режимлар ва ишчи соҳалар оралиқлари аниқланди. Ўзбекистон Республикасини 2017-2021 йилларда янада ривожлантиришнинг Ҳаракатлар стратегиясига кўра, илмий-тадқиқот ва инновация фаолиятларини рағбатлантириш, энерготежамкор технологияларни ишлаб чиқаришга кенг жорий этиш, қайта тикланадиган энергия манбаларидан фойдаланишни кенгайтириш масалалари кўрсатилган. Бу жабҳада гетероўтишлар самарали фотоўзгартгичларни ишлаб чиқиш муҳим масалалардан бири ҳисобланади.

Ушбу диссертация тадқиқоти Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2019 йил 30 майдаги ПҚ-4348-сонли «Электротехника саноатини янада ривожлантириш, ва соҳанинг инвестицион ва экспорт потенциалини янада ривожлантириш учун қулай шароитларни яратиш бўйича қўшимча чора-

тадбирлар тўғрисида» ги, 2018 йил 14 июлдаги ПҚ-3855-сонли «Илмий ва илмий-техникавий фаолият натижаларини тижоратлаштириш самарадорлигини ошириш бўйича кўшимча чора-тадбирлар тўғрисида» ги ва 2017 йил 17 февралдаги ПҚ-2789-сонли «Фанлар академиясининг фаолиятини, илмий-тадқиқот фаолиятини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида» ги Қарорлари, шунингдек мазкур соҳада қабул қилинган фаолиятга тегишли бошқа меъерий-ҳуқуқий ҳужжатларда кўзда тутилган вазифаларни бажаришга муайян даражада хизмат қилади.

**Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги.** Диссертация иши Ўзбекистон Республикаси фан ва технологиялари ривожланишининг II. «Энергетика, энерго- ва ресурс тежамкорлиги» устувор йўналиши доирасида бажарилган.

**Муаммонинг ўрганилганлик даражаси.** Япониялик олимлар томонидан гетероўтишли қуёш элементларининг фойдали иш коэффициентлари (ФИК)ни 25,5% га оширишга имкон берадиган, изотип ва анизотип ўтишларга эга фотоэлектрик ўзгартгичларни олиш технологияси ишлаб чиқилган<sup>1</sup>.

Ж.И.Алфёров<sup>2</sup> бошчилигидаги Россиялик олимлар ва уларнинг ходимлари томонидан галлий арсенид бирикмаси асосидаги поғонали фотоўзгартгичлар ишлаб чиқилган бўлиб, улар мужассамлашган қуёш нурланиши усулидан фойдаланганда қуёш нурланишининг тўпланиш даражасига мутаносиб равишда юзани кичрайтирадиган, қуёш энергиясини ўзгартиришнинг энг юқори самарадорлигини таъминлайди.

Бугунги кунда Ўзбекистонлик олимлар томонидан академик Р.А.Мўминов<sup>3</sup> раҳбарлигида қуёш элементларининг самарадорлигини уларга нанотузилмавий компонентларни киритиш йўли билан ошириш бўйича тадқиқотлар олиб борилмоқда. Шунингдек профессор А.М. Қосимохунова<sup>4</sup> томонидан гетероўтишли кремнийли фотоўзгартгичларнинг параметрларига ички қаршилик таъсирининг тадқиқотлари ўтказилган, кетма-кет қаршиликнинг гетероўтишли қуёш элементининг ўзгартириш самарадорлигига таъсири аниқланган ва уларнинг тайёрлашнинг технологик кетма-кетлиги баён этилган.

Бироқ ёруғлик нурланишининг мужассамлашган оқими билан ёритиш шароитида поғонали фотоўзгартгичларнинг хусусиятлари тўлиғича ўрганилмаган.

<sup>1</sup> K.Masulko, M.Shigematsu, T.Hashiguchi et al. IEEE J. Photovolt., 4(6), 1433 (2014).

<sup>2</sup> Ж.И. Алфёров, В.М. Андреев, В.Д. Румянцев. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики // Физика и техника полупроводников, 2004, том 38, вып. 8, С. 937-948.

<sup>3</sup> Джалалов Т.А., Имамов Э.З., Муминов Р.А. Электрофизические свойства новой контактной структуры нанобъект-полупроводник // Журнал технической физики.-Россия, 2015. -Т. 85, № 5. -С.110-115.

<sup>4</sup> Олимов Ш.А. Ноу-фу Чен, Касимахунова А.М. Технология получения гетеропереходных кремниевых фотопреобразователей и исследование влияние внутреннего сопротивления // XIX международная научно-практическая конференция, МЦНС «Наука и просвещение», 2019 г., С.37-42, www.naukaip.ru

**Тадқиқотнинг диссертация бажарилган олий таълим муассасаси илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги.** Диссертация иши «Ютилиш қатлами ўта чекланган кенг зонали  $A^{III}B^V$  бирикмаларнинг икки томонлама гетеротузилмалар яратиш ва улар асосидаги поғонали фотоўзгартгичлар яратишнинг физикавий асосларини текшириш» (2007-2011йй.) мавзусидаги БВ-Ф2-005 фундаментал тадқиқотлар лойиҳаси ва МК-03/2010 «Соҳалараро нурланишли фосфид галлийли яримўтказгич гетеротузилмани олиш ва тадқиқ этиш» (2010-2012 йй.) мавзусидаги халқаро илмий лойиҳа доирасида бажарилган.

**Тадқиқотнинг мақсади** мужассамлашган, яъни тўпланган қуёш нурланишининг галлий фосфид таглигида олинган индий-галлий-фосфид гетеротузилма асосидаги поғонали тузилмаларнинг фотоэлектрик хоссаларига таъсири механизмларини аниқлашдан иборат.

**Тадқиқотнинг вазифалари:**

суяқ фазали эпитаксияда олинган  $Ga_xIn_{1-x}P$  нинг юпқа эпитаксиал қатламларининг кристалланиш жараёнини тадқиқ этиш;

газ фазасидан рухнинг паст ҳароратли диффузияси асосида  $pGa_xIn_{1-x}P$  p-n ўтишларни шакллантириш имкониятларини аниқлаш;

фотоўзгартгич гетеротузилмаларда таглик кристаллининг механик кучланишларга таъсирини ўрганиш;

$Ga_xIn_{1-x}P$  қаттиқ эритмалар таркибининг улар асосидаги фотоўзгартгич тузилмаларнинг электр ва оптик хусусиятларига таъсирини аниқлаш;

икки томонлама тўрсимон контактли фотоўзгартгичларнинг фотоэлектрик ва иссиқлик хусусиятларига ёруғлик оқими тўпланиш даражасининг таъсирини ўрганиш;

қуёш энергияси фотоўзгартгичларининг самарадорлигини ошириш йўллари излаш.

**Тадқиқотнинг объекти**  $Ga_xIn_{1-x}P/GaP$  асосидаги гетеротузилмалар, шунингдек қуёш энергиясининг бир ва кўп ўтишли фотоўзгартгичларидан иборат.

**Тадқиқотнинг предмети**  $Ga_xIn_{1-x}P/GaP$  гетеротузилмаларни олиш технологиясининг хусусиятлари ва уларнинг фотоэлектрик характеристикаларига мужассамлашган нурларнинг таъсири механизмларидан иборат.

**Тадқиқотнинг усуллари.** Диссертация ишини бажариш жараёнида паст ҳароратли суяқ фазали эпитаксия, металлографик тадқиқотлар, вольт-фарад ва вольт-ампер характеристикалар, мужассамлашган қуёш нури оқими билан ёритиш каби илмий-тадқиқот усулларидан фойдаланилган.

**Тадқиқотнинг илмий янгилиги** қуйидагилардан иборат:

поғонали қуёш элементлари учун истиқболли бўлган мукаммал тузилмаси юпқа ( $d \leq 2 \mu\text{м}$ )ли гетероэпитаксиал  $Ga_xIn_{1-x}P$  ( $0,6 \leq x \leq 1,0$ ) қатламларни суяқ фазадан ишчи қатлам ва таглик орасига гетерочегарадан панжара доимийси бир

текис ортиб турувчи оралиқ қатлам киритиш йўли билан олиш мумкинлиги кўрсатиб берилган;

база қатлами қалинлиги билан  $Ga_xIn_{1-x}P$  қаттиқ эритманинг ёруғлик нурланишини самарали ўзгартиришни таъминлайдиган ўзаро алоқаси аниқланган;

кенг зонали  $Ga_xIn_{1-x}P/GaP$  яримўтказгичлар асосидаги фотоўзгартгичларнинг ҳаво-конвектив табиий иссиқлик алмашуви режимида ҳам, қуёш нури оқимининг 100 карралик концентрацияси режимида ҳам ишлай олиши биринчи марта кўрсатилган;

$AlInP/InP/GaInAs$  тизимидаги кучайтирилган чиқиш кучланишига ва фотоэлектрик қувватга эга икки томонлама-сезгир уч поғонали фотоўзгартгичлар (ФЎ) биринчи марта таклиф қилинган.

**Тадқиқотнинг амалий натижалари** қуйидагилардан иборат:

қаттиқ эритманинг турли таркибидаги  $Ga_xIn_{1-x}P/GaP$  гетеротузилмани олиш усули ишлаб чиқилган;

поғонали янги қуёш элементи олинган бўлиб, у юқори чиқиш кучланиш ва фотоэлектрик қувватни оширишга имкон беради, шунингдек маълум аналогларидан фарқли равишда совутиш қурилмаларисиз 100 каррали қуёш нурланишида ишлаш қобилиятини таъминлайди.

**Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги** тадқиқот ишида замонавий ва мавжуд синалган усулларидан фойдаланилганлиги, экспериментал маълумотларнинг назарияга ва экспериментларнинг зарур статистикасига мос келиши билан изоҳланади.

**Тадқиқотнинг натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.** Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти кенг зонали яримўтказгичлар асосидаги поғонали гетеротузилмаларда кечадиган жараёнлар ҳақидаги физикавий тасаввурларни кенгайтиришга ёрдам беради.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти шундан иборатки, кўп қатламли гетеротузилмалар ва поғонали фотоўзгартгичлар конструкциясини олишнинг ишлаб чиқилган технологиясидан яхшиланган солиштирма фотоэлектрик қувватга эга қуёш энергетик тизимларини яратишда фойдаланиш мумкин.

**Тадқиқотнинг натижаларининг жорий қилиниши.** Мужассамлашган, яъни тўпланган қуёш нурланиши галлий фосфид таглигида ишлаб чиқилган индий-галлий-фосфид гетеротузилма асосидаги поғонали гетеротузилманинг фотоэлектрик характеристикаларига таъсири механизмларини ўрганиш асосида:

Ўзбекистон Республикаси интеллектуал мулк агентлигининг «Поғонали қуёш элементи» деб номланган икки томонлама-сезгир уч поғонали фотоўзгартгичнинг конструкциясини ишлаб чиқиш бўйича ихтирога патент (№ IAP 04695, 15.04.2013 й.) олинган. Ишлаб чиқилган поғонали қуёш элементи юқори чиқиш кучланишини ( $13 \div 14V$  ва  $8 \div 10 \text{ mA/cm}^2$  га тенг қиска туташув токи) олишга ва маълум аналогларидан фарқли равишда 100 каррали

куёш нурланишида совутиш қурилмаларисиз ишлаш қобилиятини жорий қилишга имкон берган;

$Ga_xIn_{1-x}P$  асосидаги фотоўзгартгичларнинг ҳаво-конвектив табиий иссиқлик алмашуви режимида ҳам, қуёш нури оқимининг 100 каррали қуёш нури режимида ҳам самарали ишлаш имкониятларидан Ф2-ОТ-О-15494 рақамли «Квант нуқтали гетеро- ва нанотузилмалардаги экситонларни, поляронларни ва кўчиш ҳодисаларини тадқиқ этиш асосида нурлагичлар, фотоэлементлар ва бошқа турдаги оптоэлектрон асбобларнинг самарадорлигини яхшилаш» (2012-2016 йй.) фундаментал лойиҳани бажаришда фойдаланилган (Ўзбекистон Республикаси Фан ва технологиялар агентлигининг 2017 йил 18 декабрдаги ФТА-02-11/1320-рақамли маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш квант нуқтали гетеро- ва нанотузилмаларни совутмасдан ишчи ҳароратлари оралиғини аниқлаш имконини берган.

**Тадқиқотнинг натижаларининг апробацияси.** Диссертация ишининг асосий илмий натижалари 7 та халқаро ва 7 та республика миқёсидаги илмий ва илмий-амалий конференцияларда маъруза қилинган ва муҳокамадан ўтказилган.

**Тадқиқотнинг натижаларининг эълон қилинганлиги.** Диссертациянинг асосий натижалари жами 26 та илмий ишда чоп этилган, шулардан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 11 та мақола нашр этилган ва илмий ихтиро учун Ўзбекистон Республикаси Интеллектуал мулк агентлигининг 1 та патенти олинган.

**Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми.** Диссертация кириш, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертациянинг умумий ҳажми 111 бетни ташкил этади.

## ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

**Кириш** қисмида ўтказилган тадқиқотларнинг долзарблиги ва зарурати асосланган, тадқиқотнинг Республикада фан ва технологиялар ривожланишининг асосий устувор йўналишлари билан боғлиқлиги кўрсатилган. Тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган ҳамда амалий аҳамияти очиқ берилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий қилиш, ишнинг апробацияси, шунингдек диссертациянинг ҳажми ва тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг «Галлий арсенид бирикмаси асосидаги қуёш энергиясининг кўп қатламли фотоўзгартгичларнинг фотоэлектрик характеристикаларини тадқиқ қилиш ҳолати ва уларнинг камчиликлари» номли биринчи бобида диссертация мавзуси бўйича адабиёт манбаларининг маълумотлари келтирилган. Поғонали тузилишга эга бир ва кўп ўтишли фотоўзгартгичларнинг, шу жумладан  $A^{III}B^V$  бирикмалар асосидаги гетеротузилмаларнинг асосий хоссалари келтирилган. Фотоўзгартгичлар (ФЎ)

ҳолатининг таҳлили ва ривожланиш тамойиллари асосида диссертация ишининг асосий вазифалари шакллантирилган.

Диссертациянинг «Суюқ фазада эпителизация усули билан  $Ga_xIn_{1-x}P/GaP$  гетеротузилмаларни олиш жараёнини тадқиқ қилиш ва уларнинг физикавий хусусиятларини ўрганиш» деб номланган иккинчи бобида  $GaP$  асосга  $Ga_xIn_{1-x}P$  қаттиқ эритмаларни олишнинг хусусиятлари тавсифланган. Эпитаксиал қатламларни олиш горизонтал реакторга эга қурилмада амалга оширилди. Эпитаксиал қатламларни ўстириш тозаланган водород оқимидаги қотишма-эритманинг чекланган ҳажмидан ўтказилди (тирқиш қалинлиги  $300 \div 500 \mu m$ ). Эпитаксиал қатламларда заряд ташувчилар концентрациясини ўзгартириш учун мос равишда  $n$ - ва  $p$ - турдаги қатламларни олишда эритмага мос равишда  $Te$  ёки  $Zn$  киритилган.  $Ga_xIn_{1-x}P$  қаттиқ эритмани олиш учун металл-эритувчи сифатида индийдан фойдаланилди.  $Ga$  тақсимоти коэффициентининг унинг суюқ фазадаги таркибига боғлиқлиги олинди.  $Ga$  тақсимот коэффициенти унинг суюқ фазадаги миқдorigа боғлиқлигидан,  $GaP-InP$  тизимнинг мазкур хусусияти  $x = 0,75$  да таркиби бўйича етарлича бир жинсли бўлган эпитаксиал қатламни олишга имкон беради.  $Ga$  тақсимот коэффициентининг сезиларли ортиши  $x < 0,75$  да содир бўлади. Суюқ фазадан  $Ga_xIn_{1-x}P$  нинг ўсиш жараёнини тадқиқ қилиш натижалари гетерочегарада  $GaP$  нинг юқори миқдorigа эга бўлган ўзгарувчан таркибли эпитаксиал қатламларни олишнинг қийинлигини кўрсатади. Эпитаксиал қатламлар тузилмавий мукамаллиги металлографик усул билан ўрганилди. Шу нарса аниқландики,  $Ga_xIn_{1-x}P$  нинг ўсиши  $0,8 < x < 0,9$  да ювилгандаги каваклар зичлиги  $10^4 \leq N_d \leq 10^5 \text{ см}^{-2}$  оралиғида ўзгаради. Кавакларнинг кузатилаётган анча паст зичлиги  $Ga_xIn_{1-x}P$  ва  $GaP$  панжара параметрларининг яқинлиги билан изоҳланади ( $\Delta a/a < 1\%$ ).

$x < 0,7$  бўлган  $Ga_xIn_{1-x}P$  эпитаксиал қатламларда ювилишдаги каваклар зичлиги  $10^5 \text{ см}^{-2}$  га етди, бу таъсирлашувчи материаллар панжара параметрлари номувофиқлик даражасининг  $2\%$  ва ундан ортиқ ўсиши билан боғлиқ. Демак гетероужуфтликлар панжара параметрлари номувофиқлигининг белгиловчи таъсири ҳисобига бир қатламли  $Ga_xIn_{1-x}P/GaP$  мукамал кристалл тузилмаларни олиш  $x < 0,7$  да қийин бўлади.

Шу муносабат билан  $x < 0,7$  ли  $Ga_xIn_{1-x}P$  эпитаксиал қатлам ва асос орасида иккита оралиқ қатламни киритиш йўли билан дислокация зичлигини камайтириш имконияти тадқиқ қилинган.  $GaP$  билан чегараланувчи биринчи қатлам  $x = 0,9$  ли  $Ga_xIn_{1-x}P/GaP$  асосида қилинган, иккинчи буфер қатлам эса,  $x = 0,8$  миқдорга эга. Бунда ҳар бир эпитаксиал қатламлар ўртасидаги панжара параметрлари номувофиқлиги  $\Delta a/a = 0,75$  ни ташкил қилди. Юқори қатлами  $Ga_xIn_{1-x}P/GaP$  ( $x \leq 0,7$ ) бўлган бундай уч қатламли тузилмалардаги дислокация зичлиги  $N_d = 10^4 \div 10^5 \text{ см}^{-2}$  гача камайди. Юқори қатламда  $x$  миқдорни кейинчалик ( $x = 0,6$ ) гача ўзгартириш белгиланган қалинликдаги қаттиқ эритмаларни шакллантириш йўли билан амалга оширилди, чунки  $x \leq 0,7$  га тенг бўлган қатламда яримўтказгич  $E_g$  нинг, қаттиқ эритмада галлий тақсимот

коэффициентининг ортиши ҳисобига, камайиши  $100 \div 150$  эВ/см градиент билан юз берди.

Шундай қилиб,  $x=0,8$  ва  $x=0,9$  га тенг оралик қатламларнинг киритилиши билан  $x < 0,7$  ишчи қатламларнинг тузилмавий таркиби сезиларли даражада яхшиланади ва асбоб тузилмаларида қўлланиладиган GaP гомоэпитаксиал қатлам хусусиятларига яқинлашади.

$Ga_xIn_{1-x}P$  эпитаксиал қатламларнинг физикавий хусусиятларини таҳлил қилиш шуни кўрсатдики,  $x=0,7$ дан бошлаб яримўтказгич (ЯЎ) хусусияти сезиларли даражада ўзгаради, хусусан,  $x > 0,7$ ли қатламларда  $x$  миқдорига нисбатан кучсиз боғлиқликка эга юқори ўтказувчанлик устунлик қилади. Кузатилаётган нисбатан юқори ўтказувчанлик шу билан асосланганки, қаттиқ эритманинг берилган таркибида ўтказувчанлик асосан Бриллюэн зонасидаги  $K=(000)$ да жойлашган  $\Gamma$ -минимум электронлари билан белгиланади. « $x$ » нинг ўсиши билан электронлар ҳаракатчанлиги  $\mu_n$  нинг ўсиши билан бирдан пасайиши  $\Gamma$ - ва  $X$ - минимумлар ўртасидаги масофанинг  $< 0,1$ эВ гача қисқариши билан боғлиқ, бунда  $X$ -минимуми парчаланиш жараёнига сезиларли ҳисса қўшади. Маълумки,  $X$ -минимум анча катта миқдордаги  $m_n^*$  билан характерланади.  $x=0,75$  дан бошлаб  $\mu_n$  нинг қиймати  $X$ -минимум мутлоқ ҳисобланган GaP  $\mu_n$  ига яқинлашади.

$x=0,73$ ли  $Ga_xIn_{1-x}P$  қаттиқ эритмаларда электронларнинг юқори дрейф тезлиги ва ҳаракатчанлигига эришиш имкониятлари кўриб чиқилди. Ушбу материал  $x < 0,73$ да тўғри зонали ЯЎ бўлганлиги сабабли, ташувчиларнинг сочилиш механизми кутбли яримўтказгичдаги сочилиш механизмига ўхшаш бўлади. Маълумки, бундай ЯЎ учун панжаранинг оптик тебранишлари бўйича сочилиши устуворлик қилади. Бошқа тенг шароитларда ҳаракатчанлик асосан заряд ташувчиларнинг эффектив массаси  $m_n^*$  билан назорат қилинади.  $Ga_xIn_{1-x}P$  қаттиқ эритмалар учун ўтказувчанлик зонасидаги заряд ташувчиларнинг эффектив массаси қуйидагича топилиши мумкин.  $m^*$  миқдори  $Ga_xIn_{1-x}P$  учун InP ва GaP ларнинг  $m^*$  лари оралиғида ўзгаради. Мазкур миқдорларни  $\Gamma$ -минимум учун  $K=0$  да танлаш керак, чунки қаттиқ эритманинг асосий минимуми  $K=0$  да жойлашади ва  $\Gamma_{15}-\Gamma_1$  ўтиш билан белгиланади. Бу тўғри бўлмаган зонали GaP билан таққослаганда  $Ga_xIn_{1-x}P$  даги электронларнинг сезиларли даражада юқори ҳаракатчанлигини таъминлайди.  $Ga_xIn_{1-x}P$  даги электронлар ҳаракатчанлигининг ҳисобланган миқдорлари  $\mu_n = 2200 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$  ни ( $N_d = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ да киришма ионларидаги сочилишни ҳисобга олган ҳолда) ташкил қилади, бу эса электронлар ҳаракатчанлигининг тажрибада олинган қиймати билан мос келади ( $\mu_n = 1500 \div 2000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ ).

Шундай қилиб,  $Ga_xIn_{1-x}P$  қаттиқ эритмаларидаги электронлар ҳаракатчанлиги InP даги  $\mu_n$  дан сезиларли даражада фарқ қилмайди. Қаттиқ эритмада GaP нинг янада ортиши яримўтказгич ўтказувчанлик энг қуйи  $X$ -минимум электронлари билан аниқланадиган зона тузилишини ўзгартириши сабабли ўтказувчанликни сезиларли даражада ўзгартиради. Шу сабабли,  $x=0,73$

ли  $Ga_xIn_{1-x}P$  эпитаксиал қатламнинг юқори электр ўтказувчанлигини намоён қилувчи кенг зонали материал саналади.

Диссертациянинг «**GaP, GaAs, InP монокристаллари ва улар асосидаги қаттиқ эритмаларнинг электрофизик ва оптик хусусиятлари**» деб номланган учинчи бобида изотип GaP дан қилинган асосга эга аввалдан ўстирилган  $nGa_xIn_{1-x}P$  эпитаксиал қатламга рух диффузияси жараёнида олинган  $Ga_xIn_{1-x}P$  p-n тузилмалар тадқиқининг натижалари келтирилган. Дастлабки қаттиқ эритма  $N_d=5 \cdot 10^{16} \div 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  га тенг донорлар концентрациясигача теллур билан легирланган. Диффузия  $750 \div 850 \text{ K}$  ҳароратда оқувчан водород атмосферасида жойлашган вертикал конструкцияли графит кассета асосидаги квазиберк ҳажмли кварц реакторида ўтказилди.

P-n ўтишнинг жойлашиш чуқурлигининг диффузия вақтига боғлиқлиги экспериментал равишда олинган ( $d \sim t^{1/2}$ ) нинг кўрсатишича, диффузия жараёни Фикнинг иккинчи қонунига мос келади ва тугунлараро содир бўлади. Бунда диффузион қатлам қалинлигининг ҳароратга боғлиқлиги қуйидаги қонунга бўйсунди

$$d = A_0 t^{1/2} \exp\left(-\frac{A_1}{kT}\right), \quad (1)$$

бу ерда  $A_0$  - доимий катталиқ,  $A_1$  - боғлиқлик доимийси.  $d$  нинг  $t^{1/2}$  га нисбий боғлиқлиги чизиқли кўринишга эга. Ўрганилган қатламдаги кавакларнинг сирт концентрацияси p-n ўтиш чегарасидагига нисбатан  $1,0 \div 1,5$  тартибга юқоридир. Бу аралашмалар концентрациясининг градиенти тузилган квазиэлектрик майдони шаклланишидан далолат беради, унинг қиймати  $\nabla = 10^2 \div 10^3 \text{ В/см}$  га етади.

Тадқиқ этилган тузилмаларда барьер сифими  $C_6$  нинг кучланишга экспериментал боғлиқлиги қуйидаги ифода билан ёзилади

$$\left(\frac{S}{C_6}\right)^3 = \frac{12(U-U_0^c)}{q \cdot a \cdot \epsilon_0^2}, \quad (2)$$

бу ерда  $U_0^c$  - ажратувчи сифим кучланиши,  $a=dN/dx$ -аралашма концентрациясининг градиенти,  $S$ - p-n ўтиш юзаси. (2) боғлиқдан олинган  $U_0^c$  нинг қиймати ҳисобланган контакт потенциаллар фарқи қийматидан катта бўлади.  $pGa_xIn_{1-x}P$  даги ионлаштирилган акцепторларнинг тажрибавий топилган концентрацияси  $N_a$  қуйида келтирилган ифодага кўра олинган маълумотлар билан мос келади

$$U_k = 2kT \ln\left(\frac{ad}{2qn_i}\right). \quad (3)$$

Бу p-n ўтишлар физикавий чегаралар яқинидаги донор-акцептор қайта компенсацияси билан боғлиқ. Тадқиқ қилинган тузилмалардаги максимал майдоннинг тажрибавий микдорлари  $Ga_xIn_{1-x}P$  қатламлардаги киришмалар концентрацияси градиенти ички квазимайдон катталигидан бир тартибга кўпроққа ортиқ бўлади.

Ҳажмий заряд қатлами кенглиги p-n ўтишда тескари силжиш ортиши билан ўсади, бунда база қатламида заряд ташувчилар концентрациясининг бир хил ўзгаришида ҳажмий заряд соҳаси нисбатан кенг соҳали  $Ga_{0.72}In_{0.28}P$  дагига қараганда каттароқ бўлади.

$300K < T < 600K$  ҳарорат оралиғида ВАХ тўғри тармоғи иккита ташкил этувчидан иборат бўлади:

$$I = I_1 + I_2 = I_{01} \exp\left(\frac{qU}{\beta_1 kT}\right) + I_{02} \exp\left(\frac{qU}{\beta_2 kT}\right). \quad (4)$$

$Ga_{0.61}In_{0.39}P$  p-n ўтишлар учун биринчи ташкил этувчида  $1,9 \leq \beta_1 \leq 2,2$ , иккинчисида  $1,4 \leq \beta_2 \leq 1,6$ ;  $Ga_{0.72}In_{0.28}P$  учун эса мос равишда  $2,0 \leq \beta_1 \leq 2,3$  ва  $1,2 \leq \beta_2 \leq 1,4$ . ВАХ нинг биринчи ташкил этувчиси нисбатан кичик токларда ҳажмий заряд соҳасидаги рекомбинацияга хос бўлган шаклга эга. Экспоненциал олди кўпайтувчиси мос равишда қуйидагича бўлади:

$$I = \frac{kTn_1}{\tau_{\text{эфф}}E_M} = \frac{kT}{\tau_{\text{эфф}}} \exp\left(\frac{E_g}{kT}\right). \quad (5)$$

$I_{01}$  нинг ҳароратга боғлиқлигидан p-n тузилмалар фаол соҳасидаги тақиқланган зона кенглиги топилган, у тадқиқ қилинган диапазонда  $E_g \approx 1,9 \div 2,23$  эВ (300 К) оралиғида ўзгаради. Бунда заряд ташувчиларнинг самарали яшаш даври  $\tau_{\text{эфф}} \approx (3 \div 5) \cdot 10^{-8}$  с. Тадқиқ қилинган  $Ga_xIn_{1-x}P$  таркиби учун тақиқланган соҳа кенглигининг тажрибада топилган катталиги  $E_g \approx 2,15 \div 2,24$  эВ ни ташкил қилади.

ВАХ нинг иккинчи ташкил этувчисидagi боғлиқлик характери намуна ҳажмидаги рекомбинация токининг устувор ролини кўрсатади ва сиғим характеристикаларидан олинган натижалар билан етарли даражада мос келади. Тадқиқот қилинган тузилмаларнинг ВАХ тескари йўналиши боғлиқлиги ҳароратнинг кенг интервалида  $I \sim V^\gamma$  билан тавсифланади.  $T = 300$  К дан  $600$  К га ортганда  $\gamma$  мос равишда  $2,9$  дан  $0,08$  гача камаяди. Бу эса ҳажмий заряд соҳасидаги заряд ташувчиларнинг иссиқлик генерацияси устунлик қилишидан далолат беради.

Тескари токнинг катталиги маълум бўлган қонунга бўйсунди

$$I_T = \frac{qn_i W}{2\tau_{\text{эфф}}}, \quad (6)$$

ва токнинг зичлиги  $I_T = (1 \div 5) \cdot 10^{-9}$  А/см<sup>2</sup> оралиғидаги қийматларни қабул қилади.

Пробой кучланиши қуйидаги қонун бўйича ўзгаради

$$U_{\text{П}}(T_1) = U_{\text{П}}(T_2) + \beta U_{\text{П}}(T_2). \quad (7)$$

Тадқиқ қилинган тузилмаларда пробой кучланишининг ҳарорат коэффициенти  $\beta$  мусбат бўлади. Пробой механизми шу асосланганки, ҳажмий заряд соҳасидаги максимал майдонда p-n тескари ток ўтишини ҳосил қилувчи электронлар ва каваклар валент электронларни зарбли ионлаштириш учун етарли бўлган кинетик энергияга эга бўлади (яъни, электрон-электрон тўқнашувлар натижасида валент электронлар ўтказувчанлик зонасига ўтади).

Бунда ҳосил бўладиган иккиламчи заряд ташувчилар электр майдонида тезлаштирилади ва улар янги ташувчиларни зарбли ионлаштириш йўли билан ҳосил қилиши мумкин бўлади.  $Ga_xIn_{1-x}P$  қаттиқ эритмада  $GaP$  таркиби ортиб бориши билан  $p-n$  ўтишнинг ҳарорат хусусиятлари яримўтказгичнинг тақиқланган зона кенглиги ортиши сабабли уларнинг тескари тоқлари камайиши билан яхшиланади.

Диссертациянинг « $Ga_{0,7}In_{0,3}P/GaP$  гетеротузилмаларни ёруғлик оқимининг тўпланиш даражаси ва қаттиқ эритмалар таркибига боғлиқ ҳолда ўрганиш» деб номланган тўртинчи бобида фотоўзгартгич гетеротузилмаларини яратиш учун гетотузилмалар электрофизик хоссаларининг ёруғлик нурланиш жадаллига боғлиқлиги ва  $pAl_xGa_{1-x}P$  ( $0 \leq x \leq 0,8$ ) асосидаги база соҳа қатлами қалинлигини қаттиқ эритма таркибига боғлиқлиги келтирилган.

$Al_xGa_{1-x}P$  қаттиқ эритмаларнинг характеристик хусусиятлари куйидагилардан иборат:

- таркиб ўзгаришининг бутун оралиғида  $Al_xGa_{1-x}P$  қаттиқ эритманинг панжара параметрлари деярли ўзгармайди. Натижада қаттиқ эритма таркиби ўзгаришидаги нуқсонларнинг кўшимча генерацияси ва мазкур омил ҳисобидан асосий бўлмаган заряд ташувчилар диффузион силжиш узунлигининг эҳтимолий ўзгариши истисно қилинади;

- $x$  параметр  $0 \leq x \leq 1,0$  диапазонда ўзгарганида қаттиқ эритма соҳавий тузилиши яримўтказгичнинг тақиқланган соҳа кенглиги бироз ўзгариши билан ўзгармас бўлиб қолади ( $2,24 \leq E_g \leq 2,4$  эВ), бу турли таркибдаги қаттиқ эритмаларда оптик ютилиш механизмининг доимийлигини таъминлайди;

- нисбатан юпқа  $Al_xGa_{1-x}P$  қатламлар учун спектрнинг тадқиқ қилинадиган кенглигида фототашувчиларнинг яримўтказгичларнинг валент соҳасидан ўтказувчанлик соҳасининг  $\Gamma$ -минимумига бевосита оптик ўтиши ҳисобидан нурланиш ютилиши характерли бўлади, бунда энергетик тирқиш  $2,8 \leq E_0 \leq 3,6$  эВ диапазонда ўзгаради.

База қалинлиги  $d=0,2 \div 1$  мкм ни ташкил қилган, база соҳасига эга бўлган тадқиқ қилинган тузилмалар,  $n$ -типдаги галлий фосфид изотоп асосига, олдиндан ўстирилган эпитаксиал қатламлар паст ҳароратли суюқ фаза эпитаксия усулида олинган. База соҳасидаги каваклар концентрацияси  $N \approx 5 \cdot 10^{16} \div 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  ни,  $pAl_xGa_{1-x}P$  даги электронлар концентрацияси эса  $0,7 \div 1,0 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  ни ташкил қилади.

Қатламлар қалинлиги иккала турдаги ўтказувчанликка эга қаттиқ эритма анодланган бўлиниш чегараси орқали баҳоланган, асосий бўлмаган ташувчиларнинг диффузия узунлиги ва уларнинг ҳаракатчанлиги Холл усули ёрдамида аниқланган.

Олиб борилган тадқиқотлар шуни кўрсатдики, турли таркибли  $Al_xGa_{1-x}P$  база қатламларида  $p-n$  ўтишнинг тўплаш самарадорлиги спектрнинг максимумига яқин қийматларга эга бўлади. Бунда  $x$  ортиши билан спектрнинг максимуми фотонлар энергияси  $h\nu$  га деярли чизикли боғланган бўлади ва

$$h\nu = 2,7 + 0,9x, \quad (8)$$

га биноан қисқа тўлқинлар томонга силжийди. Бу шуни тасдиқлайдики,  $Al_xGa_{1-x}P$  нинг турли таркиби учун, база қатламининг оптимал қалинлигида р-п ўтиш қисқа туташув токи  $I_{к.т.}$  ўзгариши асосан р-п ўтиш фотосезгирлиги спектрал кенглигининг ўзгариши билан боғлиқ.

Генерация-рекомбинация жараёнларининг асосий қисми р-п ўтишнинг база соҳасида кечишини ҳисобга олиб ва ушбу жараённи миқдорий жиҳатдан баҳолаш учун турли таркибдаги қаттиқ эритмаларда электронларнинг диффузия силжиш узунлиги  $L_n$  нинг ўзгариши кўриб чиқилди. Қаттиқ эритма таркибига қараб  $L_n$  ўртача қийматининг боғлиқлигининг эгри чизиғи олинди, чунки  $L_n$  нинг қиймати р-п ўтишнинг рекомбинацион параметрлари билан қуйидагича боғланган

$$L_n = \left( \frac{kT}{q\mu_n\tau_n} \right)^{1/2}. \quad (9)$$

Айтиш мумкинки, тадқиқот этилаётган гетеротузилмалардаги рекомбинацион жараёнлар асосан базавий  $rAl_xGa_{1-x}P$  даги электронларнинг диффузион силжиши узунлиги билан боғланган. Мос равишда, унинг ўзгариши асосан қаттиқ эритма таркиби ўзгартирилгандаги ҳаракатчанлик ўзгариши ҳисобига юз беради. Ушбу боғлиқлик база қатлами оптимал қалинлиги ва қаттиқ эритмадаги  $AlP$  таркиби орасида коррекциянинг мавжудлигини кўрсатади. Ўрганилаётган тузилмалар параметрларининг шундай ўзаро боғлиқлигини ҳисобга олиб,  $L_0$  нинг аниқ қиймати учун база соҳаси самарали қалинлигининг  $Al_xGa_{1-x}P$  таркибига боғлиқлигини қуйидаги эмпирик ифода билан аппроксимациялаш мумкин

$$h_{эфф} = \frac{L_0}{(1+1,8x^2)}, \quad (10)$$

бу ерда  $L_0 - x=0$  бўлганида  $Al_xGa_{1-x}P$  қаттиқ эритмалар учун асосий бўлмаган ташувчиларнинг диффузион узунлиги. Ўтказилган тадқиқотлар шуни кўрсатдики, ушбу ифода базавий соҳанинг, қаттиқ эритманинг берилган таркибда фотоэлектрик ўзгартиришнинг энг самарали бўлишини таъминлайдиган, қалинлигини аниқлаш имконини беради.

Табиий-конвектив иссиқлик алмашинуви (пассив совутиш) режимида  $Ga_{0,7}In_{0,3}P/GaP$  гетеротузилмаларнинг фотоэлектрик ва иссиқлик хусусиятлари тадқиқ этилди.

Шунинг учун қуёш нури оқимининг концентрацияси даражаси  $K_c=1\div 100$  ораликда олинди. Тадқиқ этилган  $Ga_{0,7}In_{0,3}P/GaP$  гетеротузилмалар газ фазасидан рухнинг паст ҳароратли диффузияси билан биргаликда суюқ фазадан эпитаксиал ўстириш усулини қўллаш ёрдамида олинди. Танлаб олинган қаттиқ эритманинг таркибига тақиқланган соҳасининг кенглиги  $E_g \approx 2,2$  эВ га тенг яримўтказгичнинг соҳавий тузилмаси мос келади. Р- ва п-турдаги ўтказувчанликка эга  $Ga_{0,7}In_{0,3}P$  гетеротузилмада  $d \approx 2\div 3$  мкм умумий қалинликка эга,  $nGaP$  асоснинг қалинлиги эса  $\sim 150$  мкм дан ошмайди. Кейинчалик асосий

ютилиш кенглиги чегарасидан ташқаридаги узун тўлқин соҳасидаги гетерофотоўзгартгичларнинг (ГФЎ) оптик шаффофлигини янада орттириш мақсадида металл контактлар тўрсимон шаклда олинди. Улар  $p\text{Ga}_{0,7}\text{In}_{0,3}\text{P}$  нинг юза томонида ва  $n\text{GaP}$  нинг орқа томонида олинган. Металли контакт тўрлар полосалари орасидаги масофа шундай танланганки, қуёш оқимининг кўрилаётган интенсивлик диапазони учун кетма-кет қаршилиқнинг токни оқиш қаршилигига таъсири минимал бўлиши керак. Бунда омик контактлар юзаси ГФЎ умумий сезувчан юзасининг 10% дан ошмайди ва омик контакт билан бир хил бўлган тўрсимон шаклдаги мис тутқичга уланган. ГФЎ ёруғлик оқимини  $\lambda=0,3\div 0,6\text{мкм}$  спектр оралиғида ўзгартириб беради. Тўғри қуёш ёритилганлигида салт юриш кучланиши  $1,38\div 1,45\text{ В}$  бўлганда ГФЎ  $\eta = 10\div 12\%$  фойдали иш коэффициентига эга бўлади (АМ1,5). Қуёш оқимини тўплаш Френель линзалари ёрдамида амалга оширилди. Мужассамлашган қуёш нурланиши таъсирида ишловчи ГФЎ (бирлик юзадаги) солиштирма фотоэлектрик қуввати

$$P_y = E_c K_c \eta \quad (11)$$

орқали аниқланади, бу ерда  $E_c$  - ГФЎ юзасига нормал тушаётган қуёш нурланиши оқимининг интеграл зичлиги,  $K_c$  - қуёш нурланиши концентрация коэффициентининг ўртача қиймати.

(11) ифодага кирувчи  $\eta$  гетеротузилма мувозанатини ишчи ҳарорати  $T$  га ва  $K_c$  га боғлиқ бўлади.  $K_c < 50$  да  $K_c$  нинг ўсиши билан  $\eta$  нинг сезирали пасайиши кузатилмаётгани, табиий-конвектив иссиқлик алмашуви шароитида нурланиш концентрациясининг ўша диапазонида ҳарорат  $T$  нинг  $\eta$  га таъсири сезиларли даражада намоён бўлаётганини  $\eta$  ва  $T$  нинг  $K_c$  га боғлиқлиги чизикли функция билан аппроксимацияланади.

$$\eta = \eta_0 [1 - \alpha(T - T_0)] , \quad (12)$$

бу ерда  $\eta_0$  ва  $T_0$  - ёруғлик оқимининг берилган концентрацияси учун  $p$ - $n$  ўтишнинг фойдали иш коэффициенти ва мувозанатли ишчи ҳарорати,  $\alpha = d\eta/dT\eta_0$  - қиймати гетеротузилманинги ишчи ҳароратига боғлиқ бўлган манфий ҳарорат градиенти.

Агар гетеротузилмалардан иссиқликнинг чиқиб кетиши фақат табиий-конвектив иссиқлик алмашинуви ҳисобига бўлаётган, ҳарорат ўзгариши, асосан, тушаётган қуёш нурланиши таъсирига боғлиқ бўлса, ГФЎ нинг мувозанатли ишчи ҳароратини қуйидагича аниқлаш мумкин

$$T = (\alpha_c - \eta)[(\epsilon_1 - \epsilon_2)\sigma]^{0,25} , \quad (13)$$

бу ерда  $\alpha_c$  - олд юза томонидан қуёш нурланишининг интеграл ютилиш коэффициенти,  $\epsilon_1, \epsilon_2$  - ГФЎ нинг мос ҳолда олд ва орқа юзалари томонидан хусусий иссиқлик нурланиши коэффициентларининг интеграл қийматлари,  $\sigma$  - Стефан-Больцман доимийси.

Келтирилган боғлиқликлар  $K_c$  нинг ГФЎларда ишлаб чиқиладиган фотоэлектрик қувват оптимал қийматига мос келадиган катталигини аниқлаш

имкони беради. Реал шароитларда табиий - конвектив иссиқлик алмашувида ҳарорат  $T$  нинг қиймати  $K_c$  га боғлиқ равишда ортиб боради. ГФЎ ҳароратининг ортиши яримўтказгич ман этилган зонаси  $E_g$  нинг камайиши билан боғлиқ равишда кечади, бу эса фотосезгирлик спектрининг узун тўлқинлар томонга бирор бир кенгайиши ҳисобига фототокнинг ортишига олиб келади. Тажрибалар шуни кўрсатдики, бизнинг ҳолатда фототокнинг ортиши қуёш нури оқимининг  $K_c \approx 50$  ҳолатигача содир бўлади.  $K_c$  янада катта қийматида фототокнинг ортиши сезиларли даражада сустрлашади. Бу шу билан изоҳланадики, ГФЎ тўйиниш тоқининг ҳароратга боғлиқлиги сезиларли даражада бўлади, натижада салт юриш кучланиши  $U_{xx}$  камайди ва фойдали иш кэффиценти  $\eta$  қийматининг тушишига олиб келади.

Олинган тажриба натижалари асосида аниқландики,  $U_{xx}$  нинг ҳарорат коэффиценти ( $K_c=1$  да)  $dU_{xx}/U_{xx}dT \approx -1,4 \cdot 10^{-3}/K$  га тенг ва ( $K_c=100$ ) да  $dU_{xx}/U_{xx}dT \approx -1,1 \cdot 10^{-3}/K$  гача камайди. ФИК нинг ҳарорат коэффиценти  $\alpha \approx -1,6 \cdot 10^{-3}/K$  ( $K_c=1$ ) дан  $\alpha \approx -1,2 \cdot 10^{-3}/K$  ( $K_c=100$ ) гача ўзгаради.

Келтирилган натижалар назарий тасавурларга қониқарли равишда мос келади, яъни  $U_{xx}$  ва ВАХ ининг тўлиш коэффиценти ортиши билан ГФЎ параметрларининг ҳарорат коэффицентлари камайди. Бундан ташқари, аниқландики, ГФЎ ҳароратининг  $K_c$  ортиши билан нисбий ўсиши анъанавий ГФЎларга қараганда (AlGaAs/GaAs асосидаги ГФЎ га нисбатан 3 марта) секинроқ бўлади. Бу шу билан изоҳланадики, кенг зонали, тўғри бўлмаган зона тузилишли GaP асосда узун тўлқинли фотонларнинг фаол ютилиши сустрлашади. Бундан ташқари, тадқиқ этилган ГФЎлар икки томонлама тўрсимон контактлар ҳисобига асосий ютиш полосаси чегарасидан ташқаридаги узун тўлқинли фотонлар учун «шаффоф» конструкцияга эга, натижада ГФЎлар ҳароратининг нисбий ўсиши қўшимча равишда сусайишига олиб келади. ГФЎ иссиқлик режимининг яхшиланишига GaP нинг нисбатан юқори иссиқлик ўтказувчанлиги ( $0,77 \text{ Вт/см} \cdot \text{К}$ ) сабаб бўлади, бу эса GaAs дан 1,6 марта юқори, ҳамда нисбатан кичик фотоэлектрик қувват мавжуд бўлади.

Кейин уч поғонали қуёш элементи (ПКЭ) нинг тузилмаси таклиф этилган. ПКЭ иккита ZnSe асосга олинган p-n  $Al_{0,43}In_{0,57}P$  нинг кенг зонали элементга, ҳамда поғонали  $InP/Ga_{0,47}In_{0,53}As/InP$  тузилмадан ташкил топган. Тор зонали поғона битта ажратувчи барьерли элемент асосида қилиниб, икки томонлама тўрсимон омик контактга эга ва ўзаро кетма-кет уланган. Тузилманин кичик зонали қисмида 3 та  $InP$  ва 9 та  $GaInAs$  элементлари бир-бири билан улагичлар ёрдамида уланган. Ички оптик йўқотишларни камайтириш учун, кенг ва тор зонали элементлар уланганидан кейин, улар орасидаги оралиқ фазо шаффоф модда билан тўлдирилган. Тор зонали поғоналарнинг юзалари бир-бирига тенг бўлиб, кенг зонали  $Al_{0,43}Ga_{0,57}P$  элементларнинг 1/3 қисмига тенг юзага эга, уларнинг умумий юзаси кетма-кет улангандан кейин кенг зонали элемент юзасидан ортиқ бўлмайди.

Поғонали қуёш элементига қуёш нури икки томондан тушади, квантлар поғонанин кенг ва тор зонали элементларида ютилади, p-n ўтишлар билан

бўлинган заряд ташувчилар генерацияланади, натижада ҳар бир элементда фототок юзага келади. Кенг зонали  $Al_{0,43}Ga_{0,57}P$  элементлар спектрнинг бинафша ва ультрабинафша оралиғида ( $h\nu \geq 2,31$  эВ) ёруғликни ютади ва асосий ютилиш полосасининг чегарасидан ташқаридаги узун тўлқинли фотонларга шаффоф бўлади. Шунинг учун ПҚЭ нинг икки томонидан кенг ва тор зонали элементлар орқали тушаётган нурланишнинг бир қисмига тегишли фотонлар кириб боради ва тор зонали поғонанинг икки томонидан ютилади, номувозанатдаги заряд ташувчиларни генерациялайди. ПҚЭ нинг тор зонали қисми ҳам поғонали тузилишга эга эканлигидан унинг  $InP$  элементларида квантлар маълум спектрал диапазонида ютилади ва  $InP$  асосий ютилиш полосадан ташқаридаги узун тўлқинли фотонларга шаффоф бўлади. Шунинг учун тушаётган нурланишни  $h\nu < 1,35$  эВ ли қисми ПҚЭ нинг икки томонидан  $InP$  элементлар орқали  $GaInAs$  элементининг икки томонидан янада торроқ зонали  $Ga_{0,47}In_{0,53}As$  га кириб боради, бу эса номувозанатли заряд ташувчиларнинг икки томонлама генерацияланишига сабаб бўлади.

Шундай қилиб,  $Ga_{0,47}In_{0,53}As$  элементлар нурланишни икки томондан ўзгартиради. Бу  $Ga_{0,47}In_{0,53}As$  элементи генерацияланадиган токнинг қийматини ортишига ва унинг қийматини ҳар бир  $InP$  элементининг токи билан тенглашишига имкон беради.  $Al_{0,43}In_{0,57}P$ ,  $InP$  ва  $Ga_{0,47}In_{0,53}As$  элементларнинг токлари тенг бўлган ҳолатда уларни кетма-кет улаш, поғонанинг чиқиш кучланиши ва қувватини орттириш мумкин бўлади. ПҚЭ нинг токи кетма-кет уланганда уларни биттасининг токи орқали белгиланади, чиқиш кучланиши эса, поғонадаги барча таркибий элементлар кучланишларининг йиғиндисига тенг бўлади.

Кўрсатилган таркибдаги  $Al_{0,43}In_{0,57}P$  қаттиқ эритманинг ўзига хос томони шундаки, у  $h\nu \geq 2,31$  эВ соҳада фотонлар юқори коэффициентли ютилиш чегараси яратилишини таъминлайди. Натижада  $2,31 < h\nu < 3,0$  эВ спектрал ораликда оптик йўқотишлар кескин камаяди.  $Al_{0,43}In_{0,57}P$  p-n ўтишнинг ўзига хос томони шундаки, АМО да ҳар бир кенг зонали элементда салт юриш кучланиши  $U_{xx} \approx 1,6$  В бўлганида  $10$  мА/см<sup>2</sup> га тенг қисқа туташув токига эга бўлиш имкониятини беради.  $InP$  элементнинг  $1,35 \leq h\nu \leq 2,31$  эВ спектрал оралиғида бир томонлама ёритилган шароитда қисқа туташув токи  $I_{кт} = 30$  мА/см<sup>2</sup> га тенг бўлади.  $InP$  элементи токининг бундай қиймати  $Al_{0,43}In_{0,57}P$  кенг зонали элементниқидан 3 марта катта, унинг остига қисқа туташув токлари деярли бир хил қийматда бўлган 3 та  $InP$  элементни жойлаштириш мумкин. ПҚЭ нинг икки томонида иккита  $Al_{0,43}In_{0,57}P$  элемент бўлганлиги учун  $InP$  элементлардан 6 та олиш керак, улардан ҳар бирининг юзаси кенг зонали элемент юзасининг 1/3 қисмига тенг бўлиши, ҳар бир  $InP$  элементининг салт юриш кучланиши  $U_{xx} \approx 0,9$  В, қисқа туташув токи  $\sim 10$  мА/см<sup>2</sup> га тенг бўлиши керак.

$Ga_{0,47}In_{0,53}As$  элементнинг қисқа туташув токи  $0,73 < h\nu < 1,35$  эВ спектрал ораликда бир томонлама ёритиш шароитида  $\sim 15$  мА/см<sup>2</sup> ни ташкил этади.  $InP$  асосга эга нисбатан кичик тақиқланган зонали p-n ўтишлар қуёш нурларини

икки томонлама ўзгартириб бера олиши мумкинлиги сабабли, икки томонлама ёритилиш шароитида бу кўрсаткич  $30 \text{ mA/cm}^2$  га етади.  $\text{Ga}_{0,47}\text{In}_{0,53}\text{As}$  элементлар юзалари  $\text{InP}$  элемент юзасининг  $1/3$  қисмига тенг бўлгани учун ҳар бир  $\text{Ga}_{0,47}\text{In}_{0,53}\text{As}$  элементда генерацияланадиган ток зичлиги икки томонлама ёритиш шароитида салт юриш кучланиши  $U_{xx} \approx 0,5\text{В}$  да  $10 \text{ mA/cm}^2$  га тенг бўлади. Натижада 2 та  $\text{Al}_{0,43}\text{In}_{0,57}\text{P}$  элементнинг берилган юзасида улар орасига поғона барча таркибий элементларининг қисқа туташув токи  $I_{\text{КТ}} = 10 \text{ mA/cm}^2$  бўлган 3 та  $\text{InP}/\text{Ga}_{0,47}\text{In}_{0,53}\text{P}/\text{InP}$  поғона тузилмасини жойлаштириш мумкин.

Шундай қилиб, поғонанинг барча таркибий элементлар кетма-кет уланганида поғонанинг ишчи токи улардан бирининг токи билан аниқланади ва  $\sim 10 \text{ mA/cm}^2$  яқин бўлади, унинг чиқиш кучланиши эса, барча таркибий элементлар кучланишлари йиғиндисига тенг бўлади ва  $13,0 \div 14,0 \text{ В}$  қийматга етади. Натижада поғонали тизимдаги бирлик юзадаги фотоэлектрик қувват ва чиқиш кучланиши икки томонлама ёритиш шароитида мавжуд тизимларга нисбатан  $\sim 15\%$  га ортади.

Таклиф этилган ПҚЭ қуёш спектрининг нисбатан кенг оралиғида нурланишни ўзгартириб беради. Бунда поғона таркибий элементлари параметрларининг юқори ҳарорат барқарорлиги (турғунлиги) таъминланади, иссиқлик йўқотишлари эса, ПҚЭ тор зонали қисми ҳар бир элементига тушадиган иссиқлик юкласининг камайиши ҳисобига минимумгача камаяди, шунинг учун ушбу ПҚЭ, маълум бўлганларидан фарқли равишда мужассамлашган қуёш нурланишининг ( $100$  мартагача) диапазонида махсус совутиш тизимсиз пассив иссиқлик чиқиш режимида самарали ўзгартириб бериши мумкин.

## ХУЛОСА

Галлий фосфид асосда ишлаб чиқилган индий-галлий-фосфид асосидаги поғонали тузилмаларнинг фотоэлектрик хусусиятларига мужассамлашган қуёш нурланишининг таъсири механизмларини ўрганиш асосида қуйидаги хулосалар қилинган:

1. Поғонали қуёш элементларни ишлаб чиқиш учун мўлжалланган, юпқа ( $d \leq 2 \text{ мкм}$ ) гетероэпитаксиал  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}/\text{GaP}$  ( $0,6 \leq x \leq 1,0$ ) тузилмаларни суюқ фазадан ишчи қатлам ва асос ўртасига гетерочегарадан панжара параметлари текис ортиб борувчи оралиқ қатламни киритиш йўли билан олиш мумкинлиги кўрсатилган.

2. Таркибида  $27\%$  дан кам  $\text{In}$  бўлган  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$  қаттиқ эритмасида заряд ташувчиларнинг ҳаракатчанлиги сезилмас даражада ўзгариши ва тўғри зонали  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$  ҳаракатчанлигига яқин бўлиши, таркибида  $27\%$  дан кўп  $\text{In}$  бўлганда эса ҳаракатчанлик ўтказувчанликнинг минимум зоналари абсолют бўлган, тўғри бўлмаган зонали  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$  хусусиятлари билан аниқланиши белгиланди.

3.  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$  нинг ютилиш спектрлари тўғри зонали таркиблар учун  $\alpha = (h\nu - E_g)^n$   $n=0,5$  функцияси билан тавсифланиши аниқланди, бу ерда  $\alpha$  нинг қиймати  $10 \text{ см}^{-1}$  ва ундан юқоригача ортиши мумкин. Бунда тўғри бўлмаган

зонали таркибга эга қатламларда ютилишнинг ўтмас бурчаги тўғри оптик ўтишларнинг чегаравий энергиясига тенг бўлган энергиягача кучли ютилиш соҳасигача силжийди, бу ерда узун тўлқинли соҳасида ютилиш коэффициенти  $\alpha=(h\nu-E_g)^{2/3}$  каби аниқланади.

4. Икки томонлама контакт тўрига эга  $Ga_xIn_{1-x}P/GaP$  гетероўтувчан Фўларнинг табиий-конвектив иссиқлик алмашуви режимида ва қуёш нурланиши оқимининг 100 карра қуёш нури режимида самарали ишлаши мумкинлиги аниқланди.

5. Қисқа туташув токи  $8\div 10$  мА/см<sup>2</sup> га, юқори чиқиш кучланиши  $13\div 14$ В га тенг бўлган янги уч поғонали икки томонлама сезгир фотоўзгартгичлар биринчи марта таклиф этилди.

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

---

**ТАШКЕНТСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ ИМЕНИ МУХАММАДА АЛ-ХОРАЗМИ**

**ЖУМАНИЯЗОВ ИБРОХИМ ОТАХОНОВИЧ**

**ВОЗДЕЙСТВИЕ КОНЦЕНТРИРОВАННОГО СВЕТА НА  
ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ  $Ga_xIn_{1-x}P/GaP$  ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ  
И КАСКАДНЫЕ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НА ИХ ОСНОВЕ**

**01.04.10 – Физика полупроводников**

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

**Ташкент – 2019**

**Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № В2017.3.PhD/FM105.**

Диссертация выполнена в Ташкентском университете информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразми.

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

**Научный руководитель:** **Абдукадыров Мухитдин Абдурашитович**  
доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** **Каримов Абдулазиз Вахитович**  
доктор физико-математических наук, профессор

**Илиев Халмурат Миджитович**  
доктор физико-математических наук, профессор

**Ведущая организация:** **Национальный университет Узбекистана**

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

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

Автореферат диссертации разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.  
(Реестр протокола рассылки № \_\_\_ от «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.)

**Н.Р. Авезова**  
председатель Научного совета по  
присуждению ученых степеней, д.т.н.

**А.Г. Комилов**  
ученый секретарь Научного совета по  
присуждению ученых степеней, к.т.н.

**А.В. Каримов**  
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 мире на сегодня в бурно развивающейся области полупроводникового фотоэлектрического преобразования одним из перспективных направлений является изучение механизмов преобразования концентрированного солнечного излучения на электрическую энергию в структурах с тонким активным слоем и каскадной структурой. В этом аспекте разработка технологии получения гетерослоев индий-галлий-фосфида на подложках фосфида галлия для фотопреобразовательных структур и изучение физических процессов протекающих в них при электромагнитном и фотонном возбуждении, выявление их особенностей в каскадном исполнении является одной из основных проблем фотоэлектрического преобразования солнечной энергии.

На сегодняшний день в мире большое внимание уделяется изучению особенностей преобразования солнечного излучения в каскадных фотопреобразовательных структурах, в частности, поведение тока короткого замыкания и напряжения холостого хода при воздействии концентрированного солнечного потока. В этом аспекте проведение целевых исследований, а именно, реализация ниже приведенных направлений считаются одними из важнейших задач: изучение процесса кристаллизации тонких эпитаксиальных слоев  $Ga_xIn_{1-x}P$  при жидкофазной эпитаксии; выявление возможности формирования  $pGa_xIn_{1-x}P$   $p$ - $n$  переходов на основе низкотемпературной диффузии цинка из газовой фазы; изучение влияния подложечного кристалла на механические напряжения в фотопреобразовательных структурах; выявление влияния состава твердого раствора  $Ga_xIn_{1-x}P$  на электрические и оптические свойства фотопреобразовательных структур на их основе; изучение влияния степени концентрации светового потока на фотоэлектрические и тепловые свойства фотопреобразователей с двусторонней контактной сеткой; поиск путей повышения эффективности каскадных фотопреобразователей солнечной энергии.

В республике значительное внимание уделяется работам, посвященные процессам фотоэлектрического преобразования, в частности, определены предельные возможности функционирования кремниевых солнечных модулей на основе монокристаллического кремния, установлены оптимальные рабочие режимы и интервалы рабочих областей применительно жарких условий. В соответствии со стратегией действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017-2021 годы указаны задачи стимулирования научно-исследовательской и инновационной деятельности, широкое внедрение в производство энергосберегающих технологий, расширение использования возобновляемых источников энергии. В этом аспекте одной из важных задач является разработка эффективных фотопреобразователей солнечной энергии на гетеропереходах.

Данное диссертационное исследование в определённой степени соответствует задачам, обозначенным в постановлениях Президента Республики Узбекистан ПП-4348 «О дополнительных мерах по созданию благоприятных условий для дальнейшего развития электротехнической промышленности и повышению инвестиционного и экспортного потенциала отрасли» от 30 мая 2019 года, ПП-3855 «О дополнительных мерах по повышению эффективности коммерциализации результатов научной и научно-технической деятельности» от 14 июля 2018 года и ПП-2789 «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организаций, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности» от 17 февраля 2017 года, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

**Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики.** Диссертационная работа выполнена в рамках приоритетных направлений развития науки и технологий Республики Узбекистан - II. «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение».

**Степень изученности проблемы.** Учеными из Японии<sup>1</sup>, разработаны технологии получения фотоэлектрических преобразователей с изотипными и анизотипными переходами, которые позволили повысить КПД гетеропереходного солнечного элемента до 25,5%.

Российскими учеными во главе Ж.И. Алферова<sup>2</sup>, с сотрудниками разработаны каскадные фотопреобразователи на основе соединений арсенида галлия, обеспечивающие наибольшую эффективность преобразования солнечной энергии при использовании метода концентрирования солнечного излучения, который обеспечивает снижение площади пропорционально степени концентрирования солнечного излучения.

На сегодня учеными из Узбекистана под руководством академика Р.А. Муминова<sup>3</sup> ведутся исследования повышения эффективности солнечных элементов путем внесения наноструктурных компонентов. Также профессором А.М.Касимахуновой<sup>4</sup> проведены исследования влияния внутреннего сопротивления на параметры гетеропереходных кремниевых фотопреобразователей, выяснено влияние последовательного сопротивления на эффективность преобразования солнечного элемента с гетеропереходом и описаны технологические последовательности их изготовления.

---

<sup>1</sup> K.Masulko, M.Shigematsu, T.Hashiguchi et al. IEEE J. Photovolt., 4(6), 1433 (2014).

<sup>2</sup> Ж.И. Алфёров, В.М. Андреев, В.Д. Румянцев. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики // Физика и техника полупроводников, 2004, том 38, вып. 8, С. 937-948.

<sup>3</sup> Джалалов Т.А., Имамов Э.З., Муминов Р.А. Электрофизические свойства новой контактной структуры «нанообъект-полупроводник» // Журнал технической физики.-Россия,2015. -Т. 85, № 5. -С.110-115.

<sup>4</sup> Олимов Ш.А. Ноу-фу Чен, Касимахунова А.М. Технология получения гетеропереходных кремниевых фотопреобразователей и исследование влияния внутреннего сопротивления // XIX международная научно-практическая конференция, МЦНС «Наука и просвещение», 2019 г., С.37-42, www.naukaip.ru

Однако остаются не в полной мере изученными свойства каскадных фотопреобразователей в условиях освещения концентрированными потоками светового излучения и проблемы снижения внутренних омических потерь.

**Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертационная работа.** Диссертационная работа выполнялась в рамках фундаментального научного проекта БФ-Ф2-005 «Исследование физических основ создания двусторонних гетероструктур широкозонных соединений  $A^{III}B^V$  с предельно ограниченным поглощающим слоем и свойств каскадных фотопреобразователей на их основе» (2007-2011 гг.) и Международного научного проекта МК-03/2010 «Получение и исследование фосфид-галлиевых полупроводниковых гетероструктур с внутризонным излучением» (2010-2012 гг.).

**Целью исследования** является установление механизмов воздействия концентрированного солнечного излучения на фотоэлектрические характеристики каскадной структуры на основе разработанных гетероструктур индий-галлий-фосфида на подложках фосфида галлия.

**Задачами исследования являются:**

изучение процесса кристаллизации тонких эпитаксиальных слоев  $Ga_xIn_{1-x}P$  при жидкофазной эпитаксии;

выявление возможности формирования  $pGa_xIn_{1-x}P$  p-n-переходов на основе низкотемпературной диффузии цинка из газовой фазы;

изучение влияния подложечного кристалла на механические напряжения в фотопреобразовательных структурах;

выявление влияния состава твердого раствора  $Ga_xIn_{1-x}P$  на электрические и оптические свойства фотопреобразовательных структур на их основе;

изучение влияния степени концентрации светового потока на фотоэлектрические и тепловые свойства фотопреобразователей с двусторонней контактной сеткой;

поиск путей повышения эффективности фотопреобразователей солнечной энергии.

**Объектом исследования** являются гетероструктуры на основе  $Ga_xIn_{1-x}P/GaP$ , а также одно и многопереходные фотопреобразователи солнечной энергии.

**Предметом исследования** являются особенности технологии получения  $Ga_xIn_{1-x}P/GaP$  гетероструктур и механизмы воздействия концентрированного света на их фотоэлектрические характеристики.

**Методы исследований.** В процессе выполнения диссертационной работы были использованы методы низкотемпературной жидкофазной эпитаксии, металлографические исследования, вольт-фарадные и вольт-амперные характеристики, освещение концентрированным солнечным потоком.

**Научная новизна исследования** заключается в следующем:

показано, что структурно-совершенные тонкие ( $d \leq 2 \mu\text{м}$ ) гетероэпитаксиальные  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}/\text{GaP}$  ( $0,6 \leq x \leq 1,0$ ) слои, перспективные для создания каскадных фотопреобразователей, можно получить из жидкой фазы путем введения между рабочим слоем и подложкой промежуточного слоя с плавно увеличивающимся параметром решетки от гетерограницы;

установлена взаимосвязь между толщиной базового слоя и составом твердого раствора  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$  обеспечивающая эффективное преобразование светового излучения;

впервые показано, что фотопреобразователи на основе широкозонных полупроводников  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}/\text{GaP}$  могут эффективно функционировать как в режиме естественного воздушно-конвективного теплообмена, так и при 100 кратной концентрации солнечного потока;

впервые предложена конструкция двусторонне-чувствительного трех каскадного ФП с повышенным выходным напряжением и фотоэлектрической мощностью в системе  $\text{AlInP}/\text{InP}/\text{GaInAs}$ .

**Практические результаты исследования:**

разработана методика получения  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}/\text{GaP}$  гетероструктур с различным составом твердого раствора;

получен новый каскадный солнечный элемент, который позволит повысить выходное напряжение и ток короткого замыкания, а также обеспечить работоспособность ФП при стократном солнечном излучении без охлаждающих устройств в отличие от известных аналогов;

**Достоверность полученных результатов исследования** подтверждается применением современных и апробированных методов исследования, соответствием экспериментальных данных с их теоретическими значениями и необходимой статистикой экспериментов.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.**

Научная значимость результатов исследования заключается в том, что они способствуют расширению физических представлений о процессах протекающих в гетероструктурных каскадных фотопреобразователях на основе широкозонных полупроводников.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что разработанные технологии получения многослойных гетероструктур и конструкции каскадных фотопреобразователей могут быть использованы при создании солнечных энергетических систем с улучшенной удельной фотоэлектрической мощностью.

**Внедрение результатов исследования.** На основе изучения механизмов воздействия концентрированного солнечного излучения на фотоэлектрические характеристики каскадной структуры на основе разработанных гетероструктур индий-галлий-фосфида на подложках фосфида галлия:

по разработке конструкции двусторонне-чувствительного трех каскадного ФП получен патент на изобретение Агентства Интеллектуальной собственности

Республики Узбекистан на «Каскадный солнечный элемент» (№ IAP 04695, 15.04.2013г.). Разработанный каскадный солнечный элемент позволил получить высокое выходное напряжение ( $13\div 14\text{В}$  и ток короткого замыкания  $8\div 10\text{ мА/см}^2$ ) и работоспособность при сто кратном солнечном излучении без охлаждающих устройств в отличие от известных аналогов;

В режиме естественного воздушно-конвективного теплообмена, так и при 100 кратной концентрации солнечного потока фотопреобразователей на основе  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$  использованы при выполнении фундаментального научного проекта Ф2-ОТ-О-15494 «Улучшение эффективности излучателей, фотоэлементов и других типов оптоэлектронных приборов на основе исследования экситонов, поляронов, биполяронов и явлений переноса в гетеро- и наноструктурах с квантовыми точками» 2012-2016гг. (Справка Агенства науки и технологий Республики Узбекистан за ФТА-02-11/1320 от 18 декабря 2017 г.). Использование научных результатов позволило определить интервал рабочих температур гетеро- и наноструктур с квантовыми точками без охлаждения.

**Апробация результатов исследования.** Основные научные результаты диссертационной работы были доложены и обсуждены на 7 международных и 7 республиканских научных и научно-практических конференциях.

**Публикации результатов исследования.** Основные результаты диссертации опубликованы в 26 научных трудах, из них 11 статей в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертаций, получен 1 патент РУз на изобретение.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Общий объём диссертации 111 страниц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обоснованы актуальность и востребованность проведенных исследований, определена связь исследований с основными приоритетными направлениями развития науки и технологий в республике. Изложена научная новизна исследования и практические результаты, раскрыта практическая значимость, приведены краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, а также об объеме и структуре диссертации.

В первой главе диссертации под названием **«Состояние исследований фотоэлектрических характеристик многослойных фотопреобразователей солнечной энергии на основе соединений арсенида галлия и их недостатки»** изложены данные литературных источников по теме диссертации. Приведены основные свойства одно и многопереходных фотопреобразователей (ФП) с каскадной структурой, в том числе гетероструктур на основе соединений  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ . На основе анализа состояний и тенденции развития ФП были сформулированы основные задачи диссертационной работы.

Во второй главе диссертации под названием «Исследование процесса получения гетероструктур  $Ga_xIn_{1-x}P/GaP$  жидкофазной эпитаксией и изучение их физических свойств» описаны особенности получения твердых растворов  $Ga_xIn_{1-x}P$  на подложках  $GaP$  путем наращивания эпитаксиальных слоев в установке с горизонтальным реактором из ограниченного объема раствора-расплава (толщина зазора  $300 \div 500$  мкм) в потоке очищенного водорода. Варьирование концентрацией носителей заряда в эпитаксиальных слоях осуществлялось добавлением в расплав  $Te$  или  $Zn$  при получении слоев соответственно n- и p-типа проводимости. В качестве металла-растворителя использовался индий для получения твердых растворов  $Ga_xIn_{1-x}P$ .

Получены зависимости коэффициента распределения  $Ga$  от его содержания в жидкой фазе. Так как коэффициент распределения  $Ga$  зависит от его содержания в жидкой фазе, данная особенность системы  $GaP-InP$  позволяет получить достаточно однородные по составу эпитаксиальные слои при  $x=0,75$ . Заметное увеличение коэффициента распределения  $Ga$  происходит при  $x < 0,75$ . Результаты исследований процесса роста  $Ga_xIn_{1-x}P$  из жидкой фазы показывают трудности получения эпитаксиальных слоев переменного состава с высоким содержанием  $GaP$  на гетерогранице. Структурное совершенство выращенных эпитаксиальных слоев изучалось металлографическим методом. Выявлено, что при росте  $Ga_xIn_{1-x}P$  с  $0,8 < x < 0,9$  плотность ямок травления колеблется в пределах  $10^4 \leq N_d \leq 10^5 \text{ см}^{-2}$ . Наблюдаемые достаточно низкие плотности ямок травления объясняются близостью параметров решетки  $Ga_xIn_{1-x}P$  и  $GaP$  ( $\Delta a/a$  равно  $< 1\%$ ).

В эпитаксиальных слоях  $Ga_xIn_{1-x}P$  с  $x < 0,7$  плотность ямок травления достигала  $10^5 \text{ см}^{-2}$ , что обусловлено возрастанием степени несоответствия параметров решетки контактирующих материалов до  $2\%$  и более. Следовательно, из-за определяющего действия несоответствия параметров решетки гетеропар получение кристаллически совершенных однослойных структур  $Ga_xIn_{1-x}P/GaP$  с  $x < 0,7$  становится затруднительным.

В этой связи была исследована возможность уменьшения плотности дислокаций путем введения двух промежуточных слоев между подложкой и эпитаксиальным слоем  $Ga_xIn_{1-x}P$  с  $x < 0,7$ . Первый буферный слой, граничащий с  $GaP$ , выполнен на основе  $Ga_xIn_{1-x}P/GaP$  с  $x=0,9$ , а второй буферный слой имел величину  $x$ , равную  $x=0,8$ . При этом несоответствие параметров решетки между каждыми эпитаксиальными слоями составляло,  $\Delta a/a=0,75$ . Плотность дислокации в такой трехслойной структуре с верхним слоем  $Ga_xIn_{1-x}P/GaP$  с  $x \leq 0,7$  уменьшалась до  $N_d = 10^4 \div 10^5 \text{ см}^{-2}$  и менее. Дальнейшее варьирование величины « $x$ » в верхнем слое (до  $x=0,6$ ) осуществлялось путем формирования твердого раствора заданной толщины, так как уменьшение  $E_g$  ПП в слое с  $x \leq 0,7$  происходило с градиентом  $100 \div 150$  эВ/см благодаря увеличению коэффициента распределения галлия в твердом растворе.

Таким образом, введением «залечивающих» слоев с  $x=0,8$  и  $x=0,9$  структурное совершенство рабочих слоев с  $x < 0,7$  заметно улучшается и

приближается к свойствам гомоэпитаксиальных слоев GaP, применяемых в приборных структурах.

Анализ физических свойств эпитаксиальных слоев  $Ga_xIn_{1-x}P$  показал, что начиная с  $x=0,7$  весьма существенно изменяются свойства полупроводников (ПП). В частности, слои с  $x<0,7$  обладают высокой проводимостью с относительно слабой зависимостью от величины « $x$ ». Наблюдаемые относительно высокие проводимости обусловлены тем, что при данных составах твердого раствора проводимость определяется электронами абсолютного  $\Gamma$ -минимума, расположенного при  $K=(000)$  в зоне Бриллюэна. Резкое падение подвижности электронов  $\mu_n$  с дальнейшим ростом  $x$  связано с уменьшением расстояния между  $\Gamma$ - и  $X$ -минимумами до  $<0,1$  эВ, приводящее к заметному вкладу процесса рассеяния  $X$ -минимума зоны проводимости. Как известно,  $X$ -минимум характеризуется значительно большим значением  $m_n^*$ . Начиная с  $x = 0,75$  величина  $\mu_n$  приближается к  $\mu_n$  GaP, где  $X$ -минимум является абсолютным.

Рассмотрены возможности достижения высокой подвижности и дрейфовой скорости электронов в твердых растворах  $Ga_xIn_{1-x}P$  с  $x<0,73$ . Благодаря тому, что этот материал при  $x<0,73$  является прямозонным ПП, механизмы рассеяния носителей аналогичны механизмам рассеяния для полярных ПП. Для таких ПП, как известно, преобладающими являются рассеяния на оптических колебаниях решетки. При прочих равных условиях подвижность контролируется главным образом величиной эффективной массы ( $m^*$ ) носителей заряда. Эффективную массу носителей заряда в зоне проводимости для твердого раствора  $Ga_xIn_{1-x}P$  можно определить следующим образом. Величина  $m^*$  для  $Ga_xIn_{1-x}P$  изменяется между  $m^*$  для InP и GaP. Причем эти величины необходимо выбрать для  $\Gamma$ -минимума при  $K=0$ , так как основной минимум твердого раствора  $Ga_xIn_{1-x}P$  располагается при  $K=0$  и определяется переходом  $\Gamma_{15}-\Gamma_1$ . Это обеспечивает значительно высокую подвижность электронов в  $Ga_xIn_{1-x}P$  по сравнению с непрямозонным GaP. Расчетные значения подвижности электронов в  $Ga_xIn_{1-x}P$  составляют  $\mu_n = 2200 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$  (с учетом рассеяния на ионах примеси при  $N_d = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ), что удовлетворительно согласуется с экспериментально полученными значениями подвижности электронов ( $\mu_n = 1500 \div 2000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ ).

Таким образом, подвижность электронов в твердых растворах  $Ga_xIn_{1-x}P$  существенно не отличается от  $\mu_n$  InP. Дальнейшее увеличение содержания GaP в твердом растворе существенно изменяет проводимость из-за изменения зонной структуры ПП, где проводимость определяется электронами наименьшего  $X$ -минимума. Следовательно,  $Ga_xIn_{1-x}P$  с  $x>0,73$  являются наиболее широкозонными материалами, проявляющими высокую электропроводность эпитаксиальных слоев.

В третьей главе диссертации под названием «**Электрофизические и оптические свойства монокристаллов GaP, GaAs, InP и твердых растворов на их основе**» приведены результаты исследования  $Ga_xIn_{1-x}P$  p-n структур,

полученных в процессе диффузии цинка на предварительно выращенный эпитаксиальный слой  $n\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$ , имеющий изотипную подложку из GaP. Исходный твердый раствор легирован теллуrom до концентрации доноров  $N_d = 5 \cdot 10^{16} \div 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Диффузию проводили при температурах  $750 \div 850 \text{ К}$  в кварцевом реакторе с квазизамкнутым объемом на основе графитовой кассеты вертикальной конструкции, находящаяся в атмосфере проточного водорода.

Экспериментально полученная зависимость глубины залегания  $d$  р-п перехода от времени диффузии ( $d \sim t^{1/2}$ ) показала, что процесс диффузии описывается вторым законом Фика и происходит по междоузлиям. При этом зависимость толщины диффузионного слоя от температуры подчиняется закону

$$d = A_0 t^{1/2} \exp\left(-\frac{A_1}{kT}\right), \quad (1)$$

где  $A_0$  - постоянная величина,  $A_1$  - константа связи. Относительное изменение  $d$  от  $t^{1/2}$  носит линейный характер. Поверхностная концентрация дырок в исследованных слоях на  $1,0 \div 1,5$  порядка выше, чем на границе с р-п-переходом. Это свидетельствует об образовании встроенного квазиэлектрического поля градиента концентрации примесей, величина ее достигает  $\nabla = 10^2 \div 10^3 \text{ В/см}$ .

В исследованных структурах экспериментальная зависимость барьерной емкости  $C_0$  от приложенного напряжения описывается выражением

$$\left(\frac{S}{C_0}\right)^3 = \frac{12(U-U_0^c)}{q \cdot a \cdot \varepsilon_0^2}, \quad (2)$$

где  $U_0^c$  - емкостное напряжение отсечки,  $a = dN/dx$  - градиент концентрации примесей,  $S$  - площадь р-п перехода.

Величина  $U_0^c$ , полученная из зависимости (2), оказалась больше, чем расчетная величина контактной разности потенциалов. Экспериментально найденная концентрация ионизованных акцепторов  $N_a$  в р  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$ , удовлетворительно согласуется с данными, полученными согласно выражению, приведенному в

$$U_k = 2kT \ln\left(\frac{ad}{2qn_i}\right). \quad (3)$$

Это связано с донорно-акцепторной перекомпенсацией вблизи физической границы р-п перехода. Экспериментальные значения максимального поля в исследованных структурах более чем на порядок превышают величину внутреннего квазиэлектрического поля, обусловленную градиентом концентрации примесей в слоях  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$ .

Ширина слоя объемного заряда растет с увеличением обратного смещения на р-п переходе, причем при одинаковом изменении концентрации носителей заряда в базовом слое область объемного заряда больше, чем в более широкозонном  $\text{Ga}_{0.72}\text{In}_{0.28}\text{P}$ .

В диапазоне температур  $300 \text{ К} < T < 600 \text{ К}$  прямая ветвь ВАХ состоит из двух участков:

$$I = I_1 + I_2 = I_{01} \exp\left(\frac{qU}{\beta_1 kT}\right) + I_{02} \exp\left(\frac{qU}{\beta_2 kT}\right). \quad (4)$$

Для  $\text{Ga}_{0.61}\text{In}_{0.39}\text{P}$  p-n-переходов на первом участке  $1,9 \leq \beta_1 \leq 2,2$ , а на втором  $1,4 \leq \beta_2 \leq 1,6$ ; для  $\text{Ga}_{0.72}\text{In}_{0.28}\text{P}$ - соответственно  $2,0 \leq \beta_1 \leq 2,3$  и  $1,2 \leq \beta_2 \leq 1,4$ . Первый участок ВАХ при относительно малых токах имеет вид, характерный для рекомбинации в области объемного заряда. Соответственно предэкспоненциальный множитель будет

$$I = \frac{kTn_1}{\tau_{\text{эфф}}E_M} = \frac{kT}{\tau_{\text{эфф}}} \exp\left(\frac{E_g}{kT}\right). \quad (5)$$

Из зависимости  $I_{01}$  от температуры найдена ширина запрещенной зоны в активной области p-n-структур, которая в исследованном диапазоне составов изменяется в пределах  $E_g \approx 1,9 \div 2,23$  эВ (300 К). При этом эффективное время жизни носителей заряда  $\tau_{\text{эфф}} \approx (3 \div 5) \cdot 10^{-8}$  с. Экспериментально найденные значения ширины запрещенной зоны для исследованных составов  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$  составляют  $E_g \approx 2,15 \div 2,24$  эВ.

Характер зависимости ВАХ на втором участке указывает на преобладающую роль тока, обусловленного рекомбинацией в толще образца, что удовлетворительно согласуется с данными, полученными из емкостных характеристик. Зависимость обратной ветви ВАХ исследованных структур в широком интервале температур описывается выражением  $I \sim V^\gamma$ , где  $\gamma$  с увеличением  $T$  от 300 до 600 К уменьшается соответственно от 2,9 до 0,08.

Это свидетельствует о преобладании тепловой генерации носителей заряда в области объемного заряда.

Величина обратного тока подчиняется известному закону

$$I_{\text{обр}} = \frac{qn_i W}{2\tau_{\text{эфф}}} \quad (6)$$

и плотность тока принимает значения в пределах  $I_{\text{обр}} = (1 \div 5) \cdot 10^{-9}$  А/см<sup>2</sup>.

Напряжение пробоя изменяется согласно закону

$$U_{\text{проб}}(T_1) = U_{\text{проб}}(T_2) + \beta U_{\text{проб}}(T_2). \quad (7)$$

Температурный коэффициент напряжения пробоя  $\beta$  в исследованных структурах положителен. Механизм пробоя обусловлен тем, что при максимальном поле в области объемного заряда электроны и дырки, создающие обратный ток p-n перехода, приобретают кинетическую энергию, достаточную для ударной ионизации валентных электронов (т.е. в результате электрон-электронного столкновения валентные электроны переходят в зону проводимости). Возникающие при этом вторичные носители заряда разгоняются электрическим полем и способны создавать путем ударной ионизации новые носители и т.д. С ростом содержания GaP в твердом растворе  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$  температурные свойства p-n переходов улучшаются при снижении их обратных токов из-за увеличения ширины запрещенной зоны полупроводника.

В четвертой главе диссертации под названием «Изучение зависимости фотоэлектрических и тепловых свойств  $\text{Ga}_{0,7}\text{In}_{0,3}\text{P}/\text{GaP}$  гетероструктур от состава твердого раствора и степени концентрации светового потока» приведены результаты исследования зависимости электрофизических свойств гетероструктур от интенсивности светового излучения и зависимости эффективной толщины базового слоя на основе  $\text{pAl}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$  ( $0 \leq x \leq 0,8$ ) от состава твердых растворов, обоснован выбор твердых растворов  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$  для создания гетероструктурных ФП.

Характеристические особенности твердого раствора  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$  заключаются в следующем:

- во всем диапазоне вариации состава  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$  параметр решетки твердого раствора практически не изменяется. В результате исключается дополнительная генерация дефектов при вариации состава твердого раствора и возможное изменение длины диффузионного смещения неосновных носителей заряда за счет данного фактора;

- зонная структура твердого раствора при изменении параметра  $x$  в диапазоне  $0 \leq x \leq 1,0$  остается неизменной с незначительным изменением ширины запрещенной зоны полупроводника ( $2,24 \leq E_g \leq 2,4 \text{ эВ}$ ), что обеспечивает постоянство механизма оптического поглощения в твердых растворах различного состава;

- в исследуемой полосе спектра излучения для относительно тонких слоев  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$  характерно поглощение светового излучения преимущественно за счет прямого оптического перехода фотоносителей из валентной зоны в Г-минимум зоны проводимости полупроводника, где энергетический зазор изменяется в диапазоне  $2,8 \leq E_0 \leq 3,6 \text{ эВ}$ .

Исследованные структуры с базовой областью, где ее толщина составляет  $d = 0,2 \div 1 \text{ мкм}$ , получены методом низкотемпературной жидкофазной эпитаксии из тонких зазоров на предварительно выращенные эпитаксиальные слои n-типа проводимости на изотопных подложках фосфида галлия. Концентрация дырок в базовой области составляет  $N \approx 5 \cdot 10^{16} \div 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , а концентрация электронов в n  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$  соответственно  $0,7 \div 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

Толщина слоев оценена по сколу анодированной границы раздела твердых растворов обоих типов проводимости, диффузионная длина неосновных носителей и их подвижность определены методом Холла.

Проведенные исследования показали, что в базовых слоях  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$  с разным составом эффективность собирания p-n-перехода вблизи максимума спектра имеет близкие значения. При этом с увеличением  $x$  энергия максимума спектра практически линейно зависит от энергии фотонов  $h\nu$  и смещается в сторону коротких волн согласно

$$h\nu = 2,7 + 0,9x. \quad (8)$$

Это свидетельствует о том, что для разных составов  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$  при оптимальных толщинах базового слоя изменение  $I_{\text{кз}}$  p-n перехода в основном

связано с изменением спектральной полосы фоточувствительности р-п перехода.

Учитывая, что основная часть генерационно-рекомбинационных процессов происходит в базовой области р-п перехода, для количественной оценки данного процесса рассмотрено изменение длины диффузионного смещения электронов  $L_n$  при разных составах твердого раствора. Получена кривая зависимости усредненного значения  $L_n$  от состава твердого раствора, поскольку величина  $L_n$  связана с рекомбинационными параметрами р-п перехода как

$$L_n = \left( \frac{kT}{q\mu_n\tau_n} \right)^{1/2}. \quad (9)$$

Можно считать, что рекомбинационные процессы в исследуемых гетероструктурах связаны главным образом с длиной диффузионного смещения электронов в базовом  $\text{pAl}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ , и соответственно его изменение происходит в основном за счет изменения подвижности носителей заряда при варьировании состава твердого раствора. Данная зависимость свидетельствует о существовании корреляции между оптимальной толщиной базового слоя и содержанием AlP в твердом растворе. Учитывая подобную взаимосвязь параметров исследуемых структур, для фиксированного значения  $L_0$  зависимость эффективной толщины базовой области от состава  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$  можно аппроксимировать следующей эмпирической зависимостью

$$h_{\text{эфф}} = \frac{L_0}{(1+1,8x^2)}, \quad (10)$$

где  $L_0$ -диффузионная длина неосновных носителей для твердых растворов  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$  при  $x=0$ . Проведенные исследования показали, что данное соотношение позволяет определить толщину базовой области, которая обеспечивает наиболее эффективное фотоэлектрическое преобразование при заданном составе твердого раствора.

Исследованы фотоэлектрические и тепловые свойства  $\text{Ga}_{0,7}\text{In}_{0,3}\text{P}/\text{GaP}$  гетероструктур в режиме естественно-конвективного теплообмена (пассивное охлаждение).

Поэтому степень концентрации солнечного потока варьировалась в диапазоне  $K_c=1\div 100$  крат. Исследованные  $\text{Ga}_{0,7}\text{In}_{0,3}\text{P}/\text{GaP}$  гетероструктуры получены путем эпитаксиального наращивания из жидкой фазы в сочетании с низкотемпературной диффузией цинка из газовой фазы. Выбранному составу твердого раствора соответствует прямая зонная структура полупроводника с шириной запрещенной зоной  $E_g \approx 2,2\text{эВ}$ . В гетероструктуре  $\text{Ga}_{0,7}\text{In}_{0,3}\text{P}$  р- и n-типа проводимости имеют суммарную толщину  $d \approx 2\div 3$  мкм, а толщина подложки nGaP не превышает  $\sim 150$  мкм. С целью дальнейшего повышения оптической прозрачности ГФП к фотонам в длинноволновой области за краем основной полосы поглощения металлические контакты имели сетчатую форму. Они наносились на лицевой стороне  $\text{pGa}_{0,7}\text{In}_{0,3}\text{P}$  и тыльной стороне nGaP. Расстояние между полосами контактных сеток выбрано таким

образом, чтобы влияния последовательного сопротивления и сопротивления растекания тока были минимальными для рассматриваемого диапазона интенсивности солнечного потока. При этом площадь омических контактов не превышает 10% общей чувствительной площади ГФП и смонтирована на медный держатель сетчатой формы, идентичной с омическим контактом. ГФП преобразует световой поток в спектральном диапазоне  $\lambda \approx 0,3 \div 0,6$  мкм. При прямой солнечной освещенности ГФП имеет коэффициент полезного действия  $\eta \approx 10 \div 12\%$  (AM1,5) при напряжении холостого хода  $U_{xx} \approx 1,38 \div 1,45$  В. Концентрирование солнечного потока осуществлялось с помощью линз Френеля. Удельная (с единицы площади) фотоэлектрическая мощность ГФП, работающих при воздействии концентрированного солнечного излучения, определяется как

$$P_y = E_c K_{cp} \eta, \quad (11)$$

где  $E_c$  - интегральная плотность потока солнечного излучения, падающего нормально на поверхность ГФП,  $K_{cp}$  - среднее значение коэффициента концентрации солнечного излучения.

Входящий в выражение (11) параметр  $\eta$  зависит от  $K_c$  и равновесной рабочей температуры  $T$  гетероструктуры, учитывая, что при  $K_c < 50$  заметного спада величины  $\eta$  с ростом  $K_c$  не наблюдается, а влияние  $T$  на величину  $\eta$  в условиях естественно-конвективного теплообмена в том же диапазоне концентрации излучения проявляется достаточно заметно. Зависимость  $\eta$  и  $T$  от  $K_c$  аппроксимируется линейной функцией

$$\eta = \eta_0 [1 - \alpha(T - T_0)], \quad (12)$$

где  $\eta_0$  и  $T_0$  - КПД и равновесная рабочая температура p-n перехода для заданной концентрации светового потока,  $\alpha = d\eta/dT\eta_0$  - отрицательный температурный градиент, значение которого зависит от рабочей температуры гетероструктуры.

Если отвод тепла от гетероструктуры осуществляется только за счет естественно-конвективного теплообмена, а изменение температуры связано в основном с влиянием падающего солнечного излучения, равновесную рабочую температуру ГФП можно определить согласно

$$T = (\alpha_c - \eta)[(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)\sigma]^{0,25}, \quad (13)$$

где  $\alpha_c$  - интегральный коэффициент поглощения солнечного излучения передней поверхностью,  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  - интегральные значения коэффициентов собственного теплового излучения соответственно передней и тыльной поверхностью ГФП,  $\sigma$  - постоянная Стефана-Больцмана.

Приведенные зависимости позволяют определить величину  $K_c$  как соответствующую оптимальному значению вырабатываемой фотоэлектрической мощности в ГФП. В реальных условиях при естественно-конвективном теплообмене величина  $T$  возрастает в зависимости от  $K_c$ . Увеличение температуры ГФП сопровождается уменьшением  $E_g$  полупроводника, что приводит к увеличению фототока за счет некоторого

расширения спектра fotocувствительности в сторону длинных волн. Как показали эксперименты, увеличение фототока в наших случаях проявляется до концентрации солнечного потока  $K_c \approx 50$ . При более высоких значениях  $K_c$  рост фототока существенно ослабляется. Это объясняется тем, что влияние температурной зависимости тока насыщения ГФП становится заметным, в результате чего уменьшается  $U_{xx}$  и происходит снижение величины  $\eta$ .

На основе полученных экспериментальных результатов определено, что температурный коэффициент  $U_{xx}$  равен  $dU_{xx}/U_{xx}dT \approx -1,4 \cdot 10^{-3}/K$  при  $K_c=1$  и уменьшается до  $dU_{xx}/U_{xx}dT \approx -1,1 \cdot 10^{-3}/K$  при  $K_c=100$ . Температурный коэффициент КПД уменьшается от  $\alpha \approx -1,6 \cdot 10^{-3}/K$  при  $K_c=1$  до  $\alpha \approx -1,2 \cdot 10^{-3}/K$  при  $K_c=100$ .

Приведенные результаты находятся в удовлетворительном согласии с теоретическими представлениями, согласно которым температурные коэффициенты параметров ГФП уменьшаются с увеличением  $U_{xx}$  и коэффициента заполнения ВАХ. Кроме того, обнаружено, что относительный рост температуры ГФП с увеличением  $K_c$  происходит медленнее, чем в традиционных ГФП (в 3 раза уменьшается по сравнению с ГФП на основе AlGaAs/GaAs гетероструктур). Это объясняется низким фотоактивным поглощением длинноволновых фотонов в широкозонной GaP подложке с непрямой энергетической зонной структурой. Кроме того, исследованные ГФП обладают «прозрачной» конструкцией для длинноволновых фотонов за краем основной полосы поглощения за счет двусторонних сетчатых контактов, благодаря чему дополнительно ослабляется относительный рост температуры ГФП. Улучшению теплового режима ГФП способствует также более высокая теплопроводность GaP (0,77 Вт/см·К), что в 1,6 раза больше, чем в GaAs, и сравнительно малая рассеиваемая фотоэлектрическая мощность.

Далее предложена структура трехкаскадного солнечного элемента (КСЭ). КСЭ имеет два широкозонных элемента на основе p-n  $Al_{0,43}In_{0,57}P$  с подложкой ZnSe и три двусторонне-чувствительных узкозонных элемента с каскадной  $InP/Ga_{0,47}In_{0,53}As/InP$  структурой. Узкозонный каскад выполнен на основе элементов с одним разделяющим барьером, имеет двусторонне сетчатые омические контакты и соединены между собой последовательно. Три InP и девять GaInAs элементов соединялись с помощью перемычек. Для снижения внутренних оптических потерь пространство, остающееся между широко- и узкозонными элементами после их соединения наложением, наполнено просветляющим покрытием. Площади узкозонных каскадов равны между собой и составляют 1/3 площади широкозонных  $Al_{0,43}Ga_{0,57}P$  элементов, их общая площадь после последовательной коммутации не превышает площади широкозонного элемента.

На КСЭ солнечное излучение падает с двух сторон, кванты поглощаются в широко- и узкозонных элементах каскада, генерируют неравновесные носители заряда, разделенные p-n-переходами, в результате чего возникает фототок в каждом элементе. Широкозонные  $Al_{0,43}Ga_{0,57}P$  элементы поглощают излучение

в фиолетовой и ближне-ультрафиолетовой полосах спектра ( $h\nu \geq 2,31 \text{ эВ}$ ) и являются прозрачными в длинноволновой области за краем основной полосы поглощения. Поэтому часть падающего излучения с обеих сторон КСЭ последовательно проникает через широкозонные в узкозонные элементы, поглощаясь с двух сторон узкозонного каскада, и генерирует неравновесные носители заряда. Так как узкозонная часть КСЭ также имеет каскадную структуру, то в его InP элементах кванты поглощаются в определенном спектральном диапазоне, соответствующем ширине запрещенной зоны полупроводника, и являются прозрачными в длинноволновой области за краем основной полосы поглощения InP. Поэтому часть падающего излучения с  $h\nu < 1,35 \text{ эВ}$  с обеих сторон КСЭ проникает через InP элементы в более узкозонные  $\text{Ga}_{0,47}\text{In}_{0,53}\text{As}$ , поглощаясь с двух сторон GaInAs элементов, что приводит к двусторонней генерации неравновесных носителей заряда.

Таким образом,  $\text{Ga}_{0,47}\text{In}_{0,53}\text{As}$  элементы преобразуют излучение с двух сторон. Это позволяет повысить генерируемую  $\text{Ga}_{0,47}\text{In}_{0,53}\text{As}$  элементом величину тока и сравнить её значение с током каждого InP элемента. В случае равенства токов  $\text{Al}_{0,43}\text{In}_{0,57}\text{P}$ , InP и  $\text{Ga}_{0,47}\text{In}_{0,53}\text{As}$  элементов становится возможным соединить их последовательно, повысить выходное напряжение и мощность каскада. Ток КСЭ при последовательном соединении определяется током одного из составных элементов, а его выходное напряжение будет равно сумме напряжений всех составных элементов каскада.

Отличительной особенностью твердых растворов  $\text{Al}_{0,43}\text{In}_{0,57}\text{P}$  с указанным составом является то, что он обеспечивает создание края поглощения с высоким коэффициентом в области  $h\nu \geq 2,31 \text{ эВ}$ . Следствием этого является возможность устранения оптических потерь в спектральной полосе  $2,31 \leq h\nu \leq 3,0 \text{ эВ}$ . Эти особенности  $\text{Al}_{0,43}\text{In}_{0,57}\text{P}$  p-n переходов позволяет получить в каждом широкозонном элементе плотность тока короткого замыкания  $I_{\text{кз}} \approx 10 \text{ мА/см}^2$  при AM0 при напряжении холостого хода  $U_{\text{хх}} \approx 1,6 \text{ В}$ . Ток короткого замыкания InP элемента в спектральном диапазоне  $1,35 \leq h\nu \leq 2,31 \text{ эВ}$  в условиях одностороннего освещения составляет  $I_{\text{кз}} \approx 30 \text{ мА/см}^2$ . Такое значение тока InP элемента в три раза превышает ток  $\text{Al}_{0,43}\text{In}_{0,57}\text{P}$  элементов, и под этим элементом можно разместить три InP элемента при практически равном значении токов короткого замыкания. Поскольку с двух сторон КСЭ имеется два  $\text{Al}_{0,43}\text{In}_{0,57}\text{P}$  элемента, то InP элементы необходимо выбрать в количестве шести штук, где площадь каждого из них равна 1/3 площади  $\text{Al}_{0,43}\text{In}_{0,57}\text{P}$  элемента, причем напряжение холостого хода каждого InP элемента  $U_{\text{хх}} \approx 0,9 \text{ В}$ , а ток короткого замыкания  $\sim 10 \text{ мА/см}^2$ .

Ток короткого замыкания  $\text{Ga}_{0,47}\text{In}_{0,53}\text{As}$  элемента в спектральном диапазоне  $0,73 < h\nu < 1,35 \text{ эВ}$  условиях одностороннего освещения составляет  $\sim 15 \text{ мА/см}^2$ . Так как наиболее узкозонные  $\text{Ga}_{0,47}\text{In}_{0,53}\text{As}$  p-n переходы с подложкой InP могут преобразовать солнечное излучение двусторонне, то в условиях двустороннего освещения этот показатель достигает  $\sim 30 \text{ мА/см}^2$ . Поскольку площади  $\text{Ga}_{0,47}\text{In}_{0,53}\text{As}$  элементов выбраны в пределах 1/3 площади

InP элементов, то плотность тока, генерируемого в каждом  $\text{Ga}_{0,47}\text{In}_{0,53}\text{As}$  элементе в условиях двустороннего освещения, остается на уровне  $\sim 10 \text{ mA/cm}^2$  при напряжении холостого хода  $U_{\text{xx}} \approx 0,5 \text{ В}$ .

В результате при заданной площади двух  $\text{Al}_{0,43}\text{In}_{0,57}\text{P}$  элементов между ними можно разместить три  $\text{InP/Ga}_{0,47}\text{In}_{0,53}\text{P/InP}$  каскадных структур при токе короткого замыкания всех составных элементов каскада  $I_{\text{кз}} \approx 10 \text{ mA/cm}^2$ .

Таким образом, ток короткого замыкания каскада при последовательном соединении всех составных элементов определяется током одного из них, и его величина близка  $\sim 10 \text{ mA/cm}^2$ , а его выходное напряжение будет равно сумме напряжений всех составных элементов и достигает величин  $13,0 \div 14,0 \text{ В}$ . В результате удельная фотоэлектрическая мощность на единицу площади и выходное напряжение в каскадной системе в условиях двустороннего освещения возрастают на  $\sim 15\%$  по сравнению с известными.

Предложенный КСЭ преобразует излучение в сравнительно широком диапазоне солнечного спектра, в нем обеспечивается высокая температурная стабильность параметров составных элементов каскада, а тепловые потери сводятся до минимума за счет уменьшения тепловой нагрузки на каждый элемент узкозонной части КСЭ. Поэтому данный КСЭ, в отличие от известных, может более эффективно работать в режиме пассивного теплоотвода при умеренных (до 100 крат) диапазонах концентрации солнечного излучения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе изучения механизмов воздействия концентрированного солнечного излучения на фотоэлектрические характеристики каскадной структуры на основе разработанных гетероструктур индий-галлий-фосфида на подложках фосфида галлия сделаны следующие выводы:

1. Экспериментально показано, что методом жидкостной эпитаксии можно получить тонкие ( $d \leq 2 \text{ мкм}$ ) гетероэпитаксиальные  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P/GaP}$  ( $0,6 \leq x \leq 1,0$ ) структуры, предназначенные для изготовления каскадных солнечных элементов, путем введения между рабочим слоем и подложкой промежуточного слоя с плавно увеличивающимся к поверхности параметром решетки от гетерограницы.

2. Установлено, что в твердом растворе  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$  подвижность носителей заряда при содержаниях In менее 27% меняется незначительно и близка к подвижности прямозонного  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$ , а в случае превышения содержания In более 27% подвижность определяется свойствами непрямозонного  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$ , где минимум зоны проводимости является абсолютным.

3. Определено, что спектры поглощения  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$  характеризуются тем, что для прямозонных составов они описываются функцией  $\alpha = (h\nu - E_g)^n$  с  $n=0,5$ , где  $\alpha$  возрастает до  $10 \text{ см}^{-1}$  и более. При этом пологий край поглощения в слоях с непрямозонным составом смещается в область сильного поглощения до энергии, равной пороговой энергии прямых оптических переходов, где

коэффициент поглощения в длинноволновой области описывается как  $\alpha=(h\nu-E_g)^{3/2}$ .

4. Установлено, что  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}/\text{GaP}$  гетеропереходные ФП с двусторонней контактной сеткой могут эффективно функционировать в режиме воздушно-конвективного теплообмена и при стократной концентрации потока солнечного излучения.

5. Впервые разработана новая конструкция двусторонне-чувствительного трехкаскадного ФП с повышенным выходным напряжением  $13\div 14\text{В}$  и током короткого замыкания  $8\div 10\text{ мА/см}^2$ .

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

---

**TASHKENT UNIVERSITY OF INFORMATION TECHNOLOGIES NAMED  
AFTER MUHAMMAD AL-KHORAZMI**

**JUMANIYOZOV IBROHIM OTAKHONOVICH**

**IMPACT OF CONCENTRATED LIGHT ON PHOTSENSITIVE  
 $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}/\text{GaP}$  HETEROSTRUCTURES AND CASCADE  
PHOTOCONVERTERS ON THEIR BASIS**

**01.04.10 – Physics of Semiconductors**

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

**Tashkent – 2019**

**The theme of the dissertation of the doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences was registered by the Supreme Attestation Commission of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under No.B2017.3.PhD/FM105.**

Dissertation has been prepared at Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad Al-Khorazmi.

The abstract of the dissertation was posted in three (Uzbek, Russian, English (resume)) languages on the website of the Scientific Council at ([www.fti-kengash.uz](http://www.fti-kengash.uz)) and on the website of «ZiyoNet» Information and Educational Portal at ([www.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz)).

**Scientific supervisor:** **Abdukadirov Mukhitdin Abdurashitovich**  
Doctor of Technical Sciences, Professor

**Official opponents:** **Karimov Abdulaziz Vakhitovich**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor

**Iliev Halmurat Midzhitovich**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor

**Leading organization:** **The National University of Uzbekistan**

The defence of the dissertation will be held on «\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019, at \_\_\_\_\_ at the meeting of the Scientific Council No.DSc. 30.05.2018.FM/T.34.01 at the Physical-Technical Institute (Address: 2B Chingiz Aytmatov str., 100084, Tashkent, Uzbekistan. Phone/fax: (+99871) 235-42-91, e-mail: [info.fti@uzsci.net](mailto:info.fti@uzsci.net)).

The dissertation can be looked through in the Information Resource Centre of the Physical-Technical Institute (registered under No.\_\_\_\_). Address: 2B Chingiz Aytmatov str., 100084, Tashkent, Uzbekistan. Phone/fax: (+99871) 235-30-41.

The abstract of the dissertation was distributed on «\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019.

(Registry record No. \_\_\_\_\_ dated «\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019).

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

**A.G. Komilov**  
Scientific Secretary of the Scientific Council on Award of Scientific Degrees, candidate of the technical Sciences

**A.V. Karimov**  
Chairman of the Scientific Seminar of the Scientific Council on Award of Scientific Degrees, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

## INTRODUCTION (abstract of the PhD dissertation)

**The aim of research work** is to establish the mechanisms of the effect of concentrated solar radiation on the photoelectric characteristics of the cascade structure based on the developed indium-gallium-phosphide heterostructures on gallium phosphide substrates.

**The objects of the research** are heterostructures based on  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}/\text{GaP}$ , as well as single and multi-junction solar energy photoconverters.

**Scientific novelty of the research** consists in the following:

It is shown that structurally perfect thin ( $d \leq 2 \mu\text{m}$ ) heteroepitaxial  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}/\text{GaP}$  ( $0,6 \leq x \leq 1,0$ ) layers, promising for creating cascade photoconverters, can be obtained from the liquid phase by introducing between the working layer and an intermediate layer substrate with a smoothly increasing lattice parameter from the heterointerface;

a relationship has been established between the thickness of the base layer and the composition of the  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$  solid solution, which ensures the efficient conversion of light radiation;

it was shown for the first time that photoconverters based on  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}/\text{GaP}$  wide-gap semiconductors can function effectively both in the mode of natural air-convective heat exchange and at a hundredfold concentration of solar flux;

for the first time, a two-sided sensitive three-cascade phase-transition design with an increased output voltage and a photovoltaic power in the  $\text{AlInP}/\text{InP}/\text{GaInAs}$  system was proposed.

**Implementation of the research results.** Based on the study of the mechanisms of the effect of concentrated solar radiation on the photoelectric characteristics of the cascade structure based on the developed indium-gallium-phosphide heterostructures on gallium phosphide substrates:

on the development of a two-way sensitive three-cascade FC design, a patent was obtained for the invention of the «Cascade Solar Element» by the Agency of Intellectual Property of the Republic of Uzbekistan (No. IAP 04695, April 15, 2013). The developed cascade solar cell made it possible to obtain a high output voltage ( $13 \div 14\text{V}$  and short-circuit current of  $8 \div 10 \text{ mA}/\text{cm}^2$ ) and operability with a hundred-fold solar radiation without cooling devices, in contrast to the known analogs;

In the natural air-convective heat transfer mode and at a 100-fold concentration of the solar flux,  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$ -based photoconverters were used to carry out the fundamental scientific project  $\Phi 2\text{-OT-O-15494}$  «Improving the efficiency of emitters, photocells, and other types of optoelectronic devices based on research of excitons, polarons, bipolarons, and transport phenomena in hetero- and nanostructures with quantum dots» 2012-2016. (Certificate of the Agency of Science and Technology of the Republic of Uzbekistan for FTA-02-11/1320 dated December 18, 2017). Using scientific results, it was possible to determine the operating temperature range of hetero- and nanostructures with quantum dots without cooling.

**Publication of the research results.** The main scientific studies were conducted in 7 international and 7 republican scientific and practical conferences. The main results of the research were published in 26 scientific works, of which 11 articles in journals were recommended by the Higher Attestation Commission of the Republic

of Uzbekistan for publication of the main results of scientific research obtained by 1 patent of the Republic of Uzbekistan for invention.

**The structure and volume of the dissertation.** The thesis consists of an introduction, four chapters, conclusion, list of references and appendices. The total volume of the thesis is 111 pages.

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

**I бўлим (I часть; part I)**

1. Патент РУз № IAP 04695 от 15.04.2013. Расмий ахборотнома. -2013. - №5. Каскадный солнечный элемент / Абдукадыров М.А., Ахмедова Н.А., Жуманиязов И.О., Машарипова С.Ю.
2. Abdukadirov M.A., Jumaniyazov I.O. Factors Affecting the Transparency of GaP Mono Crystals to Optical Radiation // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. 2018, India, Vol.5, Issue 10, - PP.7051-7053. [05.00.00, № 8].
3. Абдукадыров М.А., Ахмедова Н.А., Ганиев А.С., Джуманиязов И.О. Влияние обработки поверхности на оптическую прозрачность монокристаллов GaP // Гелиотехника. 2014, №4. - С.53-55. [05.00.00, № 1].
4. Абдукадыров М.А., Ганиев А.С., Джуманиязов И.О., Муминов Р.А. Пути повышения выходного напряжения и удельной электрической мощности фотопреобразователей // Гелиотехника. 2014, №2. -С.6-8. [05.00.00, № 1].
5. Абдукадыров М.А., Ганиев А.С., Джуманиязов И.О., Муминов Р.А. Влияние подложечного кристалла на механические напряжения в гетероэпитаксиальных фотопреобразовательных структурах  $Ga_xIn_{1-x}P/GaP$  // Гелиотехника. 2013, - №3. -С.28-30. [05.00.00, № 1].
6. Abdukadirov M.A. Ganiyev A.S. Djumaniyazov I.O. Photoconverters with V-shaped concentrators // TUIT bulletin, 2013 , №1-2.-PP. 99-103. [05.00.00, № 10].
7. Абдукадыров М.А., Ахмедова Н.А., Ганиев А.С., Джуманиязов И.О. Интегральные гетерофотодиодные структуры на основе  $Al_xGa_{1-x}P$  и  $Ga_yIn_{1-y}P$  р-п переходов // SCIENCE AND WORLD International scientific journal. Volgograd - 2013. №3(3). - С.14-16. [№5, Global Impact Factor, IF: 0,325].
8. Абдукадыров М.А., Ганиев А.С., Сонг Енг Вон., Джуманиязов И.О. Исследование механических напряжений в гетероэпитаксиальных структурах  $Ga_xIn_{1-x}P/GaP$  // Узбекский физический журнал. 2012, Т.14. №3. - С.184-187. [01.00.00, №5].
9. Абдукадыров М.А., Джуманиязов И.О., Муминов Р.А. Влияние концентрированного солнечного излучения на свойства  $Ga_{0,7}In_{0,3}P/GaP$  фотопреобразователей // Гелиотехника. 2011, №2, - С.75-77. [05.00.00, № 1].
10. Абдукадыров М.А., Ахмедова Н.А., Джуманиязов И.О., Машарипова С.Ю. Электрические свойства  $Ga_xIn_{1-x}P/GaP$  р-п переходов // Узбекский физический журнал. 2011, Т.13. №4. -С.268-271. [01.00.00, №5].
11. Абдукадыров М.А., Ахмедова Н.А., Джуманиязов И.О. Перспективы повышения эффективности фотопреобразователей солнечной энергии // Проблемы энерго- и ресурсосбережения. 2011, - С.114-117. (Спецвыпуск). [05.00.00, № 21].

12. Абдукадыров М.А., Ахмедова Н.А., Машарипова С.Ю., Джуманиязов И.О. Структурное совершенство гетероэпитаксиальных  $Ga_xIn_{1-x}P/GaP$  слоев, выращенных из жидкой фазы // Узбекский физический журнал. 2010, №3. - С.169-172. [01.00.00, №5].

## II бўлим (II часть; part II)

13. Абдукадыров М.А., Акбаров Н.Ф., Джуманиязов И.О. Влияние  $\gamma$ -облучения на спектральные характеристики  $GaAs/AlGaAs$  фотопреобразователей с оптическим окном на основе  $AlGaAs$  и  $GaP$  // Яримўтказгичлар физикасининг ва қайта тикланувчи энергия манбаларини ривожлантиришнинг замонавий муаммолари: Республика илмий-амалий анжумани материаллари. Андижон -2018. - С.37-38.

14. Ахмедова Н.А., Абдукадыров М.А., Ганиев А.С., Джуманиязов И.О. Солнечные  $GaAs/AlGaAs$  высоковольтные генераторы с широкозонным  $GaP$  окном // Материалы Республиканской научно-технической конференции «Актуальные проблемы использования альтернативных источников энергии». Карши- 2014. -С.105-106.

15. Ахмедова Н.А. Джуманиязов И.О. Получение и исследование гетерофотодиодов на основе  $Ga_xIn_{1-x}/GaP$  // «Информационные технологии и проблемы телекоммуникации». Сборник докладов Республиканской научно-технической конференции молодых ученых, исследователей, магистрантов и студентов. Ташкент-2013. - С.114-115.

16. Абдукадыров М.А., Ахмедова Н.А., Ганиев А.С., Джуманиязов И.О. Воздействие концентрированного света на гетерофотопреобразователи «прозрачной» конструкции с  $GaAs$  p-n переходом // Материалы Международной конференции, посвященной 70-летию Физико-технического института НПО «Физика-Солнце». «Фундаментальные и прикладные вопросы физики». Ташкент-2013. - С.59-61.

17. Абдукадыров М.А., Акбаров Н.Ф., Джуманиязов И.О. Каскадный солнечный элемент с высоким выходным напряжением и фотоэлектрической мощностью // Сборник материалов Республиканской научно-практической конференции с участием зарубежных ученых «Физика и экология». Нукус-2013.- С.30.

18. Abdukadirov M.A., Ganiev A.S., Dzhumaniyazov I.O.  $Ga_xIn_{1-x}P/GaP$  Properties of heterophotoconverting structures under the influence of the concentrated sunlight // International Conference on European Science and Technology, Munich, Germany-2012, -PP.15-17.

19. Абдукадыров М.А., Ахмедова Н.А., Джуманиязов И.О. Влияние состава твердого раствора на спектры поглощения и пропускания  $Ga_xIn_{1-x}P/GaP$  солнечных элементов // Материалы Республиканской научно-технической конференции «Фотоэлектрические и теплофизические основы преобразования солнечной энергии». Фергана- 2011.- С.146-147.

20. Абдукадыров М.А., Ахмедова Н.А., Джуманиязов И.О., Машарипова С.Ю., Ганиев А.С. Свойства каскадных  $GaInP/GaAs/GaInP$  фотопреоб-

разователей с двустороннечувствительными узкозонными p-n переходами // II Международная конференция по «Оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро и наноструктурах». Фергана- 2011.- С.95-97.

21. Абдукадыров М.А., Абдурахманов К.П., Алаев А.А., Джуманиязов И.О. Исследование эффективности вывода белого свечения из монокристаллов GaP // II Международная конференция по «Оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро- и наноструктурах». Фергана -2011.- С.109-110.

22. Абдукадыров М.А., Ахмедова Н.А., Ганиев А.С., Джуманиязов И.О. Влияние ширины запрещенной зоны канальной области на фототранзисторный эффект в гетероструктурах  $n^0\text{AlGaAsP}/p^+\text{GaP}$  // Республиканская научно-методическая конференция «Современные информационные технологии в телекоммуникации и связи». Ташкент-2011, - С.138.

23. Абдукадыров М.А., Ахмедова Н.А., Джуманиязов И.О., Машарипова С.Ю. Свойства  $\text{Ga}_{0,7}\text{In}_{0,3}\text{P}/\text{GaP}$  фотопреобразователей при концентрированном солнечном излучении // Материалы Международной конференции, посвященной 80-летию академика М.С.Саидова «Фундаментальные и прикладные вопросы физики». Ташкент -2010. - С.48-49.

24. Абдукадыров М.А., Абдурахманов К.П., Алаев А.А., Джуманиязов И.О. Получение и исследование гетероэпитаксиальных слоев  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$  на подложках GaP // Материалы Международной конференции, посвященной 80-летию академика М.С.Саидова «Фундаментальные и прикладные вопросы физики». Ташкент- 2010. - С.49-50.

25. Абдукадыров М.А., Ахмедова Н.А., Машарипова С.Ю., Джуманиязов И.О. Тепловые свойства GaAs и  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$  солнечных элементов при воздействии концентрированных световых потоков // Материалы 2-й Международной конференции «Неравновесные процессы в полупроводниках и в полупроводниковых структурах». Ташкент-2009.- С.144-145.

26. Абдукадыров М.А., Ахмедова Н.А., Машарипова С.Ю., Джуманиязов И.О. Пути снижения рекомбинационных потерь в «сине-фиолетовых»  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}/\text{GaP}$  ( $0,6 \leq x < 0,73$ ) фотопреобразователях // «Қаттиқ жисмлар физикасининг долзарб муаммолари» мавзусидаги Республика илмий-амалий анжумани материаллари. Андижан - 2009. - С.38-39.

Автореферат «Til va adabiyot ta'limi» журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилиб, ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги матнлари ўзаро мувофиқлаштирилди (05.07.2019 йил).

Босишга рухсат этилди: 30.08.2019 йил.  
Бичими 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>, «Times New Roman»  
гарнитурда рақамли босма усулида босилди.  
Шартли босма табағи 2,9. Адади: 100. Буюртма: № 117.

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

«АКАДЕМИЯ НОШИРЛИК МАРКАЗИ»  
Давлат унитар корхонасида чоп этилди.