

**АНДИЖОН ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ  
ИЛМий ДАРАЖА БЕРУВЧИ Ph.D.28.02.2018.FM.60.01  
РАҚАМЛИ ИЛМий КЕНГАШ**

---

**АНДИЖОН ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ  
АНДИЖОН МАШИНАСОЗЛИК ИНСТИТУТИ**

**АЛИЕВ СУХРОБ РАЙИМЖОНОВИЧ**

**КРЕМНИЙ НЕГИЗИДАГИ СТРУКТУРАЛАРДА ФОТОЭЛЕКТРИК  
ЭНЕРГИЯ ЎЗГАРТИРИШ САМАРАДОРЛИГИНИ ОШИРИШ**

**01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси**

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

**АНДИЖОН – 2018**

**Докторлик диссертацияси автореферати мундарижаси**

**Оглавление автореферата докторской диссертации**

**Content of the abstract of doctoral dissertation**

**Алиев Сухроб Райимжонович**

Кремний негиздаги структураларда фотоэлектрик энергия ўзгартириш самарадорлигини ошириш..... 3

**Алиев Сухроб Райимжонович**

Повышения эффективности фотоэлектрического преобразования энергии в структурах на кремниевой основе ..... 19

**Aliev Sukhrob Rayimjonovich**

Increasing the efficiency of photoelectric energy conversion in structures based on silicon..... 35

**Эълон қилинган ишлар рўйхати**

Список опубликованных работ ..... 39  
List of published works .....

**АНДИЖОН ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ  
ИЛМий ДАРАЖА БЕРУВЧИ PhD.28.02.2018.FM.60.01  
РАҚАМЛИ ИЛМий КЕНГАШ**

---

**АНДИЖОН ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ  
АНДИЖОН МАШИНАСОЗЛИК ИНСТИТУТИ**

**АЛИЕВ СУХРОБ РАЙИМЖОНОВИЧ**

**КРЕМНИЙ НЕГИЗИДАГИ СТРУКТУРАЛАРДА ФОТОЭЛЕКТРИК  
ЭНЕРГИЯ ЎЗГАРТИРИШ САМАРАДОРЛИГИНИ ОШИРИШ**

**01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси**

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

**АНДИЖОН – 2018**

**Фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2017.2.PhD/FM100 рақам билан рўйхатга олинган.**

Диссертацияси Андижон давлат университетида ва Андижон машинасозлик институтида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгашнинг веб-саҳифасида ([www.adu.uz](http://www.adu.uz)) ҳамда «ZiyoNet» Ахборот таълим порталида ([www.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz)) жойлаштирилган.

<b>Илмий раҳбар:</b>	<b>Юсупов Аҳмед</b> физика-математика фанлари доктори, профессор
<b>Расмий оппонентлар:</b>	<b>Мамадолимов Абдуғофур</b> физика-математика фанлари доктори, академик <b>Отажонов Салим Мадрахимович</b> физика-математика фанлари доктори, профессор
<b>Етакчи ташкилот:</b>	<b>Тошкент давлат техника университети</b>

Диссертация ҳимояси Андижон давлат университети ҳузуридаги PhD.28.02.2018.FM.60.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2018 йил «\_\_» \_\_\_\_\_ соат \_\_\_\_ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 170100, Андижон шаҳри, Университет кўчаси, 129-уй. Тел./факс: 0(374) 223-88-30; e-mail: [agsu\\_info@edu.uz](mailto:agsu_info@edu.uz), Андижон давлат университети мажлислар зали.)

Диссертация билан Андижон давлат университетининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин. ( \_\_ рақам билан рўйхатга олинган.) (Манзил: 170100, Андижон шаҳри, Университет кўчаси, 129-уй. Тел./факс: 0(374) 223-88-30.)

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

**С.З. Зайнабидинов**

Илмий даража берувчи Илмий кенгаш раиси, ф.-м.ф.д., академик

**А.О. Курбанов**

Илмий даража берувчи Илмий кенгаш илмий котиби, ф.-м.ф.н.

**И.Н. Каримов**

Илмий даража берувчи Илмий кенгаш ҳузуридаги илмий семинар раиси ф.-м.ф.д., доцент

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

**Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати.** Жаҳонда ҳозирги кунда шиддат билан ривожланаётган яримўтказгичлар физикаси соҳасида кремний негизидаги структураларда фотоэлектрик энергия ўзгартириш самарадорлигини ошириш муҳим муаммолардан бири ҳисобланади. Бунда фотоўзгартиргич юзасига тушаётган ёруғлик оқимининг самарали ютилишини таъминлаш, фотогенерацияланган заряд ташувчиларнинг сиртий ва ҳажмий рекомбинациясини камайтириш, юқори самарали фотоўзгартиргичлар учун истиқболли янги структуралар олиш, уларнинг электрофизик ва фотоэлектрик хоссаларини ўрганиш ҳамда юқори сифатли кремнийни тежаш имкониятларини тадқиқ этиш муҳим вазифалардан бўлиб келмоқда.

Бугунги кунда жаҳонда кремний негизидаги структураларда фотоэлектрик энергия ўзгартириш самарадорлигини ошириш борасида мақсадли илмий тадқиқотларни, жумладан, куйидаги йўналишлардаги илмий изланишларни амалга ошириш муҳим вазифалардан ҳисобланади: кремний асосли *p-n*-ўтишли гомо- ва гетероструктураларда фотогенерацияланган заряд ташувчиларнинг ҳажмий рекомбинацияланиш даражасини камайтириш ҳисобига фотоэлектрик энергия ўзгартириш самарадорлигини ошириш имкониятларини аниқлаш; кремний негизидаги фотоўзгартиргичларнинг эмиттер қатламида ва фронтал сиртидаги фотогенерацияланган заряд ташувчиларнинг самарали йиғилиш даражасини инновацион технологиялар ёрдамида кучайтириш имкониятларини аниқлаш; самарадор фотоўзгартиргичларни яратиш учун истиқболли ҳисобланган кенг зонали ва паст таннархли янги материаллар ва структуралар олиш ҳамда улардаги заряд кўчиш механизмларини аниқлаш.

Мамлакатимизда илм-фан соҳасидаги устувор йўналишларда, жумладан, «Қайта тикланувчи энергия манбаларидан фойдаланишни ривожлантириш»да яримўтказгичлар асосидаги фотоўзгартиргичларнинг самарадорлигини ошириш бўйича натижалар олинди. Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясига кўра, илмий-тадқиқот ва инновация фаолиятини ривожлантириш, илмий ва инновация ютуқларини амалиётга жорий этишнинг самарали механизмларини яратиш масалаларига, жумладан, кремний негизидаги структураларда фотоэлектрик энергия ўзгартириш самарадорлигини оширишни тадқиқ қилишга алоҳида эътибор қаратилди.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сонли «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони, 2017 йил 13 февралдаги ПҚ-2772-сонли «2017-2021 йилларда Электротехника саноатини ривожлантиришнинг устувор йўналишлари тўғрисида»ги ва 2017 йил 17 февралдаги ПҚ-2789-сонли «Фанлар академияси фаолияти, илмий тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги Қарорлари ҳамда мазкур

фаолиятга тегишли меъерий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

**Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланиши устувор йўналишларига мослиги.** Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялар тараққиётининг «III. Қайта тикланувчи энергия манбаларидан фойдаланишни ривожлантириш» устувор йўналишига мос илмий дастурларга мувофиқ бажарилган.

**Муаммонинг ўрганилганлик даражаси.** Кремний негизидаги фотоўзгартиргичларнинг самарадорлигини ошириш бўйича тадқиқотлар жаҳоннинг илғор мамлакатларидаги илмий тадқиқот марказлари ва университетларида олиб борилмоқда. Хусусан, М.А.Гриин, В.А.Летин, В.Р.Заявлин, Серж Абра-кен, Дефиз Жан-Марко, Колетт Жан-Поль, Д.С.Стребков ва бошқаларнинг илмий тадқиқотлари турли конструкцияга эга бўлган кремний негизидаги структураларда фотоэлектрик энергия ўзгартириш самарадорлигини ошириш масалаларига бағишланган. Жумладан, уларнинг тадқиқотларида вертикал *p-n*-ўтишли ва икки томонлама сезгир фотоўзгартиргичлар асосидаги конструкциялар яратилган ҳамда уларнинг электрофизик ва фотоэлектрик хусусиятлари ўрганилган.

David B. Mitzi (АҚШ), Wei Wang (АҚШ), Douglas Bishop (АҚШ), Oki Gunawan (АҚШ), Yeng Ming Lam (Сингапур), Neil S. Beattie (Буюк Британия) ва бошқа хорижлик тадқиқотчилар  $Cu_2ZnSn(S_{1-x}Se_x)_4$  (CZTSSe) асосидаги гетероструктураларни олиш ва улардан фойдаланган ҳолда самарадор фотоўзгартиргичларни яратиш устида тадқиқот олиб борганлар. Тадқиқотлар натижасида ушбу олимлар шиша тагликда CZTSSe гетероструктуралар асосидаги фотоўзгартиргичлар олишга муваффақ бўлганлар (ФИК 12,6 %). Бугунги кунда CZTSSe/Si гетероструктуралар олиш ва улар асосида фотоўзгартиргичлар яратиш истикболли ҳамда долзарб масала сифатида сақланиб қолмоқда.

Ўзбек олимлари академик М.С.Саидов ва Б.М.Абдурахмановларнинг илмий ишларида концентраторли системалар учун юқори самарадорликка эга фотоўзгартиргичлар кўрсатиб ўтилган. Академик Р.А.Мўминов, М.Н.Турсунов ва бошқа олимларнинг ишларида турли конструкцияга эга бўлган фотоўзгартиргичларни яратиш ва фотоэлектрик хусусиятларини ўрганишнинг назарий ҳамда экспериментал таҳлиллари келтирилган.

А.Юсупов ва унинг гуруҳи томонидан турли тагликларда  $Cu_2ZnSnS_4$  (CZTS),  $Cu_2ZnSnSe_4$  (CZTSe), CZTSSe гетероструктуралар олинган ва уларнинг электрофизик хусусиятлари таҳлил этилган.

**Тадқиқотнинг диссертация бажарилган олий таълим муассасасидаги илмий тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги.** Диссертация иши Андижон давлат университети илмий-тадқиқот ишлари режасининг ОТ-Ф-2-28. «Легирланган кремний сирти ва ҳажмидаги квант ўлчамли эффектлар ҳамда уларнинг *p-n*-структуралардаги заряд ташувчилар фотогенерация ва рекомбинация жараёнларига таъсири» (2012-2016 йй.) мавзусидаги фундаментал, А-4-12 рақамли «Квант ўлчамли наноплазмоника

эффекти ёрдамида кремний асосли қуёш элементлари самарадорлигини ошириш» (2015-2017 йй.) мавзусидаги амалий, ЁА4-ОТ-0-1936 ЁА4-6 рақамли «Камқувватли электрон маиший жиҳозлар учун энергия манбаи сифатида қўллашга мўлжалланган фотоэлектрик модулларни яратиш ва синаш» (2014-2015 йй.) мавзусидаги ёшлар амалий тадқиқоти ҳамда Тошкент автомобиль йўллари институти илмий тадқиқот ишлари режасининг Ф-3-15 «Фотоэлектрик энергия ўзгартиргичлар учун истиқболли  $Cu_2ZnSnSe(S)_4$  қотишмалар асосида структуралар шакллантириш қонуниятлари ва уларнинг хусусиятлари» (2012-2016 йй.) мавзусидаги фундаментал тадқиқот лойиҳалари доирасида бажарилган.

**Тадқиқотнинг мақсади** кремний негизидаги структураларда фотоэлектрик энергия ўзгартириш самарадорлигини оширишнинг физик механизмларини ва янги техник ечимларини яратиш, истиқболли саналган кенг зонали ва экологик соф структураларнинг хусусиятларини аниқлашдан иборат.

**Тадқиқотнинг вазифалари:**

кремний асосли *p-n*-гомо- ва гетероструктураларда фотогенерацияланган заряд ташувчиларнинг рекомбинацияланиш даражасини камайтириш ҳисобига фотоэлектрик энергия ўзгартириш самарадорлигини ошириш имкониятларини ўрганиш;

вертикал *p-n*-ўтишларда ҳамда икки томонлама ёритилганлик шароитида фотогенерацияланган заряд ташувчиларнинг самарали йиғилиши ҳисобига янги самарадор техник ечимларни амалга ошириш;

кремний асосли қуёш ўзгартиргичларининг эмиттер қатламида ва фронтал сиртида фотогенерацияланган заряд ташувчиларнинг самарали йиғилишини инновацион технологиялар ёрдамида таъминлаш имкониятларини ўрганиш;

самарадор қуёш элементларини яратиш учун истиқболли  $S/Se$  моддаларининг оптимал муносабатларига эга  $Cu_2ZnSn(S_{1-x}Se_x)_4/Si$  гетероструктуралар олиш ва уларнинг асосий характеристикаларини аниқлаш.

**Тадқиқотнинг объекти** кремний асосли турли конструкцияларга эга фотоэлектрик ўзгартиргичлар ва  $CZTSSe/Si$  гетероструктуралардан иборат.

**Тадқиқотнинг предмети** горизонтал ва вертикал *p-n*-ўтишли кремний структуралари асосидаги фотоўзгартиргичларда ва  $S/Se$  моддаларининг оптимал муносабатларига эга  $Cu_2ZnSn(S_{1-x}Se_x)_4/Si$  гетероструктураларда заряд ташиш қонуниятлари ва фотоэлектрик жараёнлардан иборат.

**Тадқиқотнинг усуллари.** Ишда структураларнинг стандарт шаклдаги вольт-ампер, вольт-сигим, спектрал характеристикаларини ўлчаш методлари, шунингдек, экспериментал намуналарга термик ишлов бериш, атомларни ионли киритиш, диффузиялаш каби технологик усуллар ҳамда морфологик тадқиқотларда электрон микроскоп, рентген таҳлили методи ва компьютерда моделлаштириш қўлланилган.

### **Тадқиқотнинг илмий янгилиги:**

вертикал *p-n*-ўтишли фотоўзгартиргич асосида фотоэлектрик энергия олиш самарадорлигини уч баробаргача ошириш имконини берувчи фотоэлектрик модулнинг янги самарадор конструкцияси яратилган;

икки томонлама сезгир фотоўзгартиргичнинг фронтал ва орқа юзасига тушувчи ёруғлик оқими зичлигини асимметрик нур қайтаргичлар ёрдамида тенглаштириш усули билан унинг фотоэлектрик самарадорлигини яхшилаш илмий асосланган ва янги фотоэлектрик модул конструкцияси яратилган;

кремний фотоўзгартиргичнинг эмиттер қатламида наноўлчамли структуралар шакллантириш орқали фотоэлектрик энергия олиш самарадорлигини ошириш имконияти кўрсатилган;

фотоўзгартиргичларни яратиш учун истиқболли  $Cu_2ZnSn(S_{1-x}Se_x)_4$  гетероструктураларни кремний тагликка олиш технологияси яратилган ва олинган намуналарнинг электрофизик ва фотоэлектрик хусусиятлари аниқланган.

### **Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:**

яратилган вертикал *p-n*-ўтишли ва икки томонлама сезгир фотоўзгартиргичлардан ташкил топган фотоэлектрик модуллар кичик қувватли маиший электрон жиҳозлар учун энергия манбаи сифатида қўлланилган;

кремний сиртида квант ўлчамли эффектлар, квант нуқталар, квант толалар ва металл нанозарраларини ҳосил қилишнинг таклиф этилган янги усуллари фотоэлектрик ўзгартиргичларнинг такомиллашувини таъминлаган;

фотоэлектрик ўзгартиргичлар учун истиқболли бўлган илк бора олинган ва характеристикалари таҳлил этилган  $Cu_2ZnSn(S_{1-x}Se_x)_4/Si$  гетероструктуралар асосида самарадор ва паст таннархли қуёш элементларини яратиш истиқболлари кўрсатилган.

**Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги** ўлчаш аниқлиги юқори бўлган асбоблардан ва яримўтказгичли асбобларнинг характеристикалари ва параметрларини текширишда стандарт ва кенг қўлланиладиган замонавий илмий ва технологик методлардан фойдаланилган, шунингдек, илмий хулосалар ва техник ечимларнинг яримўтказгичлар физикаси назарияси ва тушунчаларига мослиги билан таъминланган.

**Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.** Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти кремний асосидаги турли кўринишга эга бўлган *p-n*-гомо ва гетероструктураларда қуёш энергиясини электр энергиясига ўзгартириш жараёнларини кенгроқ тасаввур этиш, уларни квант ўлчамли эффектлардан фойдаланиш орқали янада такомиллаштириш йўллари тушунтириш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти шундан иборатки, яратилган ва таклиф этилган конструкция ҳамда усуллар янги, самарадор ва паст таннархли фотоўзгартиргичлар яшаш имконини берган. Шу орқали кам қувватли электрон маиший жиҳозларни энергия билан таъминлаш имонияти яратилган.



**Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши.** Кремний негизидаги структураларда фотоэлектрик энергия ўзгартириш самарадорлигини ошириш, фотоэлектрик конструкциялар ва структуралар олиш асосида:

вертикал *p-n*-ўтишли фотоўзгартиргич асосидаги «Фотоэлектрик модул»га Ўзбекистон Республикаси Интеллектуал мулк агентлигининг ихтирога патенти олинган (№ IAP 04720, 2013 йил 5 май). Ишлаб чиқилган конструкция фотоэлектрик энергия олиш самарадорлигини уч баробаргача ошириш имконини берган;

ёруғлик оқими зичлигини асимметрик нур қайтаргичлар ёрдамида тенглаштириш асосида «Куёш генератори»га Ўзбекистон Республикаси Интеллектуал мулк агентлигининг фойдали моделга патенти олинган (№ FAP 01021, 2015 йил 2 июнь). Ишлаб чиқилган генератор фотоэлектрик энергия олиш самарадорлигини ошириш имконини берган;

кремний сиртида нанотекстураланган муҳит ҳосил қилиш орқали квант ўлчамли эффектлар олиш бўйича техник ечим ОТ-Ф-2-28- рақамли «Легирланган кремний сирти ва ҳажмидаги квант ўлчамли эффектлар ҳамда уларнинг *p-n*-структуралардаги заряд ташувчилар фотогенерация ва рекомбинация жараёнларига таъсири» фундаментал тадқиқот лойиҳасида фотосезгирлиги юқори структуралар олишда фойдаланилган (Олий ва ўрта махсус таълим вазирлигининг 2018 йил 16 мартдаги №89-03-1048 маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш *p-n*-структуралардаги заряд ташувчилар фотогенерациясининг самарали стимулланишини таъминлаган.

**Диссертация ишининг натижалари** 5 та халқаро ва 7 та Республика миқёсидаги конференцияларда маъруза қилинган ва муҳокамадан ўтказилган.

**Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши.** Диссертация мавзуси бўйича жами 25 та илмий иш чоп этилган, шулардан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 7 та мақола нашр этилган.

1 та ихтиро патенти, 1 та фойдали моделга патент ва 2 та ЭХМ учун дастурий маҳсулотга ИМАнинг гувоҳномалари олинган.

**Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши.** Диссертация кириш, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертация матни 105 бетда ифодаланган.

## ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

**Кириш** қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати асосланган, тадқиқотнинг Республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, мавзу бўйича хорижий илмий тадқиқотлар шарҳи, муаммонинг ўрганилганлик даражаси келтирилган, тадқиқот мақсади, вазифалари, объекти ва предмети тавсифланган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён

қилинган, олинган натижаларнинг назарий ва амалий аҳамияти очиб берилган, тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар берилган.

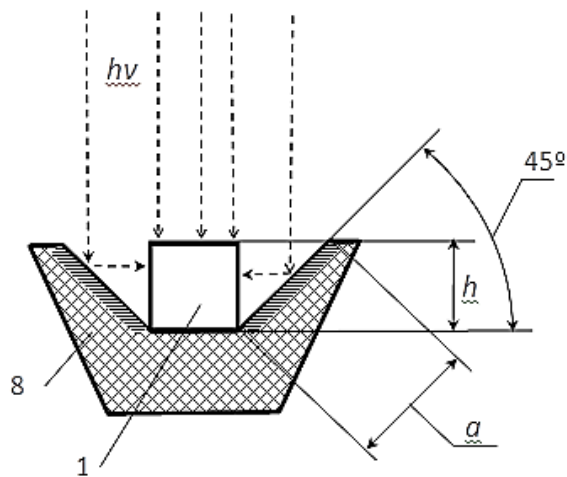
Диссертациянинг «**Яримўтказгичли структураларда фотоэлектрик энергия ўзгартириш ва улар эффективлигининг чегараланиш сабаблари**» деб номланган биринчи бобида яримўтказгичлар, хусусан, кремний структуралари асосидаги фотоэлектрик энергия ўзгартиргичларнинг аҳамияти, улар ишлашининг физик асослари ва тайёрлашнинг турли асосий методлари бўйича адабиётлар таҳлили келтирилган. Кремний асосли фотоўзгартиргичларнинг фотогенерацияланувчи заряд ташувчиларнинг рекомбинациясини камайтириш ҳамда янги истиқболли инновацион ёндашув орқали уларнинг самарадорлигини ошириш масалалари баён қилинган. Тадқиқотнинг вазифалари шакллантирилган.

Диссертациянинг «**Кремний негизидаги қуёш элементлари ва фотоэлектрик модулларининг янги конструкцияларини асослаш ва яратиш**» деб номланган иккинчи бобида кремний негизидаги структураларда қуёш нурининг ютилиш кўрсаткичи таҳлил этилган бўлиб, келиб тушаётган қуёш нури кенгрок диапазонда қабул қилиш, тушаётган ёруғлик оқими зичлигини ошириш ва фотогенерацияланувчи заряд ташувчиларнинг рекомбинацияланиш даражасини камайтириш орқали самарадор фотоэлементлар ҳамда фотоэлектрик модул (ФМ)ларнинг янги конструкцияларини яратишга доир тадқиқотлар олиб борилган.

Қуёш нури электр энергиясига ўзгартириш учун горизонтал ва вертикал *p-n*-ўтишли қуёш элементларининг турли конструкцияларидан фойдаланилади. Вертикал *p-n*-ўтишни кўллаган ҳолда горизонтал *p-n*-ўтишга нисбатан заряд кўчиш жараёнларида юз берадиган ҳодисалар, хусусан, электрон-ковак жуфтликларнинг фотогенерацияланиши ва рекомбинацияланиши кремний чуқурлигига боғланган тарзда таҳлил этилган.

Вертикал *p-n*-ўтишли ФМнинг янги конструкцияси яратилди (1-расм). Ҳар бир микро фотоўзгартиргичнинг *p*- ва *n*- қатламларига яхлит омик контакт қоплаш йўли билан ҳажмий ва сиртий рекомбинацияни камайтириш ҳисобига кремний ҳажмида ёруғликнинг кенгрок оптик спектри ўзлаштирилиши натижасида фотогенерацияланувчи заряд ташувчиларни йиғиш эффективлиги оширилган.

Ишлаб чиқарилаётган фотоэлектрик энергия бирлигига нисбатан қимматбаҳо кремний моддасининг сарфи деярли уч марта иқтисод қилиниши



ҳисобига ҳам энергетик, ҳам иқтисодий жиҳатдан самарадор иккиёқлама ва учёқлама сезгир ФМ яратиш имкониятлари кўрсатилган ва илмий исботланган<sup>1</sup>.

Яратилган ФМнинг асосий фотоэлектрик характеристикалари унга ўхшаш анъанавий ФМлар билан солиштириб таҳлил этилган.

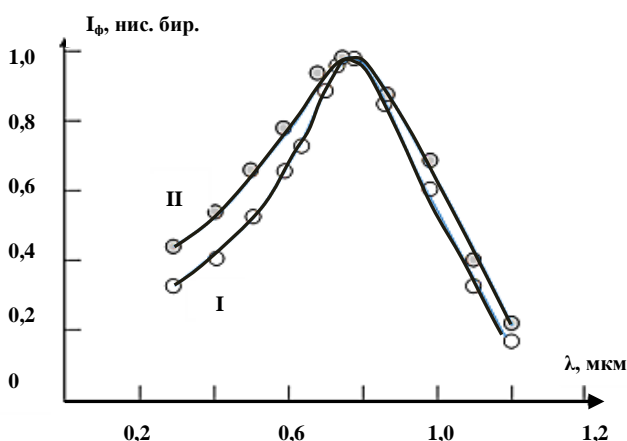
Солиштириш натижасида янги яратилган модулнинг фотоэлектрик кўрсаткичлари деярли уч баробар ортганлиги аниқланган ва қимматбаҳо кремний моддасининг сарфини бошқа шу каби ФМларникига нисбатан уч баробарга иқтисод қилишга эришилган (1-жадвал).

1-жадвал

Яратилган уч томонлама ёритилганликка эга фотоэлектрик модуль (1-қатор) ва анъанавий бир томонлама ёритилганликка эга фотоэлектрик модуль (2-қатор) нинг асосий параметрлари

№	Намуналарнинг ўлчамлари (мм <sup>2</sup> )	Микро-фотоўзгартиргичлар блокларининг ўлчами (мм <sup>2</sup> )	Блоклардаги микрофотоўзгартиргичларнинг сони (дона)	Фототок қ.т., $J_{кт}$ (мкА/см <sup>2</sup> )	Салт иши кучланиши, $U_{си}$ (В)	Чиқиш қуввати (мВт/см <sup>2</sup> )	Кремний моддасининг сарфи (кг/Вт)
1	10×3×2	10×1×1	26	232	13,5	3,1	4,9
2	10×3×2	10×1×1	26	79,5	13,5	1,1	14,9

Структуранинг ультрабинафша ва яқин инфрақизил нур спектрал диапазонида фотосезгирлигининг ортиши асосан *p-n*-ўтишнинг вертикаллиги, яъни тегишли энергияли фотонларнинг кремний чуқурлиги бўйича ютилиши, фотогене-рацияланган заряд ташувчи-ларнинг самарали йиғилиши туфайли эришилганлиги илмий асосланган (2-расм).



2-расм. ФМнинг спектрал хариристикаси: анъанавий ФМ (I), тадқиқот натижасида яратилган ФМ (II)

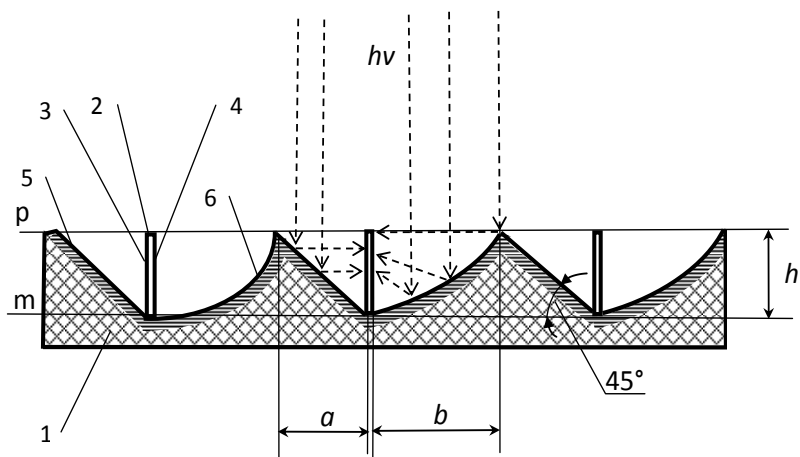
Икки томонлама сезгир фотоўзгартиргичларнинг ҳар икки ишчи юзасига келиб тушаётган ёруғлик оқимини махсус асимметрик нур қайтаргичлар ёрдамида тенглаштириш натижасида унинг фотоэлектрик хусусиятларининг яхшиланишига асосланиб, улар асосида ФМнинг янги самарадор конструкцияси яратилган<sup>2</sup>.

Икки томонлама сезгир фотоўзгартиргичлар асосидаги

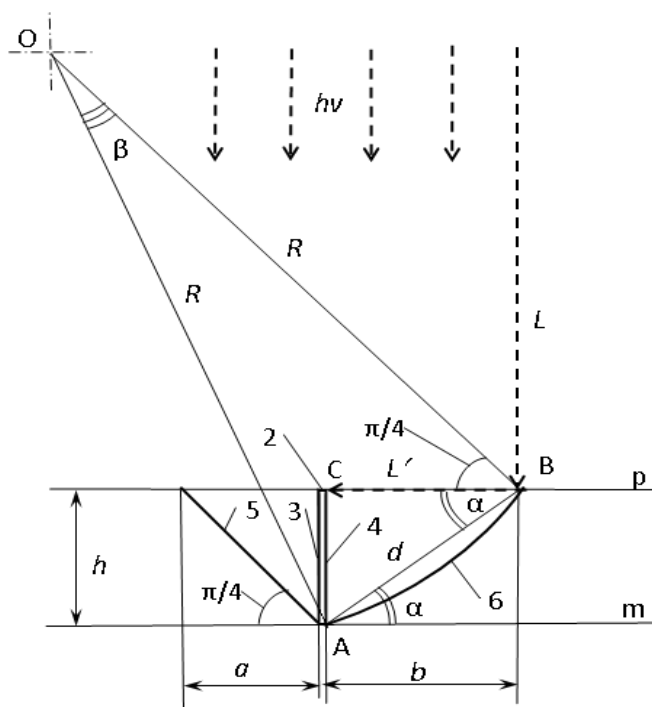
<sup>1</sup>Р.Алиев, Э.Мухторов, С.Алиев. Фотоэлектрик модул, ЎзР патенти № IAP 04720, 10.05.2013 й.

<sup>2</sup>Р.Алиев, Х.Мансуров, С.Алиев. Куёш генератори, ЎзР патенти № FAP 01021, 02.06.2015 й.

ФМда ҳар бир алоҳида фотоўзгартиргичларнинг орқа ишчи юзасига тушаётган ёруғлик оқими махсус сферо-цилиндрик юзага эга нур қайтаргичлар ёрдамида йўналтирилган. Фотоўзгартиргичнинг олд ва орқа ишчи юзаларида ҳосил бўлган фототоклар қийматининг тенглашиши таъминланган ҳамда шунинг ҳисобига ФМнинг умумий фотоэлектрик кўрсаткичларининг ортиши кузатишган (3-расм).



3-расм. ФМ схемасининг ён кесими



4-расм. Сферо-цилиндрик сиртга тушган нур қайтишини ҳисоблашга доир чизма

Сферо-цилиндрик шаклдаги нур қайтаргични танлашда унинг эгрилик радиусини аниқлаш муҳим аҳамиятга эга. Уни ҳисоблаш учун 4-расмдаги чизмага мурожаат қилинади ва қуйидагича  $tg\alpha = h/b$ ;  $d^2 = b^2 + h^2$ ;  $\beta = \pi - 2(\alpha + \pi/4) = \pi/2 - 2\alpha$ ;  $d^2 = R^2 + R^2 - 2R^2 \cos\beta$  муносабатларга

таянган ҳолда математик алмаштиришлар орқали сферо-цилиндрик сиртнинг эгрилик радиуси учун янги ифода олинади:

$$\begin{aligned} 2R^2 &= (b^2 + h^2)/(1 - \cos \beta) = (b^2 + h^2)/(1 - \sin 2\alpha) = \\ &= (b^2 + h^2)/(1 - 2tg\alpha/(1 + tg^2\alpha)) = (b^2 + h^2)/(1 - 2h/b(1 + h^2/b^2)) = \\ &= (b^2 + h^2)/((1 - 2bh)/(b^2 + h^2)) = (b^2 + h^2)^2/(b - h)^2, \end{aligned}$$

Эгрилик радиуси учун якуний ифода қуйидагича бўлади:

$$R = (b^2 + h^2)/\sqrt{2}(b - h),$$

бу ерда  $b$  – сферо-цилиндрик юзага эга нур қайтаргичнинг асосга нисбатан энининг кенглиги,  $h$  – фотоўзгартиргичнинг баландлиги.

Яратилган ФМда махсус конструкция асосида икки томонлама сезгир фотоэлементларнинг олд ва орқа ишчи юзаларида ҳосил бўлаётган фототок қийматларининг, фотоўзгартиргичнинг орқа томонига тушаётган ёруғлик оқимининг кучайтирилиши ҳисобига тенглаштирилиши ҳамда бунинг натижасида ФМнинг умумий фотоэлектрик кўрсаткичларининг ортанлиги тажриба ўлчашларида ва ҳисоблашларда кўрсатиб берилган.

Диссертациянинг «**Яримўтказгичларнинг юпқа қатламларида нанотекстуралаш ва квант ўлчамли эффектлар ҳосил қилиш орқали фотонларнинг ютилиш самара-дорлигини ошириш**» деб номланган учинчи бобида яримўтказгичлар юзаларида нанотекстуралар ва квант ўлчамли эффектлар ҳосил қилишнинг аҳамияти, истикболлари, улар ёрдамида фотоўзгартиргичлардаги ёруғлик ютилиш самарадорлигини ошириш ҳамда кремний сиртида квант нуқталар ва металл нанозарраларини ҳосил қилиш усуллари тадқиқ этилган.

Кремний фотоўзгартиргичнинг эмиттер қатламида наноўлчамли структуралар шакллантиришнинг янги усуллари таклиф этилган ҳамда мазкур усуллар ёрдамида тажрибалар ўтказиш тартиби ёритилган<sup>3</sup>.

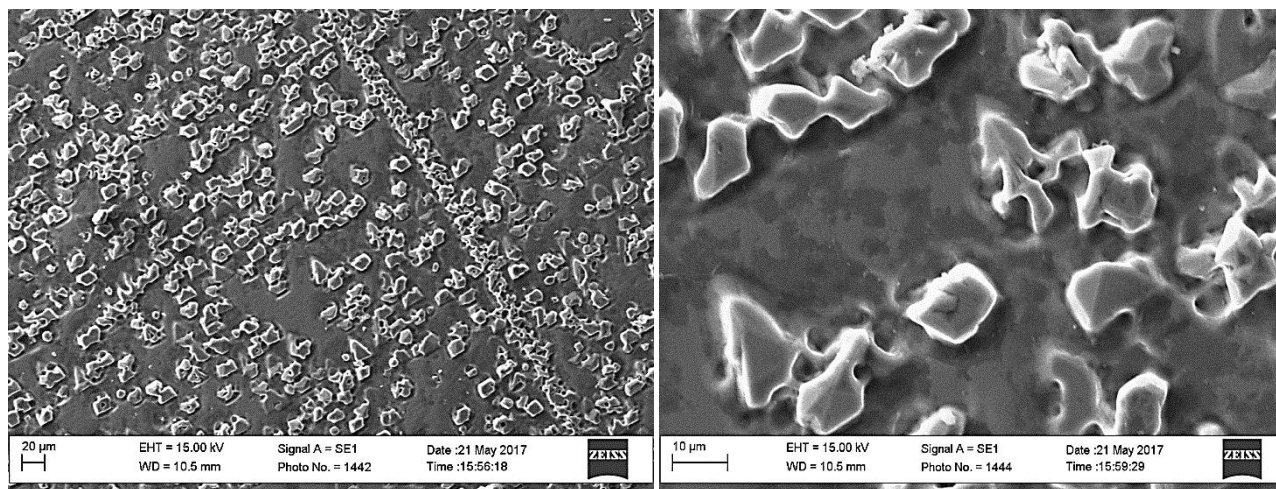
Биринчи усул ионлар билан нурлантириш орқали кремний юзасида квант нуқталар ва квант толалар ҳосил қилишдан иборатдир. Бу усулда танлаб олинган кремний асосидаги фотоўзгартиргич юзаси махсус панжара орқали энергияси 5 КэВ га тенг бўлган  $B^+$  (бор) ионлари билан нурлантирилган ва кейин 400÷600 °С ҳароратда термик ишлов берилган. Сўнг намуналарга кимёвий емириш йўли билан ишлов берилган ва нур қайтишига қаршилиқ қилувчи қатлам қопланган ҳамда ўтказилган тажрибалардан кейин намуналарнинг сирти таҳлил этилган. Натижада намуналар сиртида квант нуқталар ва квант толалар ҳосил бўлганлиги тасдиқланган (5-расм).

Тажрибалар натижасида олинган намуналарнинг фотоэлектрик характеристикалари таҳлил қилинган. Таҳлилларда фотоўзгартиргич сиртида наноўлчамли структуралар шакллантирилиши ҳисобига намуналарнинг сиртидан нур қайтиш кўрсаткичи 25÷30 % га пасайганлиги ва қўшимча

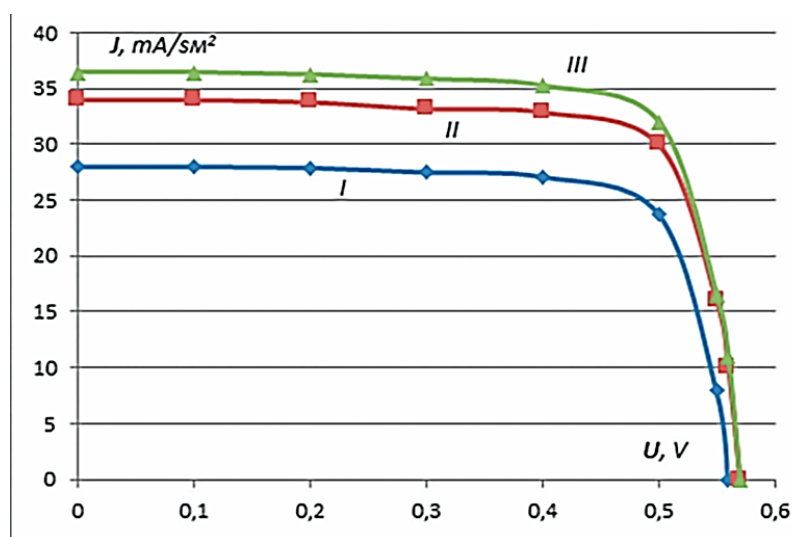
---

<sup>3</sup>С. Алиев, К. Адамбаев, Р. Алиев. Улучшение оптических свойств наноструктурированием поверхности пленочного кремния, предназначенного для изготовления фотоэлектрических преобразователей энергии // Петербургский журнал электроники, 2017, № 1 (86), стр. 18-22.

тарзда нур қайтишига қарши қатлам ҳисобига фототок қийматининг 10÷15 % га ортганлиги тасдиқланган (6-расм).



**5-расм.** Намуналар юзаснинг ионлар билан нурлантириш тажрибаларидан кейинги микросуратлари



**6-расм.** Фотоўзгартиргичнинг ВАХси: I – нур қайтишига қарши оптик қатламсиз намуна; II – нур қайтишига қарши оптик қатламли ( $SiO_2$ ) намуна; III – наноўлчамдаги структуралар ва нур қайтишига қарши оптик қатлами шакллантирилган намуна

Навбатдаги усулда, нанотекстураланган кремний фотоўзгартиргичларининг сиртига металл нанозаррачлари киритилган. Ушбу усулда ўтказилиши керак бўлган тажрибалар кетма-кетлиги қуйидагича:

кимёвий емириш йўли билан кремний сиртида пирамидали текстуралар ҳосил қилиш;

фосфорни диффузиялаш;

юпқа диэлектрик қатлам билан қоплаш;

пластинкани  $6\div 13^\circ$  бурчак остида жойлаштириб, вакуум шароитида пирамидаларнинг учига чанглантириш усули билан металл нанозарраларини ўтиргизиш;

омик контакт ва нур қайтишига қарши қатлам қоплаш.



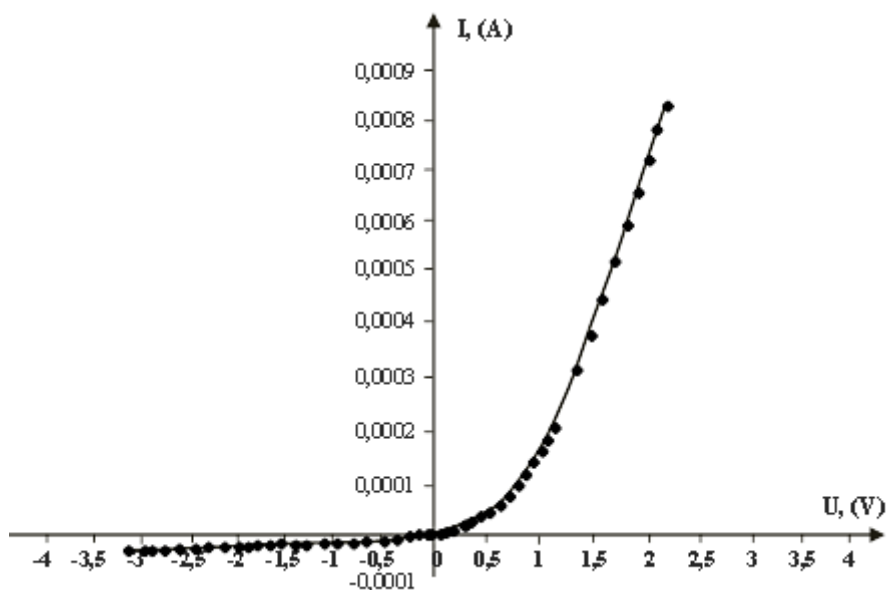
Шу тартибда кремний сиртида металл нанозарраларини шакллантириш орқали структураларда фотоэлектрик энергия олиш самарадорлигини ошириш имконияти назарий жиҳатдан тасдиқланган.

Диссертациянинг «Кремний ва  $Cu_2ZnSn(S_{1-x}Se_x)_4$  асосда гетероструктуралар олиш ва хусусиятларини тадқиқ қилиш» деб номланган тўртинчи боби самарадор фотоўзгартиргичларни яратиш учун истиқболли ҳисобланган кенг зонали ва паст таннархли янги материаллар ҳамда структуралар олиш ҳамда уларнинг электрофизик ва фотоэлектрик хоссаларини ўрганишга бағишланган. Унда кремний тагликда  $S/Se$  моддаларининг оптимал муносабатларига эга  $Cu_2ZnSn(S_{1-x}Se_x)_4$  гетероструктураларни олишнинг технологик усули ва янги қатламларнинг асосий характеристикалари баён этилган.

$p-Cu_2ZnSn(S_{1-x}Se_x)_4/n-Si$  анизотип гетероструктураларни олиш икки босқичда амалга оширилган бўлиб, биринчи босқичда  $n$ -типли поликристалл кремний асосга  $(3\div 5)\times 10^{-5}$  мм.сим.уст. даражадаги вакуумда,  $250\div 400$  °С ҳароратда мис ( $Cu$ ), рух ( $Zn$ ) ва қалай ( $Sn$ ) металл қатламлари навбати билан чанглантириш йўли орқали ўтиргизилди.

Иккинчи босқичда ёпиқ ампулада селенлаштириш-сулфидлаштириш жараёни ўтказилди. Бунинг учун  $(1\div 3)\times 10^{-5}$  даражагача вакуум ҳосил қилинган кварц ампулага биринчи босқичда олинган намуналар билан биргаликда олтингугурт ( $S$ ) ва селен ( $Se$ ) моддалари жойлаштирилди ҳамда ампула қиздирилди. Қиздириш жараёни  $580\div 600$  °С ҳароратда  $50\div 70$  дақиқа оралиғида давом эттирилди. Қиздириш якунланганидан сўнг ампула совуғач, намуналар ампуладан олинди. Шу тариқа поликристалл кремний асосга  $Cu_2ZnSn(S_{1-x}Se_x)_4$  гетероструктура олинган.

Олинган  $p-Cu_2ZnSn(S_{1-x}Se_x)_4/n-Si$  анизотип гетероўтишларнинг электрофизик хусусиятлари таҳлил этилган. Қоронғуликдаги ВАХ гетероўтишнинг яққол диод характеристикасига эга эканлигини кўрсатди (7-расм).



7-расм. Гетероўтишнинг ёритилмаган ҳолдаги вольт-ампер характеристикаси

ВАХдан фойдаланиб  $p\text{-Cu}_2\text{ZnSn}(S_{1-x}\text{Se}_x)_4/n\text{-Si}$  гетероўтишлар назарий таҳлил этилди ва гетероўтишлар орқали ток ўтиш механизми аниқланди. Унга кўра, тўғри кучланишларда ( $3kT/e < V < 0,7$  В) ток оқишининг туннель-рекомбинацион механизми, кучланиш ортиши билан ( $V > 0,8$  В) ток оқишининг туннель механизми ва тескари кучланишларда эса бирқийматли туннель механизмининг амал қилиши аниқланди.

Ўлчанган ВАХ шуни кўрсатадики, ҳароратнинг ортиши билан токнинг тез ўсиб бориши кузатиладиган кучланиш пасайиб боради. Бошқача айтганда, ҳароратнинг ортиши билан потенциал тўсик баландлиги камаяди.

Маълумки, потенциал тўсик баландлиги  $\varphi_k$  нинг қийматини ВАХнинг чизикли қисмини экстраполяция қилиш орқали топиш мумкин. Унинг ҳароратга боғлиқлиги  $\varphi_k(T)$  ни қуйидаги тенглама билан ифодалаш мумкин:

$$\varphi_k(T) = \varphi_k(0) - \beta_\varphi T$$

бу ерда  $\beta_\varphi = 3,2 \times 10^{-3}$  эВ/К – потенциал тўсик баландлигининг ҳароратга боғлиқлик коэффициенти;  $\varphi_k(0) = 1,55$  эВ – гетероўтишнинг абсолют ҳароратдаги потенциал барьерининг баландлиги.

Олинган натижалар, назарий таҳлиллар ҳамда математик ҳисоблашларга асосланиб,  $p\text{-Cu}_2\text{ZnSn}(S_{1-x}\text{Se}_x)_4/n\text{-Si}$  анизотип гетероўтишларнинг энергетик зоналар диаграммаси таклиф этилди.

Энергетик зонада кўрсатилган физик катталикларнинг қиймати қуйидагича:  $E_g(\text{CZTSSe}) = 1,17$  эВ,  $\chi(\text{CZTSSe}) = 4,48$  эВ,  $E_g(\text{Si}) = 1,12$  эВ,  $\chi(\text{Si}) = 4,07$  эВ,  $\Delta E_c = 0,49$  эВ,  $\Delta E_v = 0,07$  эВ,  $\varphi_0 = 0,95$  эВ.  $E_v$  – вакуум сатҳи,  $E_F$  – Ферми сатҳи,  $E_c$  и  $E_v$  – ўтказувчанлик ва валентлик зоналар чегаралари,  $\chi$  – электронга мойиллик,  $E_g$  – тақиқланган зона кенглиги.

Олинган гетероўтишларнинг фотоэлектрик хусусиятлари ҳам таҳлил этилди. Таҳлил натижасида гетероўтишларнинг фотосезгирлиги тасдиқланди. Тажрибалар натижасида олинган янги структураларнинг электрофизик ва фотоэлектрик хусусиятлари таҳлил қилинди ва улар асосида янги, паст таннархли ва самарадор фотоўзгартиргичлар яратиш имкониятлари аниқланди.



## ХУЛОСА

Кремний негизидаги структураларда фотоэлектрик энергия ўзгартириш самарадорлигини ошириш, янги самарадор фотоэлектрик конструкциялар, истиқболли кенг зонали ва экологик соф структуралар олишни тадқиқ этиш орқали куйидагича хулосалар қилинган:

1. Вертикал *p-n*-ўтишли фотоўзгартиргичлардан ташкил топган, *p* ва *n* қатламларига яхлит омик контактлар қопланиши туфайли заряд ташувчиларнинг сиртий ва ҳажмий рекомбинацияланиш даражасининг пасайтирилиши, инфрақизил нурларга шаффофлиги таъминланган ва кенг спектрал сезгирликка эга бўлишига асосланган кремний асосли структураларда номувозанатли фотогенерацияланган заряд ташувчиларни йиғиш эффе́ктивлигини оширишнинг механизми таклиф этилган.

2. Юқори кучланишли фотоэлектрик модулнинг янги конструкцияси яратилган ва унинг бошқа аналогларга нисбатан фотоэлектрик чиқиш кўрсаткичларининг деярли уч марта юқорилигига ва технологик жиҳатдан қимматбаҳо кремний сарфининг деярли уч баробар камайишига эришилган (Ихтирога патент № IAP 04720, 10.05.2013 й.).

3. Икки томонлама сезгир куёш элементларини қўллашга асосланган ва инфрақизил нурларга шаффоф ҳамда юқори кучланишли фотоэлектрик модулнинг янги конструкцияси таклиф этилган (Фойдали моделга патент № FAP 01021, 02.06.2015 й.).

4. Квант ўлчамли эффе́ктларни ҳосил қилинганлигидан самарали фойдаланишга имкон яратадиган янги конструкцияли фотоўзгартиргичлар тайёрлаш учун текстураланган кремний юзаларида текис тақсимланган металл нанозарраларини шакллантиришнинг янги ва технологик соддалаштирилган усули таклиф этилган.

5. Кремний фотоўзгартиргичнинг эмиттер қатламида наноўлчамли структуралар шакллантириш орқали фотоэлектрик энергия олиш самарадорлигини деярли 1,5 баробаргача ошириш имконияти илмий асосланган ва экспериментал тасдиқланган.

6. Илк бор фотоўзгартиргичларни яратиш учун истиқболли ҳисобланган кенг анизотип  $Cu_2ZnSn(S_{1-x}Se_x)_4/Si$  гетероструктураларни олишнинг экологик соф технологияси яратилган.

7. Лаборатория шароитида олинган *p-Cu<sub>2</sub>ZnSn(S<sub>1-x</sub>Se<sub>x</sub>)<sub>4</sub>/n-Si* анизотип гетероўтишларнинг электрофизик хусусиятлари таҳлил этилган. Ёритилмаган шароитда заряд кўчиш жараёнларини таҳлил этиш орқали *p-Cu<sub>2</sub>ZnSn(S<sub>1-x</sub>Se<sub>x</sub>)<sub>4</sub>/n-Si* гетероўтишлар орқали ток ўтиш механизмлари аниқланган: тўғри йўналишдаги кучланишларда ( $3kT/e < V < 0,7$  В) ток оқишининг туннель-рекомбинацион механизмининг, кучланишнинг янада ортиши билан ( $V > 0,8$  В) ток оқишининг туннель механизмининг ва, шунингдек, тескари йўналишдаги кучланишларда туннел механизмининг амал қилиши кузатилган.

8. Анизотип *p-Cu<sub>2</sub>ZnSn(S<sub>1-x</sub>Se<sub>x</sub>)<sub>4</sub>/n-Si* гетероўтишларнинг энергетик зоналар диаграммасининг физик модели таклиф этилган. Тақиқланган

энергетик зона кенглиги  $1,1\div 1,5$  эВ ва фотоўтказувчанлиги  $5,5\times 10^{-4}$  эВ/К бўлган ҳамда яримўтказгичли фотоэлектрик энергетикада кенг қўлланилиши мумкин бўлган янги материаллар олинган.

9. Тадқиқот давомида назарий ҳисоблашларни амалга ошириш ва натижаларни тушунтириш мақсадида илмий ва таълимий аҳамиятга молик «Физикадан виртуал тажрибалар - Фотоэлектрик модул» (Гувоҳнома № DGU 03540, 2016 й.) ва «Физикадан виртуал тажрибалар - Фотовольтаикада наноплазмоника» (Гувоҳнома № DGU 03861, 2016 й.) каби ЭҲМ учун дастурий маҳсулотлар яратилган.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.28.02.2018.FM.60.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ  
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ПРИ АНДИЖАНСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ  
УНИВЕРСИТЕТЕ**

---

**АНДИЖАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
АНДИЖАНСКИЙ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ**

**АЛИЕВ СУХРОБ РАЙИМЖОНОВИЧ**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО  
ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ В СТРУКТУРАХ НА КРЕМНИЕВОЙ  
ОСНОВЕ**

**01.04.10 – Физика полупроводников**

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD)  
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК**

**АНДИЖАН – 2018**

**Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № B2017.2.PhD/FM100.**

Диссертация выполнена в Андижанском государственном университете и Андижанском машиностроительном институте.

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

<b>Научный руководитель:</b>	<b>Юсупов Ахмед</b> доктор физико-математических наук, профессор
<b>Официальные оппоненты:</b>	<b>Мамадолимов Абдуғофур</b> доктор физико-математических наук, академик <b>Отажонов Салим Мадрахимович</b> доктор физико-математических наук, доцент
<b>Ведущая организация:</b>	<b>Ташкентский государственный технический университет</b>

Защита диссертации состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 года в \_\_\_\_ часов на заседании Научного совета PhD.28.02.2018.FM.60.01 при Андижанском государственном университете. Адрес: 170100, г. Андижан, ул. Университет, дом 129. Зал конференций Андижанского государственного университета Тел./факс: 0(374) 223-88-30; e-mail: agsu\_info@edu.uz

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Андижанского государственного университета (зарегистрирована за № \_\_\_\_). Адрес: 170100, г. Андижан, ул. Университет, дом 129. зал конференций Андижанского государственного университета. Тел./факс: 0(374) 223-88-30; e-mail: agsu\_info@edu.uz.

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

**С.Зайнабидинов**

Председатель научного совета по присуждению  
ученой степени, д.ф.-м.н., академик

**А.О. Курбанов**

Ученый секретарь научного совета по  
присуждению ученой степени, к.ф.-м.н.

**И.Н.Каримов**

Председатель научного семинара при научном  
совете по присуждению ученой степени, д.ф.-  
м.н., доцент

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

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** В настоящее время одной из важных проблем в мире, развивающихся ускоренными темпами в сфере физики полупроводников, считается повышение эффективности фотоэлектрического преобразования энергии в структурах на кремниевой основе. При этом важными задачами остаются обеспечение эффективного поглощения светового потока, падающего на поверхность фотопреобразователей; снижение скорости поверхностной и объёмной рекомбинации фотогенерированных носителей заряда; получение новых перспективных структур для высокоэффективных фотопреобразователей; изучение их электрофизических и фотоэлектрических свойств, а также исследование возможностей сокращения расхода дорогостоящего кремния.

На данный момент в мире в плане повышения эффективности фотоэлектрического преобразования энергии в структурах на кремниевой основе важными задачами научных исследований считаются следующие: определение возможностей повышения эффективности преобразования фотоэлектрической энергии за счёт снижения темпа объёмной рекомбинации фотогенерированных носителей заряда в гомо- и гетероструктурах с *p-n*-переходом на кремниевой основе; анализ возможностей обеспечения эффективного собирания фотогенерированных носителей заряда в эмиттерном слое и на фронтальной поверхности кремниевых структур за счёт применения инновационных технических решений; получение новых широкозонных и дешёвых материалов и структур, перспективных для создания эффективных фотопреобразователей и определение механизмов переноса заряда в них.

В нашей стране в приоритетных направлениях развития науки, в частности, в отрасли использования возобновляемых источников энергии получены важные результаты, направленные на повышение эффективности полупроводниковых фотоэлектрических преобразователей энергии. Согласно Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан в вопросах создания эффективных механизмов развития научно-исследовательской и инновационной деятельности, внедрения в практику научных и инновационных достижений уделяется особое внимание, в частности, исследованию повышения эффективности фотоэлектрического преобразования энергии в структурах на кремниевой основе.

Данное диссертационное исследование в определённой степени служит выполнению задач, определённых в Постановлении Президента Республики Узбекистан № ПФ-4947 от 7 февраля 2017 года «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан», Указе № УП-2772 от 13 февраля 2017 года «О приоритетных направлениях развития электротехнической промышленности в 2017-2021 годы» и Указе № УП-2789 от 17 февраля 2017 года «О мерах по дальнейшему совершенствованию организации, руководства и финансирования деятельности и научно-

исследовательской работы Академии наук», а также других нормативно-правовых актах, касающихся данной деятельности.

**Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики.** Данная исследовательская работа выполнена в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий: «III. Развитие использования возобновляемых источников энергии».

**Степень изученности проблемы.** Исследования по повышению эффективности фотопреобразователей на кремниевой основе ведутся во многих научно-исследовательских центрах и университетах передовых стран мира. В частности, научным и теоретическим основам повышения эффективности фотоэлектрического преобразования энергии в структурах различных конструкций на кремниевой основе посвящены научные исследования М.А.Гриина, В.А.Летина, В.Р.Заявлиной, Сержа Абракена, Дефиза Жан-Марко, Колетт Жан-Поль, Д.С.Стребкова и других. Благодаря их исследованиям созданы конструкции на основе горизонтального и вертикального *p-n*-переходов, двусторонне чувствительных фотопреобразователей и изучены их электрофизические и фотоэлектрические свойства.

David B. Mitzi (США), Wei Wang (США), Douglas Bishop (США), Oki Gunawan (США), Yeng Ming Lam (Сингапур), Neil S. Beattie (Великобритания) и другие зарубежные исследователи вели изыскания по получению гетероструктур на основе  $Cu_2ZnSn(S_{1-x}Se_x)_4$  (CZTSSe) и созданию на их основе эффективных фотопреобразователей. В результате исследований учёным удалось получить фотопреобразователи на основе CZTSSe, на стеклянном основании (КПД 12,6%). На данный момент, получение гетероструктур CZTSSe/Si и создание фотопреобразователей на их основе остаётся перспективной и актуальной задачей.

В научных работах узбекских учёных академика М.С.Саидова и Б.М.Абдурахманова указаны высокоэффективные фотопреобразователи для концентраторных систем. В трудах академиков Р.А.Муминова, М.Н.Турсунова и других учёных приведён теоретический и экспериментальный исследований фотопреобразователям различных конструкций и изучены их фотоэлектрических свойств.

А.Юсуповым и его группой получены гетероструктуры CZTSSe  $Cu_2ZnSnS_4$  (CZTS),  $Cu_2ZnSnSe_4$  (CZTSe) на различных подложках и исследован их электрофизические свойства.

**Связь исследования с планами научно-исследовательских работ высшего учебного заведения, где выполняется диссертация.** Диссертационная работа выполнена в рамках фундаментального исследовательского проекта № ОТ-Ф-2-28. «Кванто-размерные эффекты на поверхности и в объёме легированного кремния и их влияние на процессы фотогенерации и рекомбинации носителей зарядов *p-n*-структур» (2012-2016 гг.), прикладного проекта № А-4-12 «Повышение эффективности кремниевых солнечных элементов путем реализации квантово-размерного

эффекта – наноплазмоники» (2015-2017 гг.), молодёжного прикладного проекта № ЁА4-ОТ-0-1936 ЁА4-6 «Разработка и испытание фотоэлектрических модулей, предназначенных в качестве источника электропитания для маломощных электронно-бытовых изделий» (2014-2015 гг.), включенных в план научно-исследовательских работ Андижанского государственного университета, а также фундаментального проекта № Ф-3-15 «Закономерности формирования и свойства структур на основе сплава  $Cu_2ZnSnSe(S)_4$ , перспективных для создания фотопреобразователей» (2012-2016 гг.), включенного в план научно-исследовательских работ Ташкентского автодорожного института.

**Целью исследования** является разработка физических механизмов и новых технических решений для повышения эффективности преобразования фотоэлектрической энергии в структурах на кремниевой основе, определение свойств перспективных широкозонных и экологически чистых структур.

**Задачи исследования:**

изучение возможности повышения эффективности преобразования фотоэлектрической энергии за счёт снижения рекомбинационных потерь фотогенерированных носителей заряда в *p-n*-гомо- и гетероструктурах на кремниевой основе;

реализация новых эффективных технических решений с учётом эффективного собирания фотогенерированных носителей заряда в структурах с вертикальным *p-n*-переходом и в условиях двустороннего освещения;

изучение возможности повышения эффективности собирания фотогенерированных в эмиттерном слое и на фронтальной поверхности носителей заряда в кремниевых структурах за счет инновационных технических решений;

получение гетероструктуру  $Cu_2ZnSn(S_{1-x}Se_x)_4/Si$  с оптимальным соотношением *S/Se* для создания эффективных солнечных элементов и определение их основных характеристик.

**Объектами исследования** являются кремниевые фотоэлектрические преобразователи различных конструкций и гетероструктуры  $CZTSSe/Si$ .

**Предметами исследования** являются закономерностей переноса заряда и фотоэлектрические процессы, наблюдаемые в фотопреобразователях с горизонтальным и вертикальным *p-n*-переходами на основе кремниевых структур и в гетероструктурах  $Cu_2ZnSn(S_{1-x}Se_x)_4/Si$ , с оптимальным соотношением *S/Se*.

**Методы исследования.** В работе были применены методы измерения спектральных, вольт-амперных и вольт-емкостных характеристик структур, технологические методы ионной имплантации и диффузии примесей, термический отжиг образцов, а также методы анализа морфологии поверхности посредством электронной микроскопии, рентгенографии, компьютерного моделирования.

### **Научная новизна исследования:**

разработана новая эффективная конструкция фотоэлектрического модуля, состоящего из фотопреобразователей с вертикальным *p-n*-переходом. Существенно улучшены фотоэлектрические свойства модуля и обосновано почти трёхкратное повышение экономической эффективности;

научно обосновано повышение фотоэлектрической эффективности двусторонне чувствительного фотопреобразователя путем уравнивания плотности потока света, падающего на фронтальную и заднюю поверхностей, при помощи ассиметричных светоотражателей, и создана новая конструкция фотоэлектрического модуля;

установлено возможность повышения эффективности получения фотоэлектрической энергии путём формирования наноразмерных структур в эмиттерном слое кремниевых фотопреобразователей;

разработана технология получения гетероструктур  $Cu_2ZnSn(S_{1-x}Se_x)_4/Si$  для создания перспективных фотопреобразователей, определены электрофизические и фотоэлектрические параметры полученных гетероструктур.

### **Практические результаты исследования состоят в следующем:**

фотоэлектрические модули, состоящие из фотоэлементов с вертикальными *p-n*-переходами и двусторонней чувствительностью использованы в качестве источника энергии для маломощных бытовых электронных устройств;

предложенные новые способы формирования квантово-размерных эффектов, квантовых точек, квантовых нитей и металлических наночастиц на поверхности кремния обеспечили повысить эффективность фотоэлектрических преобразователей;

показаны перспективы создания дешёвых солнечных элементов на основе впервые полученных и перспективных для создания фотоэлектрических преобразователей  $Cu_2ZnSn(S_{1-x}Se_x)_4/Si$ -гетероструктур и исследованы их характеристики.

**Достоверность результатов исследования** обеспечена использованием стандартных, апробированных и широко применяемых высокоточных приборов, методов исследований характеристик и параметров полупроводниковых приборов, а также соответствием научных выводов и технических решений закономерностям понятиям и физики полупроводников.

### **Научная и практическая значимость результатов исследования.**

Научная значимость результатов исследования заключается в установлении возможностей повышения эффективности преобразования солнечной энергии в электрическую при помощи *p-n*-гомо и гетероструктур различного вида на кремниевой основе и их дальнейшего усовершенствования за счет реализации квантово-размерных эффектов.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что предложенные конструкции и разработанные новые методы позволяли создать эффективных и дешёвых фотоэлектрических преобразователей



энергии. Реализовано обеспечение энергией маломощного бытового электронного оборудования.

**Внедрение результатов исследования.** На основе повышения эффективности преобразования фотоэлектрической энергии в структурах на кремниевой основе, получения новых фотоэлектрических конструкций и структур:

получен патент Агентства Интеллектуальной собственности Республики Узбекистан на изобретение (№ IAP 04720, 5 мая 2013 г.) «Фотоэлектрический модуль» на основе фотопреобразователя с вертикальным *p-n*-переходом. Разработанная конструкция позволила повысить до трех раз эффективность получения фотоэлектрической энергии;

получен патент Агентства Интеллектуальной собственности Республики Узбекистан на полезную модель (№ FAP 01021, 2 июня 2015 г.) «Солнечный генератор» на основе уравнивания плотности потока солнечного излучения с помощью асимметрических отражателей;

техническое решение по реализации квантово-размерных эффектов, путём нанотекстурирования поверхности кремния, было использовано при изготовлении новых высокочувствительных фотоэлектрических структур в рамках фундаментального исследовательского проекта № ОТ-Ф-2-28 «Кванто-размерные эффекты на поверхности и в объёме легированного кремния и их влияние на процессы фотогенерации и рекомбинации носителей заряда в *p-n*-структурах» (Справка Министерства высшего и среднего специального образования РУз, №89-03-1048 от 16 марта 2018 г.). Использование научных результатов, обеспечило эффективное стимулирование фотогенерации носителей заряда в *p-n*-структурах;

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 5 международных и 7 Республиканских конференциях.

**Публикация результатов исследования.** По теме диссертации опубликовано всего 25 научных работ, из них 7 статей в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций.

Получены патенты РУз на 1 изобретение, 1 полезную модель, а также свидетельства АИС на 2 программных продукта для ЭВМ.

**Объём и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, выводов, списка использованной литературы и приложений. Текст диссертации изложен на 105 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении диссертации обоснованы актуальность и востребованность исследования; определены цель и задачи, а также объект и предмет исследования; указано соответствие приоритетным направлениям развития науки и техники Республики и изложена научная новизна, практические результаты; раскрыты теоретическая и практическая значимость результатов; приведены сведения о внедрении результатов исследования, опубликованных работах и структуре диссертации.

В первой главе диссертации «**Фотоэлектрическое преобразование энергии в полупроводниковых структурах и причины ограничения их эффективности**» приводятся литературный обзор по преобразователям фотоэлектрической энергии на основе кремниевых структур, физические основы их работы и основные методы их изготовления. Изложены вопросы снижения рекомбинации фотогенерированных носителей заряда в фотопреобразователях на кремниевой основе и повышения их эффективности путём применения новых перспективных инновационных подходов. Сформулированы задачи исследования.

Во второй главе диссертации «**Обоснование и разработка новых конструкций кремниевых солнечных элементов и фотоэлектрических модулей**» проанализировано поглощение солнечных лучей в структурах кремниевой основы, исследованы поглощение падающего луча в расширенном диапазоне, повышение плотности падающего светового потока и создание новых конструкций, эффективных фотоэлементов и фотоэлектрических модулей (ФМ) путём снижения рекомбинации фотогенерированных носителей заряда.

Для преобразования солнечной энергии в электроэнергию используются различные конструкции солнечных элементов с горизонтальным и вертикальным  $p-n$ -переходами. Проанализированы механизмы переноса заряда, процессы фотогенерация и рекомбинация электронно-дырочных пар в зависимости от глубины кремния, происходящие в структурах с вертикальным  $p-n$ -переходом в сопоставлении и горизонтальным  $p-n$ -переходом.

Разработана новая конструкция ФМ с вертикальным  $p-n$ -переходом (рис.1). Путём снижения объёмной и поверхностной рекомбинации за счёт нанесения сплошного омического контакта на всю поверхность  $p$ - и  $n$ -слоев каждого микрофотопреобразователя повышена эффективность собирания

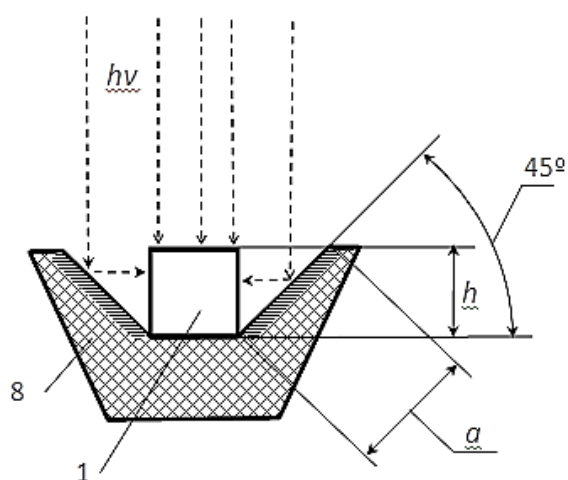


Рис. 1. Упрощённая схема ФМ

фотогенерированных носителей заряда в объёме кремния по более широкому оптическому спектру света.

Показана и научно обоснована возможность создания ФМ с двух и трехсторонне чувствительными поверхностями. Такие структуры являются более экономически эффективными за счет двух и трехкратного, соответственно снижается расход кремния за единицу производимой фотоэлектрической энергии<sup>1</sup>.

Проанализированы основные фотоэлектрические характеристики созданного ФМ в сопоставлении с его известными аналогами.

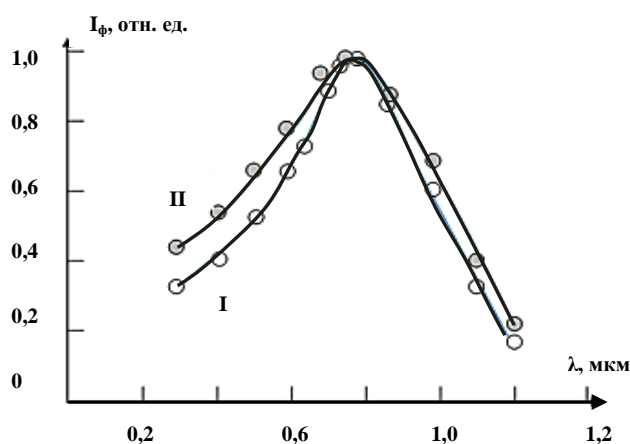
На основе сопоставления результатов с аналогами установлено, что фотоэлектрические показатели разработанного модуля значительно улучшается и при этом расход дорогостоящего кремния сокращается в 3 раза (Таблица 1).

Таблица 1.

Параметры созданного лабораторного фотоэлектрического модуля с трёхсторонним освещением (1-ряд) и традиционного фотоэлектрического модуля с односторонним освещением (2-ряд)

№ №	Параметры образцов, (мм <sup>2</sup> )	Размеры блоков микрофотопреобразователей, (мм <sup>2</sup> )	Количество микрофотопреобразователей в блоках, (штук)	Фототок к.з., $J_{кз}$ , (мкА/см <sup>2</sup> )	Напряжение х.х., $U_{хх}$ , (В)	Выходная мощность, (мВт/см <sup>2</sup> )	Расход вещества кремния, (кг/Вт)
1	10×3×2	10×1×1	26	232	13,5	3,1	4,9
2	10×3×2	10×1×1	26	79,5	13,5	1,1	14,9

Научно обосновано повышение чувствительности фотопреобразователя в ультрафиолетовом и инфракрасном диапазонах оптического спектра за счет, в основном, вертикальности *p-n*-перехода и расширения спектральной чувствительности структуры (Рис. 2).



2-расм. ФМнинг спектрал характеристики: анъанавий ФМ (I), тадқиқот натижасида яратилган ФМ (II)

В результате выравнивания потока света, падающего на обе рабочие поверхности двусторонне чувствительного фотопреобразователя за счёт вмонтированных ассимметрических светоотражателей существенно улучшены его фотоэлектрические характеристики, что способствовало создать на его основе новой

<sup>1</sup>Р.Алиев, Э.Мухторов, С.Алиев. Фотоэлектрик модул, ЎзР патенти № IAP 04720, 10.05.2013 й.

эффективной конструкции ФМ<sup>2</sup>.

Другими словами, в конструкции ФМ, состоящего из двусторонне чувствительных фотопреобразователей использованы светоотражатели, имеющие сферо-цилиндрическую поверхность для отражения потока света, падающего на заднюю рабочую поверхность фотопреобразователя. Обеспечено выравнивание фототоков, образующихся на передней и задней рабочих поверхностях фотопреобразователя, за счёт чего повышены общие фотоэлектрические показатели ФМ (Рис. 3).

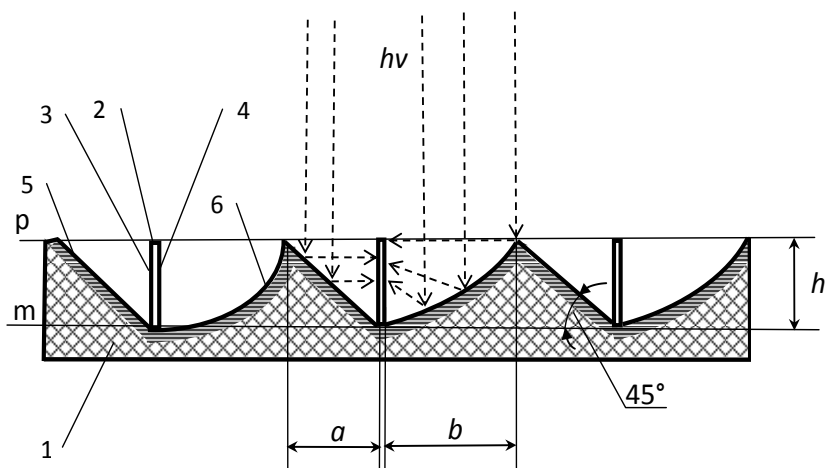


Рис. 3. Поперечное сечение упрощенной конструкции ФМ

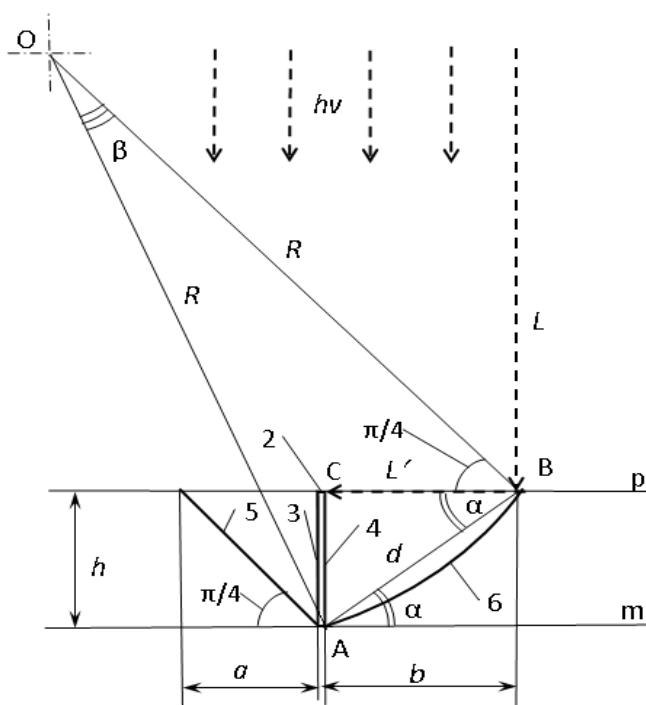


Рис. 4. Схема прохождения подающих на поверхность ФМ солнечных лучей

При выборе светоотражателя сферо-цилиндрической формы важное значение приобретает его радиус кривизны. Для определения радиуса кривизны обратимся к схеме на рисунке 4 и основываясь на соотношения

<sup>2</sup>Р.Алиев, Х.Мансуров, С.Алиев. Солнечный генератор, патент РУз № FAP 01021, 02.06.2015 г.

$tg\alpha = h/b$ ;  $d^2 = b^2 + h^2$ ;  $\beta = \pi - 2(\alpha + \pi/4) = \pi/2 - 2\alpha$ ;  $d^2 = R^2 + R^2 - 2R^2 \cos \beta$  и некоторые математические преобразования находим выражение для радиуса преломления сферо-цилиндрической поверхности:

$$\begin{aligned} 2R^2 &= (b^2 + h^2)/(1 - \cos \beta) = (b^2 + h^2)/(1 - \sin 2\alpha) = \\ &= (b^2 + h^2)/(1 - 2tg\alpha/(1 + tg^2\alpha)) = (b^2 + h^2)/(1 - 2h/b(1 + h^2/b^2)) = \\ &= (b^2 + h^2)/((1 - 2bh)/(b^2 + h^2)) = (b^2 + h^2)^2/(b - h)^2, \end{aligned}$$

Искомое выражение для радиуса преломления выглядит следующим образом:

$$R = (b^2 + h^2)/\sqrt{2}(b - h),$$

где  $b$  – ширина поперечного сечения сферо-цилиндрической поверхности светоотражателя,  $h$  – высота фотопреобразователя.

Фототок, образующийся на передней и задней рабочих поверхностях двусторонне чувствительных фотоэлементов на основе созданной конструкции, выравнивание за счёт повышения светового потока, падающего на заднюю сторону фотопреобразователя, и повышение в результате этого общих фотоэлектрических показателей ФМ, даны в измерениях и подсчётах опытов.

В третьей главе диссертации «**Повышение эффективности поглощения фотонов в тонких слоях полупроводника путем реализации нанотекстурирования и квантово-размерных эффектов**» рассмотрены значения формирования на поверхности полупроводников нанотекстуру и реализации кванто-размерных эффектов, их перспективы, возможности повышения эффективности поглощения света в фотопреобразователях, а также экспериментальные методы формирования квантовых точек и металлических наночастиц на поверхности кремния.

Предложены новые методы формирования наноразмерных структур в эмиттерном слое кремниевого фотопреобразователя и пройден порядок проведения технологических операций<sup>3</sup>.

Первый метод состоит из формирования квантовых точек и квантовых нитей на поверхности кремния посредством ионной имплантации. Поверхность выбранного кремниевого фотопреобразователя с диффузионным  $p$ - $n$ -переходом облучена через специальной металлической решётки ионами  $V^+$  с энергией 5 КэВ, затем проведена термическая обработка при температуре 400÷600 °С. Последовательно образцы подвергались химическому травлению и нанесено антиотражающее покрытие на фронтальную поверхность. В результате сформированы на поверхности образцов квантовые точки и квантовые нити (Рис. 5).

Проанализированы фотоэлектрические характеристики экспериментально полученных образцов. Установлено, что за счёт формирования наноразмерных структур на поверхности

<sup>3</sup>С. Алиев, К. Адамбаев, Р. Алиев. Улучшение оптических свойств наноструктурированием поверхности пленочного кремния, предназначенного для изготовления фотоэлектрических преобразователей энергии // Петербургский журнал электроники, 2017, № 1 (86), стр. 18-22.

фотопреобразователя показатель отражения луча снизился на 25÷30 % и дополнительно за счет нанесения антиотражающего покрытия значение фототока вырос почти на 10÷15 % (Рис. 6).

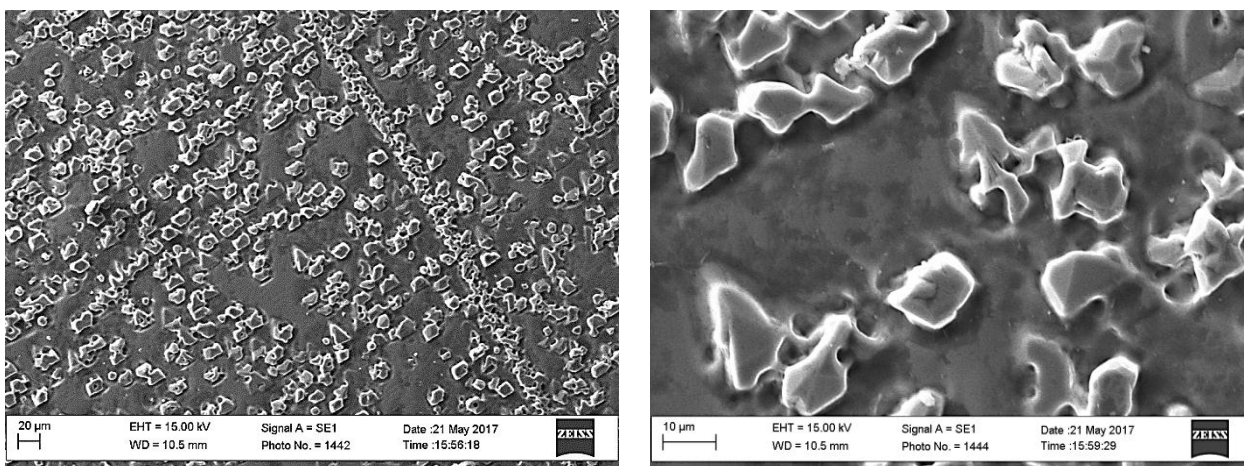


Рисунок 5. Микрофотография поверхности образцов после ионной имплантации

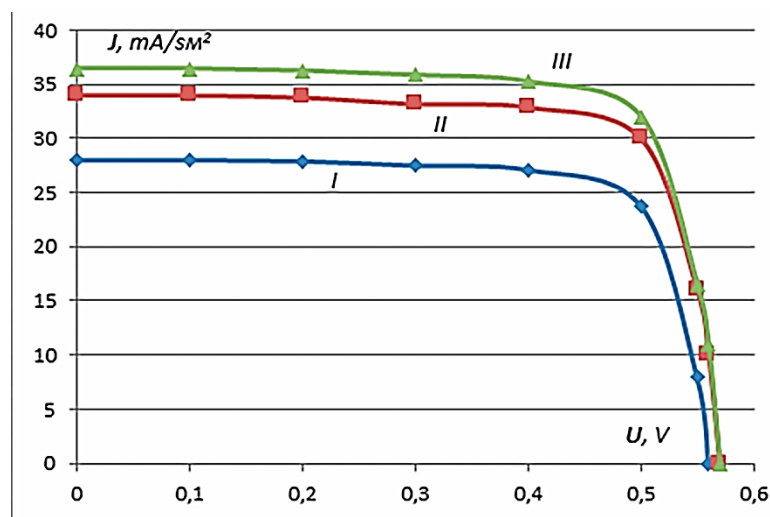


Рис. 6. ВАХ фотопреобразователя: I – образец без антиотражающего оптического слоя; II – образец с антиотражающим оптическим слоем ( $SiO_2$ ); III – образец со сформированными поверхностными нанотекстурами и антиотражающим оптическим слоем

В следующем предложенном методе на нанотекстурированную поверхность кремниевого фотопреобразователя были нанесены металлические наночастицы. Для этого проведены следующие операции:

путём химического травления на поверхности кремния формируется пирамидальные текстуры;

диффузия фосфора;

нанесение тонкого диэлектрического слоя;

нанесение металлического покрытия на поверхность пластины под углом 6÷13°;

нанесение омического контакта и антиотражающего покрытия.

Теоретически обоснована возможность повышения эффективности



фотоэлектрического преобразования энергии в структурах путём формирования металлических наночастиц на поверхности кремния, указанным выше методом.

Четвёртая глава диссертации «Получение и исследование свойств гетероструктур на основе  $Cu_2ZnSn(S_{1-x}Se_x)_4$  и кремния» посвящена получению новых широкозонных и дешёвых материалов и структур, перспективных для создания эффективных фотопреобразователей и изучению их электрофизических и фотоэлектрических свойств. Изложены технология получения гетероструктур  $Cu_2ZnSn(S_{1-x}Se_x)_4/Si$  с оптимальным соотношением веществ  $S/Se$  и основные характеристики полученных структур.

Получение анизотипных гетероструктур  $p-Cu_2ZnSn(S_{1-x}Se_x)_4/n-Si$  осуществляется в два этапа: на первом этапе на подложку из поликристаллического кремния  $n$ -типа наносятся поочерёдно металлические слои меди ( $Cu$ ), цинка ( $Zn$ ) и олова ( $Sn$ ) в вакууме (с давлением  $3\div 5 \times 10^{-5}$  мм.рт.ст.), термическим испарением, при температуре подложки  $250\div 400$  °С.

На втором этапе в закрытой ампуле производится процесс селенизации и сульфидизации. Для этого в ампулу с образцами, полученными на первом этапе помещаются вещества серы ( $S$ ) и селена ( $Se$ ) в необходимом количестве, в соответствии со стехиометрии состава. Процесс нагревания осуществляется до температуры  $580\div 600$  °С на протяжении  $50\div 70$  минут. Таким образом, была получена гетероструктура на основе  $Cu_2ZnSn(S_{1-x}Se_x)_4$  поликристаллической кремниевой подложки.

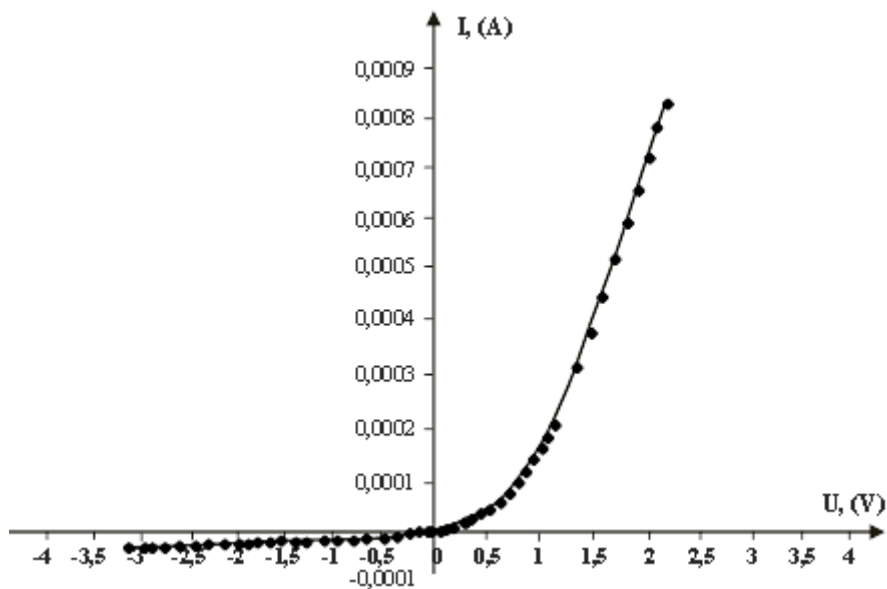


Рис. 7. Вольт-амперная характеристика в положении, где не проявляется гетеропереход

Изучены электрофизические характеристики полученных анизотипных гетеропереходов  $p-Cu_2ZnSn(S_{1-x}Se_x)_4/n-Si$ . ВАХ гетероперехода, измеренные без освещения, представляли собой явно диодные характеристики (Рис. 7).

Путем анализа ВАХ, измеренных при различных температурах, установлены механизмы прохождения тока через гетероперехода  $p-Cu_2ZnSn(S_{1-x}Se_x)_4/n-Si$ . Определены туннельно-рекомбинационный механизм

при прямом смещении ( $3kT/e < V < 0,7$  В), туннельный механизм при более высоких смещениях ( $V > 0,8$  В) и однозначный туннельный механизм при обратном направлении смещения.

Измерения ВАХ при различных температурах свидетельствовали о том, что с повышением температуры значение напряжения, соответствующего быстрому росту тока, снижается.

Иначе говоря, с повышением температуры высота потенциального барьера снижается. Как известно, величину высоты потенциального барьера  $\varphi_k$  можно определить путем экстраполяции линейной части ВАХ. Её связь с температурой  $\varphi_k(T)$  выражается следующим уравнением:

$$\varphi_k(T) = \varphi_k(0) - \beta_\varphi T,$$

где  $\beta_\varphi = 3,2 \times 10^{-3}$  эВ/К – коэффициент зависимости высоты потенциального барьера от температуры;  $\varphi_k(0) = 1,55$  эВ – высота потенциального барьера гетероперехода при абсолютной температуре.

На основе полученных результатов, анализа ВАХ и выполненных математических расчётов предложена методика диаграммы энергетических зон анизотипного гетероперехода  $p\text{-Cu}_2\text{ZnSn}(S_{1-x}\text{Se}_x)_4/n\text{-Si}$ .

При этом учтены следующие значения физических величин, указанных в энергетической зоне:  $E_g(\text{CZTSSe}) = 1,17$  эВ,  $\chi(\text{CZTSSe}) = 4,48$  эВ,  $E_g(\text{Si}) = 1,12$  эВ,  $\chi(\text{Si}) = 4,07$  эВ,  $\Delta E_c = 0,49$  эВ,  $\Delta E_v = 0,07$  эВ,  $\varphi_0 = 0,95$  эВ.  $E_v$  – вакуумный слой,  $E_F$  – слой Ферми,  $E_c$  и  $E_v$  – границы зоны проводимости и валентной зоны соответствующие,  $\chi$  – электронное сродство,  $E_g$  – ширина запрещенной зоны.

Также измерены и проанализированы фотоэлектрические характеристики полученного гетероперехода. Результаты показали достаточную хорошую фоточувствительность гетероперехода. Электрофизические и фотоэлектрические свойства полученных структур показали возможность создания на их основе дешёвых и эффективных фотопреобразователей.



## ВЫВОДЫ

В результате исследования возможности повышения эффективности фотоэлектрического преобразования энергии в структурах на кремниевой основе, получения новых эффективных фотоэлектрических конструкций, перспективных широкозонных и экологически чистых гетероструктур сформулированы следующие выводы:

1. Предложен механизм эффективного собирания фотогенерированных носителей заряда в объеме кремния за счет нанесения сплошных омических контактов на *p*- и *n*- слоях прозрачного в инфракрасной области излучения фотопреобразователя с вертикальным *n-p*-переходом, обеспечивающих условий минимальной поверхностной и объемной рекомбинации носителей заряда и высокой фоточувствительности в широком оптическом спектре солнечного излучения.

2. Разработана конструкция и обоснована возможность создания двух и трехсторонно-чувствительных фотоэлектрических модулей с улучшенными показателями за счет до 3 кратного снижения расхода дорогостоящего кремния за единицу вырабатываемой фотоэлектрической энергии (Получен патент РУз на изобретение № IAP 04720).

3. Предложена новая конструкция высоковольтного фотоэлектрического модуля, основанного на применении двусторонне чувствительных солнечных элементов, прозрачных в ИК-области (Патент на полезную модель № FAP 01021, 02.06.2015 г.).

4. Предложен новый способ формирования металлических наночастиц, равномерно распределенных на поверхности кремния, позволяющих реализовать квантово-размерных эффектов.

5. Научно обоснована и экспериментально установлена возможность повышения в 1,5 раза эффективность фотоэлектрического преобразования энергии путём формирования наноразмерных структур в эмиттерном слое кремниевого фотопреобразователя с диффузионным *p-n*-переходом.

6. Впервые получены анизотипные гетероструктуры  $p-Cu_2ZnSn(S_{1-x}Se_x)_4/n-Si$  путем сульфидизации и селенизации базовых металлических слоев, предварительно осажденных на кремниевой подложке.

7. Изучены электрические свойства анизотипных гетеропереходов  $p-Cu_2ZnSn(S_{1-x}Se_x)_4/n-Si$ . На основе анализа ВАХ установлены доминирующие механизмы переноса заряда: при прямых напряжениях ( $3kT/e < V < 0,7$  эВ) преобладают туннельно-рекомбинационные процессы с участием дефектных состояний на границе раздела гетероперехода, при увеличении напряжения ( $V > 0,8$  В) доминирует туннельный механизм Ньюмена. Обратные токи через исследуемые гетеропереходы анализировались в рамках туннельного механизма токопереноса.

8. Предложена модель энергетической зонной диаграммы гетероструктур  $p-Cu_2ZnSn(S_{1-x}Se_x)_4/n-Si$ . Показано, что полученные структуры с шириной запрещенной зоны  $1,1 \div 1,5$  эВ и фотопроводимостью  $5,5 \cdot 10^{-4}$  эВ/К могут быть использованы в качестве базового материала для эффективного

преобразования солнечной энергии в более широком диапазоне волн оптического спектра.

9. С целью осуществления теоретических расчётов и интерпретации результатов созданы имеющие научное и образовательное значение программные продукты для ЭВМ: «Виртуальные опыты по физике – Фотоэлектрический модуль» (Свидетельство № DGU 03540, 2016 г.) и «Виртуальные опыты по физике - Наноплазмоника в фотовольтанике» (Свидетельство № DGU 03861, 2016 г.).

**SCIENTIFIC COUNCIL AWARDING SCIENTIFIC DEGREE  
PhD.28.02.2018.FM.60.01 AT ANDIJAN STATE UNIVERSITY**

---

**ANDIJAN STATE UNIVERSITY  
ANDIJAN MACHINE-BUILDING INSTITUTE**

**ALIEV SUKHROB RAYIMJONOVICH**

**INCREASING THE EFFICIENCY OF PHOTOELECTRIC ENERGY  
CONVERSION IN STRUCTURES BASED ON SILICON**

**01.04.10 – Physics of semiconductors**

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

**ANDIJAN – 2018**

**The theme of dissertation of doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences was registered at the Supreme Attestation Commission of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under № B2017.2.PhD/FM100.**

Dissertation has been prepared at Fergana state university and at Andijan machine-building institute.

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

**Scientific supervisor:** **Yusupov Ahmed**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor

**Official opponents:** **Mamadolimov Abdugofur**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, academic

**Otajonov Salim Madrakhimovich**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, docent

**Leading organization:** **Tashkent State Technical University**

Defense will take place «\_\_\_\_» \_\_\_\_\_2018 at \_\_\_\_\_ at the meeting of Scientific Council number PhD.28.02.2018.FM.60.01 at Andijan state university. Address: 170100, Uzbekistan, Andijan, 129 Universitet street. Phone/fax: 0(374) 223-88-30, e-mail: agsu\_info@edu.uz.

Dissertation is possible to review in Information-resource centre at Andijan state university (is registered under №\_\_\_\_) Address: 170100, Uzbekistan, Andijan, 129 Universitet street. Phone/fax: 0(374) 223-88-30, e-mail: agsu\_info@edu.uz.

Abstract of dissertation sent out on «\_\_\_\_» \_\_\_\_\_2018  
(Registry record №\_\_\_\_\_ on «\_\_\_\_» \_\_\_\_\_2018)

**S.Z. Zaynabidinov**

Chairman of scientific council on award of scientific degree, DSc in physics and mathematics, academician

**A.O. Kurbanov**

Scientific secretary of scientific council on award of scientific degree, PhD in physics and mathematics

**I.N.Karimov**

Chairman of scientific Seminar under Scientific Council on award of scientific degree, DSc in physics and mathematics, docent

## INTRODUCTION (abstract of PhD dissertation)

**The aim of research work** is the development of physical mechanisms and new technical solutions for increasing the efficiency of photoelectric energy conversion in silicon-based structures, determining the features of promising wide-gap and environmentally pure structures.

**The object of research** is photoelectric converters of various structures and CZTSSe heterostructures on a silicon base.

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

a new efficient design of a photoelectric module consisting of photoconverters with a vertical pn junction was developed. The photoelectric properties of the module have been substantially improved and a nearly threefold increase in economic efficiency has been justified;

scientifically justified to increase the photoelectric efficiency of a two-sidedly sensitive photoconverter by balancing the flux density of light incident on the front and back surfaces with asymmetric light reflectors, and a new design of the photoelectric module is created;

the possibility of increasing the efficiency of obtaining photoelectric energy by forming nanoscale structures in the emitter layer of silicon photoconverters is established;

the technology of obtaining promising heterostructures  $Cu_2ZnSn(S_{1-x}Se_x)_4/Si$  for the creation of photoconverters was first developed the electrophysical and photoelectric properties of the obtained samples were analyzed.

**Implementation of the research results.** On the basis of increasing the efficiency of conversion of photoelectric energy in silicon-based structures, obtaining new photoelectric structures and structures:

patent of the Agency of Intellectual Property of the Republic of Uzbekistan for invention (№ IAP 04720, May 5, 2013) «Photovoltaic module» based on a photoconverter with a vertical *p-n*-junction. The developed design allowed to increase up to three times the efficiency of obtaining photoelectric energy;

patent of the Agency of Intellectual Property of the Republic of Uzbekistan for utility model (№ FAP 01021, June 2, 2015) «Solar generator» based on equalization of solar radiation flux density with the help of asymmetric reflectors;

the technical solution for the implementation of quantum-size effects by nanostructuring the silicon surface was used in the fabrication of new highly sensitive photovoltaic structures within the framework of the fundamental research project № OT-Φ-2-28 OT-Φ-2-28 «Quantum-parametric effects on the surface and in the volume of doped silicon and their influence on the processes of photogeneration and recombination of charge carriers of pn structures» (Reference Ministry of Higher and Secondary Special Education of the Republic of Uzbekistan № 89-03-1048 of March 16, 2018). The use of scientific results has ensured effective stimulation of the photogeneration of charge carriers in *p-n* structures;

**Structure and volume of dissertation.** Dissertation consists of introduction, four chapters, conclusions and a list of references. The text of the thesis is printed on 105 pages.

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

**I бўлим (I часть; part I)**

1. Aliev R., Mirzaolimov A., Aliev S. Development and Some Photovoltaic Parameters of a Silicon Solar Generator with Vertical  $p-n$  Junctions // Applied Solar Energy. USA, 2013, vol. 59, №2, p. 59-61 (01.00.00. №3).

2. Yusupov A., Adambaev K., Aliev S.R., Turaev Z.Z., Kutlimratov A / Creation and Electrical Properties of  $p-Cu_2ZnSnS_4/n-Si$  Heterojunctions // Technical Physics Letters. 2017, vol. 43, № 1, pp. 133-135 (№1 Web of Science IF:0,771).

3. Юсупов А., Адамбаев К., Тураев З.З., Алиев С.Р., Кутлимратов А. Получение и электрические свойства гетеропереходов  $p-Cu_2ZnSnS_4/n-Si$  // Петербургский журнал электроники. 2016, № 2, с. 143-147. (01.00.00. №37).

4. Юсупов А., Адамбаев К., Алиев С.Р., Тураев З.З., Кутлимратов А. Получение и некоторые свойства гетеропереходов  $p-Cu_2ZnSn(Se_{1-x}S_x)_4/n-Si$  // Узбекский Физический Журнал. – Ташкент, 2017, том 19, №1, с. 29-32 (01.00.00, №5).

5. Алиев С., Адамбаев К., Алиев Р. Улучшение оптических свойств наноструктурированием поверхности пленочного кремния, предназначенного для изготовления фотоэлектрических преобразователей энергии // Петербургский журнал электроники, 2017, №1 (86), с. 18-22 (01.00.00. №37).

6. Юсупов А., Атабаев И.Г., Адамбаев К., Алиев С.Р., Хажиев М.У. Получение и некоторые свойства гетероструктур  $ITO/Cu_2ZnSnS_4$  // ДАН РУз. 2017, №1, с. 65-68 (01.00.00. №7).

7. Адамбаев К., Алиев С.Р. Особенности формирования контакта сурьма-кремний // ДАН РУз. – 2017, №2, с. 18-23 (01.00.00. №7).

**II бўлим (II часть; II part)**

8. Алиев Р., Мухтаров Э., Алиев С. Фотоэлектрический модуль, Патент РУз № IAP 04720, 10.05.2013. – Расмий хабарнома. - 28.06.2013. - № 6.

9. Алиев Р., Мансуров Х., Алиев С. Солнечный генератор, Патент РУз на полезную модель № FAP 01021, 02.06.2015. – Расмий хабарнома. – 31.07.2015. - № 7.

10. Свидетельство АИС РУз на программный продукт для ЭВМ «Виртуальные опыты по физике Фотоэлектрический модуль», № DGU 03540, 17.02.2016.

11. Свидетельство АИС РУз на программный продукт для ЭВМ «Виртуальные опыты по физике Наноплазмоника в фотовольтаике», № DGU 03861, 21.12.2016.

12. Юсупов А., Адамбаев К., Тураев З.З., Алиев С.Р., Кутлимратов А. Механизм токопереноса в гетеропереходах  $p-Cu_2ZnSnS_4/n-Si$  // Журнал физики и инженерии поверхности. – Украина, 2016, №3, с. 126-130.

13. Юсупов А., Алиев С.Р., Алижанов Д.Д., Усмонов Ж.Н. Создание и некоторые свойства поверхностно-барьерного перехода  $Ag/Cu_2ZnSnS_4$  // Автоматика и программная инженерия. – Новосибирск, 2017, №3 (21), с. 73-76.

14. Aliev S. Obtaining and some properties of the heterojunction  $p-Cu_2ZnSnS_4/n-Si$  // Научный вестник: Машиностроение. – 2016, №2, с. 121-123.

15. Aliyev R., Mansurov H., Aliyev S. Photovoltaic modules with vertical  $p-n$ -structures and poly- $Si$  solar cells // USA-Uzbekistan Conference on Natural Sciences and Mathematics. – USA, California State University Fullerton, May 20-23, 2014, p. 16-20.

16. Yusupov A., Aliev S. Fabrication and electric properties of  $p-Cu_2ZnSn(S_{1-x}Se_x)_4/n-Si$  Heterojunctions // International engineering science and education conference. – Turkey, 01-03 December 2016, p. 87-90.

17. Aliev R, Aliev S. Improvement of the optical properties of silicon for the manufacture of photovoltaic cells for the surface nanostructuring // International Symposium «New Trends of Development Fundamental and Applied Physics: Problems, Achievements and Prospects». – Tashkent, November 10-11 2016, p. 87-89.

18. Юсупов А., Адамбаев К., Алиев С.Р., Тураев З.З., Кутлимратов А. Получение анизотипных гетеропереходов  $p-Cu_2ZnSn(Se_{1-x}S_x)_4/n-Si$  // Материалы конференции «Возобновляемые источники энергии: технологии и установки», НПО «Физика-Солнце» АН РУз им. С.А.Азимова Институт материаловедения. – Тошкент, 2016, с. 218-219.

19. Юсупов А., Адамбаев К., Алиев С.Р., Тураев З.З. О механизме токопереноса в гетероструктурах  $Cu_2ZnSn(Se_{1-x}S_x)_4/Si$  // Материалы конференции «Возобновляемые источники энергии: технологии и установки», НПО «Физика-Солнце» АН РУз им. С.А.Азимова Институт материаловедения. – Тошкент, 2016, с. 219-220.

20. Юсупов А., Алиев С.Р. Получение гетеропереходов  $Cu_2ZnSn(Se_{1-x}S_x)_4/Si$  и их электрические свойства // Международная конференция «Фундаментальные и прикладные вопросы физики». – Тошкент, 13-14 июня 2017 г., с. 104-106.

21. Юсупов А., Адамбаев К., Алиев С.Р., Тураев З.З., Кутлимратов А. Получение и некоторые свойства гетероструктур  $Cu_2ZnSn(Se_{1-x}S_x)_4/Si$  // Международная конференция «Актуальные проблемы молекулярной спектроскопии конденсированных сред». – Самарканд, 22-24 сентября 2016 г., с. 71-72.

22. Юсупов А., Алиев С.Р. Особенности получение гетеропереходов  $Cu_2ZnSn(Se_{1-x}S_x)_4/Si$  и их электрические свойства // Материалы республиканской научно-технической конференции «Актуальные проблемы энергосбережение при использования альтернативных источников энергии». – Карши, 28-29 апреля 2017 г., с. 276-278.

23. Юсупов А., Адамбаев К., Алиев С.Р. Некоторые электрические свойства гетероструктур  $ITO/Cu_2ZnSnS_4$  // Материалы республиканской



научной конференции «Современные проблемы физики конденсированного состояния – СПФКС-2016». – Бухара, 2016, с. 169-171.

24. Алиев Р., Алиев С. Разработка кремниевого солнечного генератора с вертикальными *p-n* переходами // Материалы республиканской конференции «Актуальные проблемы использования альтернативных источников энергии» – Карши, 28-29 апреля 2014, с. 83-86.

25. Алиев Р., Алиев С., Мансуров Х., Курбанов А. Расчет параметров солнечной батареи при различных комбинациях последовательного и параллельного соединения солнечных элементов // «Микроэлектроника, нанозарралар физикаси ва технологиялари» мавзусидаги Республика илмий-техник конференцияси материаллари. – Андижон, 2015 йил 4-5 декабрь, 60-62 б.

Авторефератнинг ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги нусхалари  
Андижон давлат университетининг «Илмий хабарнома – Научный вестник»  
журнали тахририятида тахрирдан ўтказилди.  
(16.04.2018 йил)

Босишга рухсат этилди: 1.05.2018 йил.  
Бичими 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>, «Times New Roman»  
гарнитурда рақамли босма усулида босилди.  
Шартли босма табағи 2,7. Адади: 100. Буюртма: № 150.

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

«АКАДЕМИЯ НОШИРЛИК МАРКАЗИ»  
Давлат унитар корхонасида чоп этилди.