

**ФАРҒОНА ПОЛИТЕХНИКА ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ
ФИЗИКА- МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА
ДОКТОРИ ИЛМИЙ ДАРАЖАСИНИ БЕРУВЧИ
PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

АНДИЖОН ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

ЗИЁИТДИНОВ ЖАХОНГИР НОРБОЕВИЧ

**МОНО- ВА ПОЛИКРИСТАЛЛ КРЕМНИЙ АСОСИДАГИ
p-n-СТРУКТУРАЛАРНИНГ ФОТОЭЛЕКТРИК
ХАРАКТЕРИСТИКАЛАРИГА ҲАРОРАТНИНГ ТАЪСИРИ**

01.04.07 – Конденсирланган ҳолат физикаси

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

Фарғона – 2022

**Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (Phd)
диссертация автореферати мундарижаси**

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

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

Зиёитдинов Жахонгир Норбоевич

Моно- ва поликристалл кремний асосидаги $p-n$ -структураларнинг
фотоэлектрик характеристикаларига ҳароратнинг таъсири 3

Зиёитдинов Жахонгир Норбоевич

Влияние температуры на фотоэлектрические характеристики $p-n$ -
структур на основе моно- и поликристаллического кремния 25

Ziyoitdinov Jakhongir Norboyevich

Influence of temperature on the photoelectric characteristics of $p-n$ structures
based on mono- and polycrystalline silicon..... 47

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ

List of published works 51

**ФАРҒОНА ПОЛИТЕХНИКА ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ФИЗИКА-
МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАСИНИ БЕРУВЧИ PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 РАҚАМЛИ
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

АНДИЖОН ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

ЗИЁИТДИНОВ ЖАХОНГИР НОРБОЕВИЧ

**МОНО- ВА ПОЛИКРИСТАЛЛ КРЕМНИЙ АСОСИДАГИ
p-n-СТРУКТУРАЛАРНИНГ ФОТОЭЛЕКТРИК
ХАРАКТЕРИСТИКАЛАРИГА ҲАРОРАТНИНГ ТАЪСИРИ**

01.04.07 – Конденсирланган ҳолат физикаси

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

Фарғона – 2022

Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2021.3.PhD/FM282 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Андижон давлат университетида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифасида (www.ferpi.uz) ва «ZiyoNet» ахборот-таълим порталида (www.ziyounet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:

Алиев Райимжон

техника фанлари доктори, профессор.

Расмий оппонентлар:

Имамов Эркин Зуннунович

физика-математика фанлари доктори, профессор.

Расулов Акбарали Махаматович

физика-математика фанлари доктори, профессор.

Етакчи ташкилот:

**ЎзРФА “Физика-Қуёш” ИИЧБ қошидаги
Физика-техника институти**

Диссертация ҳимояси Фарғона политехника институти ҳузуридаги фалсафа доктори илмий даражасини берувчи PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2022 йил «___» _____ соат _____ даги мажлисида бўлиб ўтади. Манзил: 150107, Ўзбекистон, Фарғона шаҳри, Фарғона кўчаси, 86-уй. Тел.: (99873) 241-13-03. Факс: (99873) 241-12-06; e-mail: uzferfizika@mail.ru, Фарғона политехника институти мажлислар зали.

Диссертация билан Фарғона политехника институтининг ахборот-ресурс маркази илмий-услубий бўлимида танишиш мумкин. (_____ рақам билан рўйхатга олинган). Манзил: 150107, Фарғона шаҳри, Фарғона кўчаси, 86-уй. Тел.: (99873) 241-13-03.

Диссертация автореферати 2022 йил «___» _____ куни тарқатилди.
(2022 йил «___» _____ даги _____ рақамли реестр баённомаси)

Н.Х.Юлдашев

Фалсафа доктори илмий даражасини берувчи
Илмий Кенгаш раиси, ф-м.ф.д., профессор.

Б.З.Полвонов

Фалсафа доктори илмий даражасини берувчи
Илмий Кенгаш илмий котиби, физика-
математика фанлари бўйича фалсафа доктори,
доцент.

Р.Я.Расулов

Фалсафа доктори илмий даражасини берувчи
Илмий Кенгаш қошидаги Илмий семинар раиси,
ф-м.ф.д., профессор.

КИРИШ (докторлик (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳон миқёсида қўшимча энергия манбаларига бўлган талабнинг доимий ўсиши ва глобал экологик муаммоларнинг кескинлашиши қайта тикланувчи энергия манбаларининг жадал қўлланишини талаб қилмоқда. Бунда экологик тоза қайта тикланувчи энергия манбалари ҳисобланган яримўтказгичли фотоэлектрик энергия ўзгартиргичларнинг самарадорлигини ошириш, фотоўзгартиргич юзасига тушаётган ёруғлик оқимининг самарали ютилишини таъминлаш, фотогенерацияланган заряд ташувчиларнинг сиртий ва ҳажмий рекомбинациясини камайтириш, юқори самарали фотоэлектрик энергетик қурилмалар учун истиқболли янги структуралар олиш, уларнинг электрофизик ва фотоэлектрик хоссаларини ўрганиш ҳамда фотоэлектрик энергия манбаларидан фойдаланишнинг ўзига хос имкониятларини тадқиқ этиш муҳим вазифалардан бўлиб келмоқда.

Бугунги кунда жаҳоннинг кўплаб давлатларидаги етакчи илмий марказларда фотоэлектрик энергия манбаларини яратиш ва такомиллаштиришда яримўтказгичли кремнийнинг турли кўринишлари асосида тайёрланган қуёш элемент(ҚЭ)ларини қўллашга катта эътибор қаратилмоқда. Бу борада мақсадли илмий тадқиқотлар, жумладан иссиқ иқлимли минтақаларда ҚЭларини концентраторсиз ишлатиш муаммосини ечиш; кремнийли ҚЭлари асосий фотоэлектрик параметрларининг температуравий коэффицентлари кремний моддасига, *p-n*-ўтиш сифатига, контакт электродларнинг барқарорлигига ва нур қайтаришга қарши қатлам сиртининг сифатига боғлиқ равишда бир-бирларидан кескин фарқ қилганликлари учун кремнийли ҚЭларини совитиш бўйича техник ечимлар ишлаб чиқиш; иккинчи ва учинчи авлод ҚЭларида асосий фотоэлектрик параметрларнинг температуравий коэффицентларига сезиларли таъсир кўрсатувчи сиртий ва ҳажмий инновацион оптик тутқичларни қўллаш; учинчи авлод ҚЭларида наноплазмоника эффектидан фойдаланишда кремний сиртига турли металлларнинг нанозарраларини киритиш; ҳажмида ва сирти яқинида металл нанозарралари бўлган ҚЭларининг асосий фотоэлектрик параметрларининг температура таъсирида ўзгаришини билиш муҳим вазифалар ҳисобланади.

Республикамизда фаннинг устувор йўналишларида, жумладан, қайта тикланувчи энергия манбаларидан фойдаланишни ривожлантириш бўйича *p-n*-ўтишли фотоўзгартиргич асосида фотоэлектрик энергия олиш самарадорлигини ошириш имконини берувчи фотоэлектрик модулларнинг янги самарадор конструкцияларини яратиш ва кремнийли фотоўзгартиргичларнинг эмиттер қатламида наноўлчамли структуралар шакллантириш орқали фотоэлектрик энергия олиш самарадорлигини ошириш бўйича олиб борилган тадқиқотларда сезиларли натижалар олинган. Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида «...илмий-тадқиқот ва инновация фаолиятини рағбатлантириш, илмий ва инновацион ютуқларни амалиётга жорий этишнинг самарали

механизмлари»¹ йўналиши бўйича муҳим вазифалар белгилаб берилган. Бу борада, кремний асосидаги ҚЭларининг асосий фотоэлектрик параметрларига температуранинг таъсирини тадқиқ қилиш муҳим илмий аҳамиятга эга ҳисобланади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон Фармонида келтирилган “2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини ривожлантиришнинг бешта устувор йўналиши бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида”, 2017 йил 13 февралдаги ПҚ-2772-сон «Электротехника саноатини ривожлантиришнинг устувор йўналишлари тўғрисида»ги, 2017 йил 17 февралдаги ПҚ-2789-сон «Фанлар академияси фаолияти, илмий тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги ва 2019 йил 22 августдаги ПҚ-4422-сон “Иқтисодиёт тармоқлари ва ижтимоий соҳанинг энергия самарадорлигини ошириш, энергия тежовчи технологияларни жорий этиш ва қайта тикланувчи энергия манбаларини ривожлантиришнинг тезкор чора-тадбирлари тўғрисида”ги Қарорлари ва мазкур соҳа фаолиятига тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг Ўзбекистон Республикаси фан ва технологияларини ривожлантиришнинг устувор йўналишларига мослиги. Мазкур диссертация иши Республика фан ва технологиялар тараққиётининг "Ш. Қайта тикланувчи энергия манбаларидан фойдаланишни ривожлантириш" устувор йўналишига мувофиқ амалий тадқиқотлар давлат дастури: АТД-3. "Энергетика, энергия ва ресурсларни тежаш, транспорт, машина ва асбобсозлик, замонавий электроника, микроэлектроника, электрон асбобсозликни ривожлантириш" доирасида бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Нобель мукофоти совриндори Ж.И.Алфёров, профессорлар М.Гриин, А.Васильев, А.П.Ландсман, В.А.Летин, В.Р. Заявлин, Серж Абракен, Дефиз Жан-Марко, Колетт Жан-Поль, Д.С.Стребков, Н.С.Лидаренко, В.С.Косарев, В.В.Бессель, А.Фаренбрух, Р.Бьюб, А. да Роз ва бошқа хорижий олимларнинг тадқиқот ишлари илмий ва амалий жиҳатдан яримўтказгич асосидаги турли конструкцияли структураларда фотоэлектрик ўзгартиришлар самарадорлигини оширишга қаратилган.

А.В.Козлов, А.В.Охорзина, А.Т.Ахметшин ва Д.А.Зезинлар томонидан Россиянинг турли минтақаларида ҚЭга ташқи муҳитнинг, жумладан температуранинг таъсири диссертацион тадқиқотлар сифатида ўрганилган. Лекин бу тадқиқотларда ҚЭ ва қуёш панел (ҚП)ларидаги асосий материалнинг дастлабки параметрларига температуранинг таъсири ҳисобга олинмаган. ҚЭларини моделлаштириш масалалари В.М.Евдокимов,

¹ Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони // ЎзР ҚХТ Ўзбекистон Республикаси конун ҳужжатлари тўплами, 2017 й., 6-сон, 70-модда, 20-сон, 354-модда, 23-сон, 448-модда, 37-сон, 982-модда.

В.С.Чеботарев, А.В.Юрченко, А.В.Саченко ва бошқалар томонидан ўрганилган. Лекин, уларнинг моделлаштириш усулларида етарлича катта ҳажмдаги экспериментал маълумотлар билан таъминланган рақамли асбоб-технологик методлардан фойдаланилган эмас. Шунинг учун кремнийли фотоэлектрик соҳанинг илмий ва технологик масалаларини ечишда “*PVLighthouse*”, “*Sentaurus TCAD*” каби замонавий моделлаштиришнинг рақамли асбоб-технологик методларини қўллаш ўта долзарб ҳисобланади.

Академиклар М.С.Саидов ва Р.А.Муминов, профессорлар М.Н.Турсунов, Р.Алиев, фан докторлари У.Газиёв, В.Дыскин ва Б.М.Абдурахманов каби ўзбек олимлари томонидан кремний асосидаги юқори самарали фотоўзгартиргичлар олишнинг илмий, техник ва технологик ўзига хосликлари аниқланган. Улар томонидан қатламли, қуйма ва поликристалл кремний асосли ҚЭнинг лаборатория конструкцияларига температуранинг таъсирини ўрганиш бўйича қатор тадқиқотлар бажарилган. Бундай тадқиқотларнинг натижалари кўплаб илмий журналларда чоп этилган. Лекин, ҳозирги вақтга қадар моно- ва поликристалл кремнийли ҚЭларига температура таъсирини ўрганишга бағишланган комплекс диссертацион тадқиқотлар олиб борилмаган. Ўзбекистон шароитида қуёш блоклари ва қуёш панеллари (ҚП) характеристикаларига температуранинг таъсирини ўрганиш бўйича илмий-амалий масала қўйилмаган. Шунинг учун, юқорида келтирилган маълумотларга асосланиб, юқори самарали моно- ва поликристалл кремний асосидаги *p-n*-ўтишли ҚЭлари, қуёш блоклари ва қуёш панелларининг температура ўзгариши шароитида заряд ташувчиларнинг кинетик параметрларининг ўзгариш механизмларини аниқлаш ва оптимал температура диапазонини асослаш учун комплекс диссертацион тадқиқотлар олиб бориш долзарб масала ҳисобланади.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган олий таълим муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация иши Андижон давлат университети илмий-тадқиқот ишлар режасининг ERASMUS+ 574055-EPP “Қайта тикланувчи энергия манбалари ва барқарор атроф-муҳит соҳасида магистрлик дастурини ривожлантириш”, RENES (2016-2019); 1-2016-1-IT-RPPKA2-SBHE-JP, Жаҳон банки АИФ-2/7 “Талабаларнинг ижодий ва инновацион фаолиятини рағбатлантирувчи қайта тикланадиган энергия манбалари ва барқарор атроф-муҳит физикаси бўйича магистр дастурини такомиллаштириш” (2019-2021) халқаро лойиҳалари доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади рақамли моделлаштириш орқали моно- ва поликристалл кремний асосидаги *p-n*-структураларнинг юқори самарали фотоэлектрик ўзгартиришини таъминловчи оптимал температуралар оралиғини аниқлаш ва илмий асослашдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

температура ўзгариши шароитида кремнийли фотоэлектрик ўзгартиргичлар асосий фотоэлектрик параметрларининг ўзига хосликларини аниқлашда заряд ташувчилар (ЗТ) кинетик параметрларини, хусусий ва

киришмали ЗТнинг концентрациясини, кремнийнинг электрофизик параметрларини, *p-n*-ўтиш орқали заряд кўчиш механизмларини ва омик контактлар томонидан заряд тўплаш даражаларининг ўзгариш хусусиятларини ўрганиш;

рақамли моделлаштириш ва экспериментал усуллар ёрдамида замонавий кремнийли фотоэлектрик *p-n*-структуралар ВАХи ва асосий фотоэлектрик параметрларининг температурага боғлиқ ҳолда ўзгариш динамикасини аниқлаш;

эмиттер соҳасига киритилган металл нанозарраларнинг кремнийли *p-n*-структуралар температуравий характеристикаларига таъсирининг физик табиатини аниқлаш;

“*Sinton Instrument Suns-Voc*” стандартлаштирилган ўлчов тизими асосида яримўтказгичли *p-n*-структураларнинг асосий фотоэлектрик характеристикаларига температура ўзгаришининг таъсирини автоматик тарзда кузатишга имкон берувчи янги қурилма ишлаб чиқиш ва жорий этиш;

“*PVLighthouse*” халқаро системасида олинган назарий ҳисоблаш натижаларини илмий таҳлиллар учун қулай бўлган универсал “*Excel*” кўринишида қайта ишлашга имкон берувчи янги дастурий тизим ишлаб чиқиш;

янги техник ечимлар ёрдамида сувнинг конвекцияси ва унинг диффузион буғланиши орқали иссиқликни самарали сарфлаш ҳисобига кремнийли фотоэлектрик ўзгартиргичларнинг энг мақбул эксплуатация температурасини аниқлаш имконини берувчи янги усулни илмий асослаш.

Тадқиқот объекти моно- ва поликристалл кремний асосидаги *p-n* ўтишли қуёш элементлари, улардан йиғилган блоклар ва панелларнинг фотоэлектрик хусусиятларидан иборат.

Тадқиқотнинг предмети заряд ташувчиларнинг кинетик параметрлари ва яримўтказгичли *p-n*-структуралар бошланғич хоссаларининг температура ўзгариши шароитидаги моно- ва поликристалл кремний асосидаги қуёш элементларининг чиқиш характеристикаларига таъсир механизмларидан иборат.

Тадқиқотнинг усуллари сифатида “*PVLighthouse*”, “*Sentaurus TCAD*”, “*C#9.0*” дастурий таъминот тизимлари ва “*Sinton Instrument WCT-120*” ва “*Sinton Instrument Suns-Voc*”, “*Edibon-Photovoltaic*” экспериментал лаборатория ўлчов тизимлари асосида рақамли асбоб-технологик моделлаштириш усуллари, бундан ташқари “*STGraphs*”, “*STTemperature*” дастурий маҳсулотларидан фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

илк марта турли бошланғич легирлаш даражасига ($10^{14} \div 10^{18} \text{ см}^{-3}$) эга бўлган кремний электр ўтказувчанлигининг, заряд ташувчилар кинетик параметрларининг, тақиқланган соҳа кенглигининг ва *p-n*-структураларнинг фотоэлектрик параметрлари ўзгаришларининг атроф-муҳитнинг $250 \div 350 \text{ K}$ оралиқдаги температуралар ўзгаришига боғлиқлигининг комплекс номограммалари ишлаб чиқилган;

биринчи марта кремнийли структураларининг эмиттер ва база қатламларидаги электрон ва коваклар эффектив массаларининг температурага боғлиқлик қонуниятлари аниқланган ва яримўтказгичлар физикаси назарияси доирасида тушунтирилган;

замонавий кремнийли фотоэлектрик *p-n*-структуралар ВАХ ва уларнинг асосий фотоэлектрик параметрларининг температурага боғлиқ равишда ўзгаришининг ўзига хос хусусиятлари аниқланган ҳамда рақамли ҳисоблаш ва ўтказилган тажрибалар натижаларининг ўзаро мувофиқлиги тасдиқланган;

илк марта кремнийли *p-n*-структуранинг эмиттер соҳасига киритилган шакли, ўлчами, тақсимот зичлиги ва тури бўйича мақбуллашган металл нанозарраларнинг, унинг фотоэлектрик параметрларининг температуравий коэффициентларига таъсирининг физик табиати аниқланган;

илк марта илмий асосланган сувнинг конвекцияси ва унинг диффузион буғланиш иссиқликлиги ҳисобига кремнийли қуёш элементининг мақбул иш температурасини таъминлайдиган янги техник ечимлар ишлаб чиқилган ва таклиф этилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

“*Sinton Instrument Suns-Voc*” стандартлаштирилган ўлчаш тизими асосида яримўтказгичли *p-n*-ўтишли структураларининг асосий фотоэлектрик параметрларига температура таъсирини автоматик режимда экспериментал тадқиқ этишга имкон берувчи янги қурилма яратилган ва қўлланилган;

замонавий “С#9.0” дастурий технологиядан фойдаланиш асосида “*PVLighthouse*” халқаро системасида ҳисоблаш натижаларини илмий таҳлил учун қулай бўлган “*Excel*” кўринишида қайта ишлашга имкон берувчи “*STTemperature*” дастурий маҳсулоти ишлаб чиқилган ва таклиф этилган;

сувнинг конвекцияси ва унинг диффузион буғланиши ҳисобига иссиқликни самарали сарфлаш орқали кремнийли фотоэлектрик энергия ўзгартиргичларнинг мақбул температурасини ҳосил қилувчи янги усули таклиф қилинган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги бажарилган тажриба ҳисоблаш натижаларининг ўзаро мос келиши, тадқиқот жараёнида замонавий рақамли усулларнинг қўлланилганлиги, мантиқий бирликнинг таъминланганлиги, тажрибаларда замонавий компьютерлаштирилган ўлчов асбобларидан фойдаланилганлиги ҳамда ўлчов натижаларининг умумқабул қилинган дастурий усуллар билан қайта ишланганлиги билан асосланган.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти шундан иборатки, улар қуёш энергиясини электр энергиясига айлантиришда кремний асосидаги *p-n*-структураларда кечадиган физик жараёнлар ҳақидаги билимларни чуқурлаштириш, шунингдек, хусусий ва киришмали заряд ташувчиларнинг концентрацияси, уларнинг кинетик параметрлари ва кремнийнинг электрофизик параметрларининг температурага боғлиқ равишда ўзгаришларининг ўзига

хослигини, *p-n*-ўтиш орқали заряд кўчиш механизмларини аниқлаш ҳамда илмий жиҳатдан асослаш имконини беради.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти шундан иборатки, “*Sinton Instrument Suns-Voc*” стандартлаштирилган ўлчаш тизими асосида яримўтказгичли *p-n*-структуралар асосий фотоэлектрик параметрларига температуранинг таъсирини автоматик тарзда экспериментал тадқиқ этишга имкон берувчи янги қурилма яратилган; - замонавий “С#9.0” дастурий технологиядан фойдаланиш асосида “*PVLighthouse*” халқаро тизимида ҳисоблаш натижаларини илмий таҳлил учун қулай “*Excel*” кўринишида қайта ишлашга имкон берувчи “*STTemperature*” дастурий маҳсулоти ишлаб чиқилган; - сувнинг конвекцияси ва унинг диффузион буғланиши ҳисобига иссиқликни самарали сарфлаш орқали кремнийли фотоэлектрик энергия ўзгартиргичларнинг мақбул эксплуатация температураси аниқланган.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Моно- ва поликристалл кремний асосидаги *p-n*-структураларнинг фотоэлектрик характеристикаларига ҳароратнинг таъсирини ўрганиш бўйича олинган илмий натижалар асосида:

фотоэлектрик энергия ўзгартиргичларнинг мақбул температурасини аниқлашнинг янги усули асосида «Яримўтказгичли фотоэлектрик қурилма»га Россия Федерацияси патенти олинган (RU № 204589, 2021 йил 1 июнь). Ишлаб чиқилган ушбу янги технологик усул кремнийли фотоэлектрик ўзгартиргичлар учун сувнинг конвекцияси ва диффузион буғланиш ҳисобига иссиқликни самарали сарфлаш орқали мақбул эксплуатация ҳароратини аниқлаш имконини берган;

рақамли ҳисоблаш усуллари ва бажарилган тажрибалар бўйича олинган маълумотлар, хусусан, ҳарорат ўзгарганида замонавий кремнийли фотоэлектрик *p-n*-структуралар вольт-ампер характеристикалари ва асосий фотоэлектрик параметрларининг ўзгариш хусусиятлари «FOTON» акциядорлик жамиятида параметрлари яхшиланган фотоэлектрик қурилмалар ишлаб чиқаришда қўлланилган. («Ўзэлтехсаноат» уюшмасининг 2021 йил 27 сентябрдаги 04-3/1813-сонли маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш ҳозирги кунда ишлаб чиқариш шароитида кремний асосли қуёш элементларида кечадиган фотоэлектрик жараёнларни оптималлаштириш ва уларнинг самарадорлигини ошириш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Диссертация ишининг асосий натижалари 10 та халқаро ва 6 та республика миқёсидаги илмий-амалий конференцияларда муҳокама қилинган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация иши мавзуси бўйича жами 28 та, шулардан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 7 та мақола нашр этилган. 1 та Россия Федерацияси патенти ва 2 та ЭҲМ дастурий маҳсулоти учун муаллифлик гувоҳномалари олинган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация таркиби кириш, 4 боб, хулоса, 103 та фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертациянинг ҳажми 144 (шундан, 32 та бетда расм ва 4 та бетда илова) бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати асосланган, тадқиқотнинг республикада фан ва технологияларни ривожлантиришнинг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, муаммонинг ўрганилганлик даражаси очиб берилган, тадқиқот мақсади ва вазифалари белгиланган, тадқиқот объектлари, тадқиқот усуллари, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий аҳамияти, тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши, ишнинг апробациядан ўтганлиги ва нашр қилиниши, шунингдек, диссертациянинг ҳажми ва тузилиши тўғрисида маълумотлар келтирилган.

Тадқиқотнинг "**Ҳарорат таъсирида яримўтказгичли кристаллар ва p - n -структураларда заряд кўчиш жараёнларини ўрганишнинг замонавий ҳолати**" деб номланган биринчи бобда диссертация мавзусига оид адабиётлар шарҳи келтирилган. Жумладан, яримўтказгичлар ва p - n -структураларда электр тоқининг ҳосил бўлиш жараёнлари ҳамда уларга температуранинг таъсири таҳлил қилинган. Яримўтказгичли фотоэлектрик қурилмаларнинг характеристикаларига температуранинг таъсирини тадқиқ этишга алоҳида эътибор қаратилган. Шу билан бирга яримўтказгичли фотоэлектрик қурилмаларни моделлаштириш усуллари ва уларга температура ўзгаришининг таъсири таҳлил қилинган. Аниқланган илмий-амалий муаммолар асосида диссертацион тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари шакллантирилган.

"**Яримўтказгичли p - n -структуралар характеристикаларига ҳароратнинг таъсирини экспериментал тадқиқ қилиш ва моделлаштириш усуллари**нинг умумий муаммолари" деб номланган иккинчи боб кремний ва кремнийли структураларининг хоссаларига температуранинг таъсирини асбоб-технологик моделлаштириш усули ёрдамида физик-математик асослашга бағишланган.

Рақамли моделлаштиришда қаттиқ жисмдаги электростатик потенциални аниқлаш учун Пуассон тенгламасини ечиш керак:

$$\nabla \cdot (\varepsilon \nabla \varphi + \vec{P}) = -q(p - n + N_A - N_D) - \rho_{trap} \quad (1)$$

бу ерда ε – диэлектрик сингдирувчанлик, \vec{P} – қутбланиш вектори, q – элементар заряд, n ва p – электронлар ва коваклар концентрацияси, N_D – ионлашган донорлар концентрацияси, N_A – ионлашган акцепторлар концентрацияси, ρ_{trap} – тутқичлардаги (заряд ҳолатларидаги) заряд зичлиги.

“Sentaurus” тизимдан фойдаланганда кўйилган вазифа ва талаб қилинган аниқлик бўйича моделлаштириш даражасига боғлиқ равишда заряд кўчишнинг куйидаги турли хил моделларидан бирини танлаш мумкин:

- диффузия-дрейф модели – изотермик моделлаштириш, кенг фаол соҳаларга эга бўлган кам қувватли қурилмалар учун;

- термодинамик модель – тоқлар оқими туфайли структураларнинг кизишини ҳисобга олади ва кенг фаол соҳаларга эга бўлган қувватли, иссиқликни ёмон узатувчи қурилмалар учун;

- гидродинамик модель – ЗТнинг энергия ташишини ҳисобга олувчи, тор фаол соҳаларга эга қурилмалар учун (кичик ўлчамли қурилмалар);

- Монте-Карло модели – структураларнинг тўлиқ гуруҳи учун Больцман тенгламасини ечишга мўлжалланган (кичик ўлчамли қурилмалар учун энг юқори аниқлик даражасига эга).

Бизнинг моделлаштиришда термодинамик моделдан фойдаланилди, бунда токни ҳисоблаш учун

$$\vec{J}_n = -nq\mu_n(\nabla\Phi_n + P_n\nabla T), \quad \vec{J}_p = -pq\mu_p(\nabla\Phi_p + P_p\nabla T), \quad (2)$$

тенгламаларидан фойдаланилади, бу ерда P_n ва P_p – абсолют термоэлектрик энергиялар ва T – панжара температураси. Панжара температураси тенгламаси ечилганда бу модель диффузия-дрейф моделидан фарқ қилади. Бироқ, панжара температураси тенгламасини диффузия-дрейф модели ёрдамида ечиш мумкин. Термодинамик моделни фаоллаштириш учун дастурий тизимнинг “Physics” глобал бўлимидаги термодинамик калит сўзни аниқлаб олиш керак.

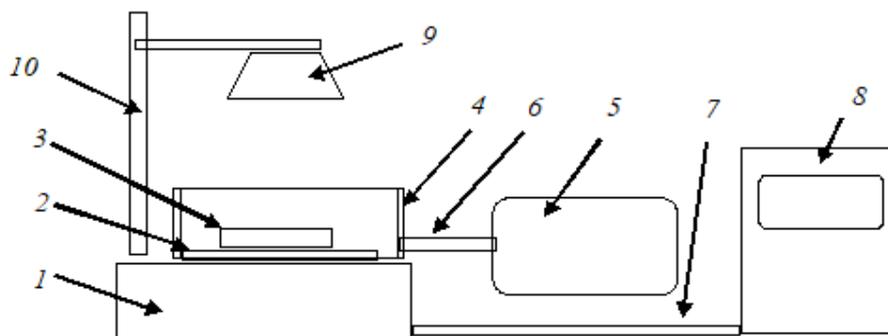
Термодинамик моделдан фойдаланилганда панжара температураси

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(c_L T) - \nabla \cdot (k\nabla T) = -\nabla \cdot [(P_n T + \Phi_n)\vec{J}_n + (P_p T + \Phi_p)\vec{J}_p] - \frac{1}{q} \left(E_c + \frac{3}{2} kT \right) (\nabla \cdot \vec{J}_n - qR_{net,n}) - \\ - \frac{1}{q} \left(-E_v + \frac{3}{2} kT \right) (-\nabla \cdot \vec{J}_p - qR_{net,p}) + \hbar\omega G^{opt} \end{aligned}$$

тенглама ёрдамида ҳисобланади, бу ерда: k – иссиқлик ўтказувчанлик, c_L – панжаранинг иссиқлик сифими, E_c ва E_v – ўтказувчанлик ва валент зоналари энергиялари, G^{opt} – ω частотадаги оптик генерация тезлиги, $R_{net,n}$ ва $R_{net,p}$ – электрон ва ковақларнинг рекомбинация тезликлари, J_n ва J_p – мос равишда электронлар ва ковақлар ток зичликлари.

Масалани соддалаштириш ва имкониятларни кенгайтириш мақсадида С#9.0 дастури ёрдамида “STTemperature” компьютер дастури ишлаб чиқилди. 0.77 Мб ҳажмли янги дастур 650-700 МБ CD турдаги ахборот ташувчига осон жойлашади. Дастур камида “Windows XP” операцион муҳитига эга бўлган “Pentium-I” шахсий компютерида “PVLighthouse” ёрдамида олинган ҳисоблаш натижаларини “Excel” жадвали кўринишида импорт қилиш ва қайта ишлаш имконини беради.

ҚЭларининг фотоэлектрик параметрларига температура ўзгаришининг таъсирини ўрганиш мақсадида тажрибалар учун 2 та қўшимча таркибий элементларни ўз ичига олган янги ўлчаш қурилмаси ишлаб чиқилди (1-расм). Қўшимча қурилма иссиқликдан изоляцияловчи ва оптик шаффоф материалдан тайёрланган корпус (4) ва иссиқ ҳаво манбаидан (5) иборат. Иссиқ ҳаво манбаи (5) сифатида "Lukey 852D+FAN" типигаги кавшарлаш тизимининг махсус қурилмаси ишлатилган. Қурилманинг корпуси ҚЭнинг нормал ёритилишини таъминлаш учун шаффоф материалдан тайёрланган. Манба томонидан ҳосил қилинган иссиқ ҳаво оқими транспортер (6) орқали (4) корпусга узатилади. Иссиқ ҳаво манбаининг қуввати 650 Вт га тенг.

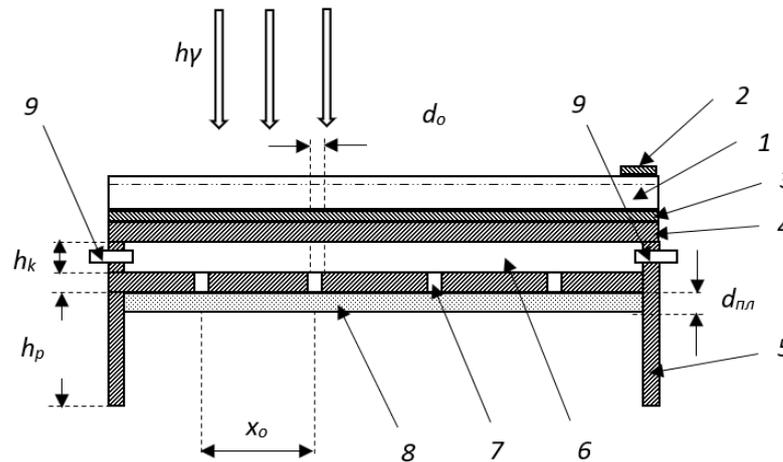


1-расм. Ўлчаш тизимининг соддалаштирилган блок схемаси: 1-асос; 2-электр ўтказувчи ва иссиқликдан изоляцияловчи элемент; 3-қуёш элементи; 4-шаффоф материалдан тайёрланган иссиқликдан изоляцияловчи корпус; 5-иссиқ ҳаво манбаи; 6-иссиқ ҳаво манбаининг транспортери; 7-улаш кабели; 8-автоматлаштирилган ўлчаш тизими (компьютер); 9-қуёш нурланишининг импульс симулятори; 10-вертикал устун.

Яримўтказгичли фотоэлектрик қурилманинг янги конструкцияси ишлаб чиқилган бўлиб, у одатдагидек фронтал контактли ва яхлит қопланган орқа контактли қуёш элементларидан тайёрланган қуёш панелидир. Қўшимча тарзда орқа томонида ғовак материалдан тайёрланган совитиш пластинасига эга. У шундай лойиҳаланганки, орқа контакт ва совитувчи ғовак пластинка орасига чеккасида бўйлама ёки кўндаланг қовурғали металл ясси радиаторли сув идиши (контейнер) ўрнатилган. Сув идишнинг узунлиги ва кенлиги бўйича геометрик ўлчамлари қуёш панелининг ўлчамларига тенг, камеранинг баландлиги $h_k = (3 \div 5)$ мм, диаметри $a = (1 \div 10)d_{pl}$, кўплаб қўшни коваклар орасидаги масофа $\Delta l = (1 \div 2)a$, контейнернинг орқа девори $d_{nl} = (0,1 \div 1)d_m$ қалинликдаги ғовак материал билан қопланган, сув идиши кириш ва чиқиш трубаларига эга, кириш трубаси қуёш панелининг энг юқори нуктасига ўрнатилган кенгайтирилган ҳажм (бак)га уланган. (d_m -сув идишининг орқа девори материалининг қалинлиги). Бўйлама ёки кўндаланг қирралар бўйлаб ўрнатилган қовурғалар баландлиги h_k га тенг бўлиб, бу баландлик ғовак пластинадан ажралган сув буғини ўтказиш учун юбориладиган ҳаво оқими ўтиши учун етарлидир.

2-расмда совитиш тизими элементлари бўлган яримўтказгичли ҚЭнинг соддалаштирилган схемасининг кўндаланг кесими кўрсатилган. У орқа

томонида кўплаб тирқишларга эга бўлган металл радиатор ва унинг ташқи томонига ўрнатилган ғовак материалдан тайёрланган пластинадан иборат.



2-расм. Янги совитиш тизимига эга бўлган фотоэлектрик қурилманинг кўндаланг кесими кўриниши: 1-яримўтказгичли пластинка (p-n ўтиш чегарали- штрихли чизиқли); 2-олд контакт; 3-орқа контакт; 4-металл радиатор; 5-металл радиатор қовурғаси; 6-сув камераси; 7-капилляр коваклар; 8-ғовак пластинка; 9-кириш ва чиқиш сув қувурлари.

Кремнийли қуёш модулининг дастлабки ва 60 дақиқа бевосита қуёш нури билан нурлантирилгандан кейин ўлчанган асосий параметрларидан (1-жадвал) кўринадик, тақлиф этилган совитиш тизими билан кремнийли фотоэлектрик қурилма камида 60 дақиқа давомида тўғридан-тўғри қуёш нури билан ёритилганда унинг ишлаш температураси $43 \div 44 \text{ }^\circ\text{C}$ (№. 2 ва №. 3) гача, совитиш тизими бўлмаган қурилманинг температураси эса $72 \text{ }^\circ\text{C}$ (№. 1) гача ортиб кетади. Бинобарин, совитиш тизимига эга бўлган қурилманинг асосий фотоэлектрик параметрлари, айниқса, фото-кучланиши юқори кийматларга эга бўлар экан.

1-жадвал

Дастлабки ва тўғридан-тўғри қуёш нурида 60 дақиқа ёритилгандан кейин ўлчанган кремнийли қуёш модулининг асосий параметрлари

№ на- муна	ҚЭ тури ва ўлчамлари	t = 0 да ўлчанган параметрлар			t = 60 дақиқада ўлчанган параметрлар		
		T, K	J _{кз} (мА/см ²)	U _{хх} (В)	T, K	J _{кз} (мА/см ²)	U _{хх} (В)
1	УХ-115×85,5 мм	316	64	13	344	62	9,4
2	УХ-115×85,5 мм	316	64	13	317	64	12,6
3	УХ-115×85,5 мм	316	64	13	316	64	12,8

Диссертациянинг *"PVLighthouse"* ва *"Sentauros"* дастурий тизимларидан фойдаланган ҳолда, кремнийли p-n-структураларининг фотоэлектрик параметрларига ҳароратнинг таъсирини ўрганиш" деб номланган учинчи бобида *"PVLighthouse"* дастурий тизими ёрдамида олинган кремнийдаги заряд ташувчиларнинг асосий кинетик параметрларига температуранинг таъсирини ўрганиш натижалари келтирилган ва муҳокама қилинган. Яримўтказгичли кремнийнинг бошланғич параметрларини

танлашда саноатда ишлаб чиқарилаётган самарали ҚЭ мос талабларга асосланган. Моделлаштириш жараёнида кремнийнинг легирлаш даражаси $10^{14} \div 10^{18} \text{ см}^{-3}$ оралиғида танланган ва температура $250 \div 350 \text{ K}$ оралиғида ўзгартирилган.

Бирламчи натижалар сифатида ЗТнинг монокристалл кремнийдаги кинетик параметрлари: концентрациялар, диффузия коэффиценти, диффузия узунлиги, ҳаракатчанлиги, асосий ва асосий бўлмаган ЗТларнинг яшаш вақтлари ҳамда кремнийнинг электр ўтказувчанлиги, тақиқланган соҳа кенглигининг легирлаш даражаси ёки асосий ЗТлар концентрациясига нисбатан ўзгариши каби боғлиқликлар олинган. Кўрсатилган параметрларнинг температура ва ЗТ концентрациясига боғлиқ равишда ўзгариш номограммалари тузилган. Олинган ҳисоблаш натижалари кўйидагича хулоса қилишга имкон берди: 1) *n*-типли ва *p*-типли кремний учун электронларнинг ҳаракатчанлиги ковакларникидан 2,8 ÷ 3 марта юқори; 2) *n*-типли ва *p*-типли кремний учун асосий ва асосий бўлмаган ЗТнинг ҳаракатчанлиги температура ортиши билан камаяди; 3) асосий ЗТ концентрациясининг ортиши билан улар ҳаракатчанлигининг температура ўзгаришларига сезгирлиги камаяди.

Шунингдек, кремнийнинг солиштирма ўтказувчанлиги ёки солиштирма қаршилигининг температурага боғлиқлиги ҳамда *p*-типли кремнийда тақиқланган соҳа кенглигининг температурага боғлиқ ўзгариши ҳисобланди. Натижаларга кўра, электрон ва ковак типдаги кремний тақиқланган соҳаси кенглигининг температурага боғлиқ равишда ўзгариши бир хил эканлигини кўриш мумкин.

Яримўтказгичлар физикасидан маълумки, $\ln(n_i T^{-3/2}) = \text{const} - (E_g/2kT)$ ни $1/T$ га боғлиқлиги тўғри чизикни $\text{tg}\theta = (E_g/2kT)$ беради. Лекин амалда бу усулда олинган фаоллашиш энергиясининг қиймати тақиқланган соҳа кенглигининг ҳақиқий қийматига мос келмайди. Температура ортиши билан панжара атомларининг тебраниш амплитудаси ортиши кузатилади ва оқибатда тақиқланган соҳа кенлиги камаяди. Бундан ташқари, температура ортиши билан атомлар орасидаги масофа ҳам ўзгаради, бу ҳам тақиқланган соҳанинг кенлигига таъсир қилади. Тақиқланган соҳа кенглигининг температурага боғлиқлиги эмпирик чизикли қонун билан ифодаланади:

$$E_g(T) = E_{g0} - \alpha T, \quad (3)$$

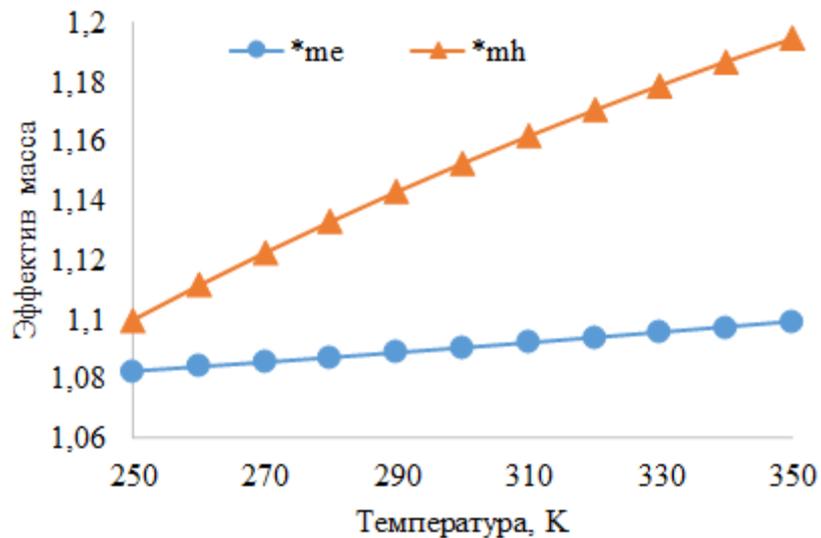
бу ерда, $E_{g0} - T=0$ даги экстрополяцияланган тақиқланган соҳа кенлиги, α - тақиқланган соҳа кенлиги ўзгаришининг термик коэффиценти. Адабиётларда келтирилган маълумотларга кўра, кремний учун тақиқланган соҳа кенлиги ўзгаришининг термик коэффиценти $2,4 \times 10^{-4} \text{ эВ/К}$.

Агар ЗТнинг кинетик параметрлари тўплами кўриб чиқилса, температурани ЗТнинг эффектив массасига таъсири ўрганилмаганлигини кўриш мумкин. Заряд кўчиш моделида электронлар ва ковакларнинг ток зичлиги уларнинг эффектив массаларининг фазовий ўзгариши билан аниқланади. Бироқ, "PVLighthouse" дастурий таъминот тизимида бундай

ҳисоблаш усули ҳисобга олинмаган. Шу билан бирга кремнийдаги эффектив массанинг (электронлар ва коваклар учун ҳисобланган) температурага боғлиқ ўзгаришини АндДУ қайта тикланувчи энергия манбалари лабораторияси ходимлари томонидан ишлаб чиқилган янги дастурий тизим ёрдамида ўрганиш мумкин. Олинган ҳисоб-китобларнинг дастлабки натижалари 3-расмда кўрсатилган. Бунда электронларнинг эффектив массаси эмиттер қатламга тегишли (n -типта, 10^{17} см^{-3} концентрацияда) ва ковакларнинг эффектив массаси асосий қатламга тегишли (p -типта 10^{15} см^{-3} концентрацияда). Заррачанинг эффектив массаси заррача кристалл потенциалининг даврий соҳасида ҳаракатланганда пайдо бўладиган динамик массасидир. Эффектив масса ифодасини қуйидагича келтириш мумкин:

$$m_{n,p} = \hbar^2 (d^2 E / dk^2) - 1, \quad (4)$$

бу ерда \hbar – Планк доимийси, k – тўлқин вектори, E – электр майдон кучланганлиги.



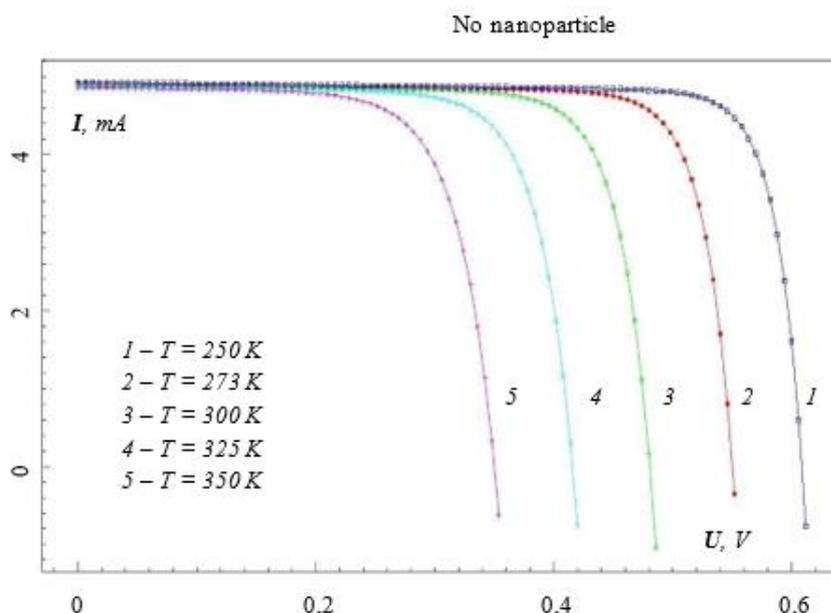
3-расм. n -типли кремний (донор-фосфор)да эффектив массанинг (электронлар ва коваклар учун) температурага боғлиқлиги.

Шундай қилиб, биринчи марта кремний структураларининг эмиттер ва база қатламларидаги электрон ва ковакларнинг эффектив массасининг температурага боғлиқлиги аниқланди, уларнинг ўзаро муносабати яримўтказгичлар физикаси назарияси доирасида талқин қилинди.

“Sentaurs” тизими ёрдамида кремнийли p - n -структураларининг характеристикаларига температуранинг таъсири тадқиқ этилди. Кремнийли ҚЭларининг температура хусусиятларини ўрганишда $250 \div 350 \text{ K}$ температура оралиғи кўриб чиқилди, бу ер усти ва космик қўлланишлар учун катта амалий аҳамиятга эга. 4-расмда $250 \div 350 \text{ K}$ оралиғидаги турли температураларда кремнийли ҚЭларининг ВАХлари келтирилган.

Қисқа туташув токи I_{sc} ва салт юриш кучланишининг U_{oc} термик коэффициентлари, ВАХни тўлдириш коэффициенти FF , максимал қувват P_m ,

ва металл нанозарралар киритилган ва киритилмаган кремнийли ҚЭларининг ФИК η натижалари 2-жадвалда келтирилган.



4-расм. Турли температураларда кремнийли ҚЭнинг нагрузкали ВАХ.

2-жадвал

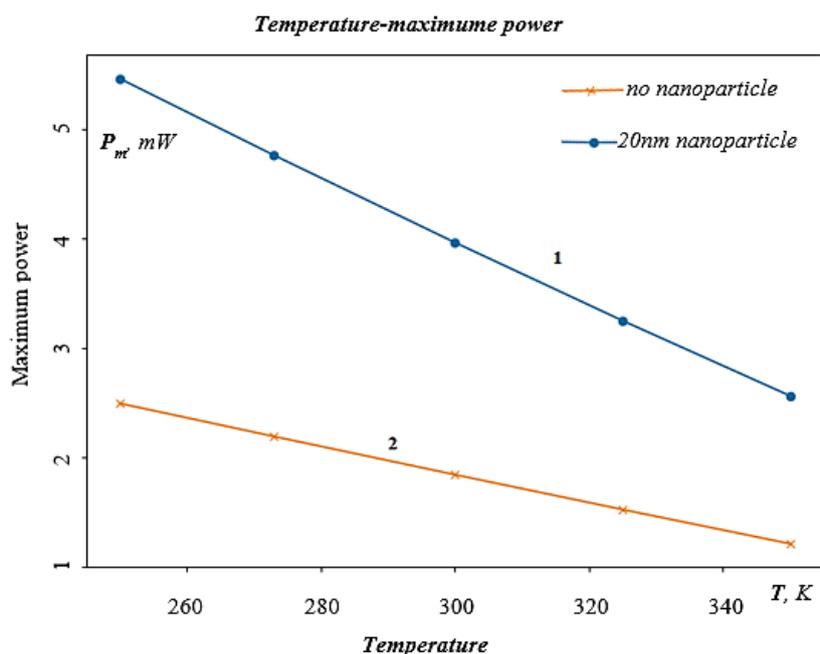
Кремнийли ҚЭларининг асосий фотоэлектрик параметрларнинг температуравий коэффициентлари

Материалнинг хусусияти	ҚЭларининг термик коэффициентлари				
	dV_{oc}/dT (mV / K)	dJ_{sc}/dT (mA / sm ² K)	dFF/dT (1 / K)	dP_m/dT (mW/sm ² K)	$d\eta/dT$ (1 / K)
Si	-2,56	-0,00067	-0,0012	-0,0128	-0,0128
Si (Pt)	-2,56	-0,0079	-0,0012	-0,0290	-0,0290

Ҳисоблаш орқали аниқланган кремнийли структураларнинг асосий фотоэлектрик параметрларининг термик коэффициентлари тажриба маълумотлари билан таққосланганда уларнинг ўзаро мувофиқлигининг қониқарли эканлигини кўрсатди. Шунини таъкидлаш лозимки, биринчи марта металл нанозарралари киритилган кремнийли структуралар асосий фотоэлектрик параметрларининг термик коэффициентлари dV_{oc}/dT , dJ_{sc}/dT , dFF/dT , dP/dT ва $d\eta/dT$ аниқланди.

Маълумки, кремнийли ҚЭлари учун температуранинг қисқа туташув токи зичлигига таъсири сезиларли эмас. Бироқ, бу ишда олинган натижалар кремний кристали ҳажмида металл нанозарралари мавжудлигида $dJ_{sc}/dT = -0,0079 \text{ mA/sm}^2 \text{ K}$ қийматнинг сезиларли даражада ошишига сабаб бўлишини кўрсатади ва бу боғлиқлик тўғри чизиқли функциядир. Фикримизча, бу фарк металл нанозарраларида температура ортиши билан электронларнинг термоэлектрон эмиссияси тезлиги ортиб бориши туфайли кремний фотоўтказувчанлигининг ўзгариш табиатига боғлиқ. Шунингдек, ёруғлик

спектрининг яқин инфрақизил диапазонидаги қисми металл нанозаррачаларда кўпроқ ютилишини эътиборга олиш мақсадга мувофиқдир.

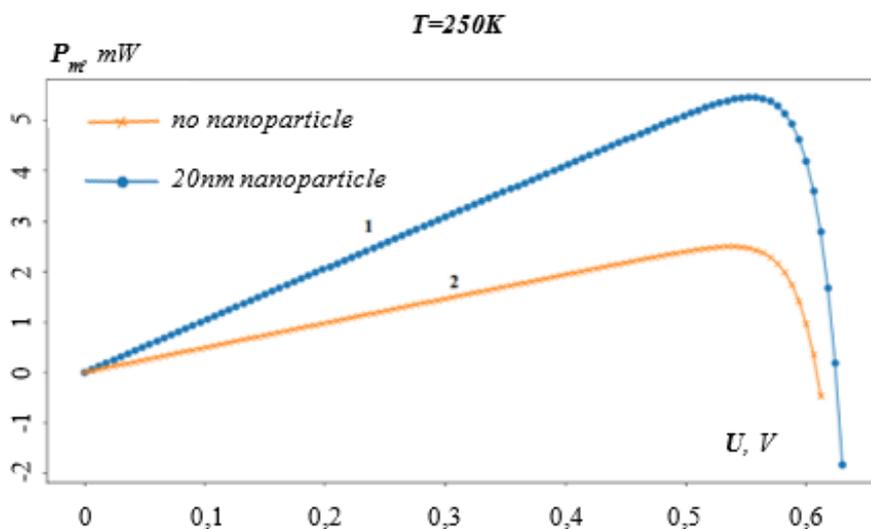


5-расм. Кремнийли қуёш элементининг максимал қувватини температурага боғлиқ ҳолда ўзгариши: 1 – Si(Pt); 2 – Si.

Кремнийли ҚЭларининг максимал чиқиш қувватининг температурага қараб ўзгариш тезлиги таҳлил қилинди. 5-расмда металл нанозарралари (1 – Si(Pt); 2 – Si) киритилган ва киритилмаган кристалл кремний асосли ҚЭ максимал қуввати dP_m/dT термик коэффициентининг эгри чизиқлари келтирилган. Нанозаррали ва нанозаррасиз кремний учун dP_m/dT катталиқнинг қийматлари мос равишда $-0,0290 \text{ mW/sm}^2\text{K}$ ва $-0,0128 -0,0290 \text{ mW/sm}^2\text{K}$ га тенг бўлди. Нанозарра киритилган кремнийли ҚЭ учун dP_m/dT нинг қиймати нисбатан юқори (деярли 2,3 марта) бўлиши температуранинг ортиши билан қисқа туташув фототок зичлиқнинг тез камайиши билан боғлиқ.

6-расмда $T=250 \text{ K}$ да металл нанозарралари (1 – Si(Pt); 2 – Si) киритилган ва киритилмаган кристалл кремнийли ҚЭнинг максимал қувватини фотоэлектрик кучланишга боғлиқлик графиклари келтирилган. Металл нанозарралари (1 – Si(Pt); 2 – Si) бўлган ва бўлмаган кристалл кремнийли ҚЭ учун 5- ва 6-расмларда ҳам кўрсатилган $P_m(T)$ ва $P_m(U)$ қийматлар орасида сезиларли фарқ металл нанозарра атрофида электрон зичлиқининг тебраниш резонанси туфайли ҳосил бўладиган наноплазмоника эффекти билан боғлиқ бўлиши мумкин. Биринчидан, металл нанозарралари киритилган ҚЭларининг асосий фотоэлектрик параметрлари нанозарраларсиз ҚЭлариникига нисбатан юқори бўлса ҳам, чиқиш қувватининг термик коэффициентлари ва самарадорлиги бироз ёмонлашмоқда. Шунинг учун бундай ҳолларда қуёш элементларини совитиш учун махсус чоралар кўриш талаб қилинади. Иккинчидан, плазмон ҚЭнинг юқори фотосезгирлиги паст температурада намоён бўлади. Шунинг учун паст температураларда

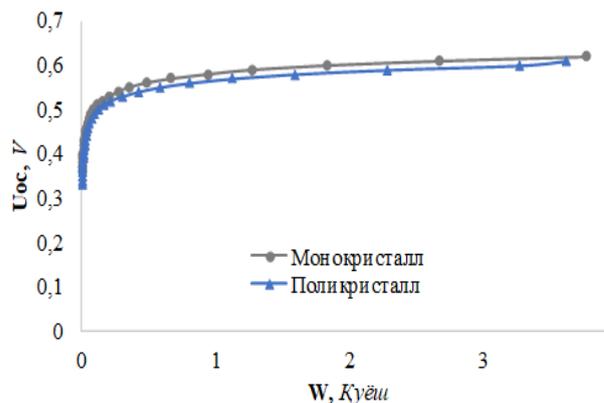
ишлайдиган жуда сезгир (плазмон) фотодетекторларни яратишнинг истиқболли имконияти мавжуд.



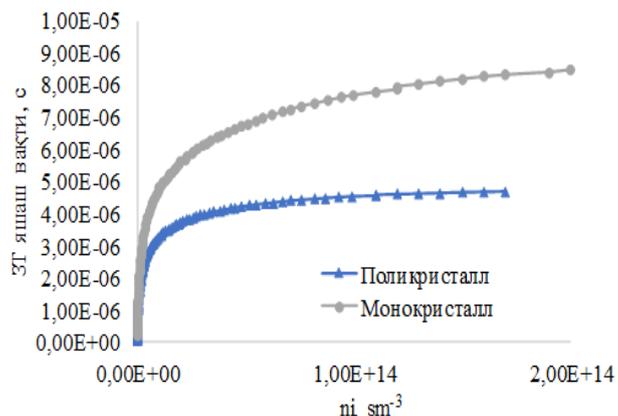
6-расм. $T = 250$ K да кремнийли ҚЭнинг максимал қувватини кучланишга боғлиқлиги: 1 – Si(Pt); 2 – Si.

"Кремнийли структуралар, блоклар ва ясси панелларнинг температуравий характеристикаларини экспериментал тадқиқ қилиш" номли якуний тўртинчи бобда моно- ва поликристал кремнийдан тайёрланган қуёш элементлари, блоклар ва ясси панелларнинг температуравий хусусиятларини экспериментал тадқиқ қилиш натижалари келтирилган ва муҳокама қилинган. Яримўтказгичлар физикасининг асосий тушунчалари ва учинчи бобда олинган заряд ташувчилар кинетик параметрларининг ўзгаришига асосланиб, температуранинг монокристалл ва поликристалл кремнийли *p-n*-структураларнинг фотоэлектрик характеристикаларига таъсири таҳлил қилинди. Шунингдек, биринчи марта температура ва ёритилганлик ўзгарганида қуёш блоклари ва панеллари ўрганилди ва уларнинг ўзига хос хусусиятлари очиб берилди. Ишда моно- ва поликристалл кремнийдан тайёрланган ҚЭга нисбатан ўрганилаётган структураларнинг турли ёруғлик шароитидаги параметрларини аниқлаш натижалари келтирилган. Жумладан, 7-расмда моно- ва поликристалл кремнийли ҚЭ салт юриш кучланишининг ёритилганликка боғлиқликлари кўрсатилган. 8-расмда моно- ва поликристалл кремнийда асосий бўлмаган заряд ташувчилар яшаш вақтларининг концентрацияга боғлиқлиги келтирилган.

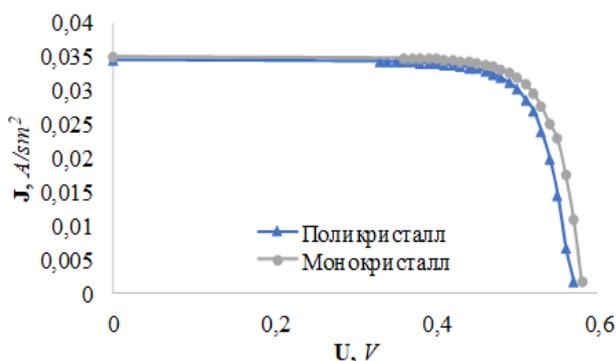
Бундан ташқари, моно- ва поликристалл кремнийдан тайёрланган ҚЭларининг ВАХлари ҳам ўлчанди ва 9-расмда ҚЭнинг икки ВАХларининг эгри чизиқлари таққослаб кўрсатилган. Расмдан монокристалл кремнийдан тайёрланган ҚЭнинг айрим афзалликларини пайқаш мумкин. Лекин шуни ҳисобга олиш керакки, монокристалл кремнийли қуёш элементи поликристалл кремнийга қараганда қимматроқдир.



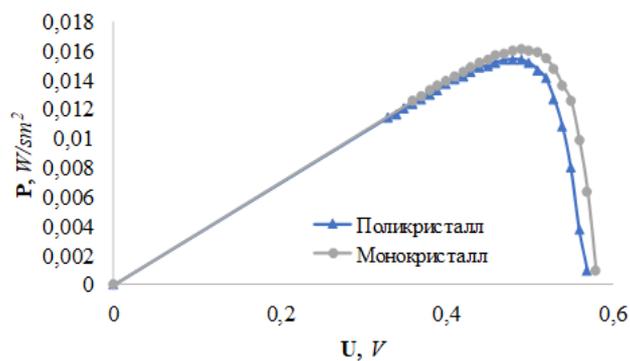
7-расм. Моно- ва поликристалл кремнийли ҚЭларининг салт юриш кучланишининг ёритилганликка боғлиқликлари.



8-расм. Моно- ва поликристалл кремнийда асосий бўлмаган заряд ташувчилар яшаш вақтларининг концентрацияга боғлиқлиги.



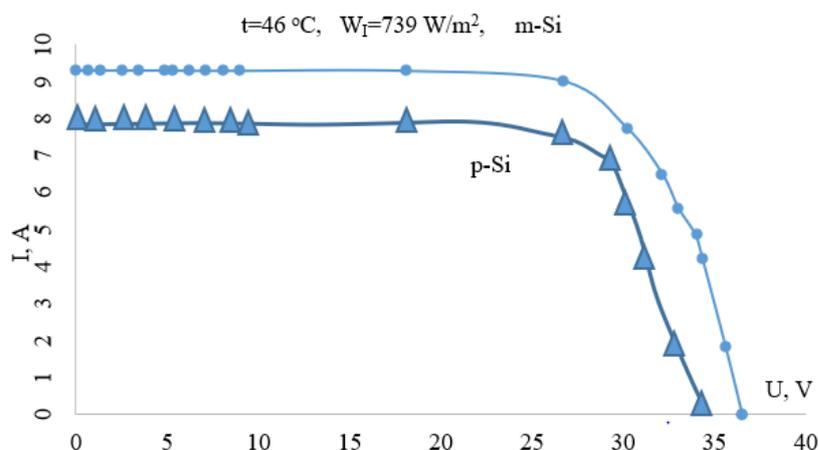
9-расм. Моно- ва поликристалл кремнийли қуёш элементларининг ВАХ.



10-расм. Моно- ва поликристалл кремнийли ҚЭнинг “Қувват-кучланиш” характеристикалари.

Поликристалл кремнийли ҚЭнинг қисқа туташув токи учун температура коэффиценти унинг майдони қанча кенг бўлса, шунча катта бўлади. Ҳисобланган фарқ 8,0 мартани ташкил қилади. ҚЭнинг кетма-кет ва параллел уланиши қисқа туташув токи учун температура коэффицентининг мос равишда 4 ва 1,3 марта камайишига олиб келади. ҚЭ салт юриш кучланиши учун температура коэффицентининг қиймати алоҳида элементлар учун ҳам, уларнинг кетма-кет ёки параллел уланган ҳолатлари учун ҳам жуда кичик.

Алоҳида ҚЭларидан ясси қуёш панеллари (ҚП) ва қуёш блоклари йиғилган бирламчи ҚЭ нинг бошланғич хусусиятлари ҳар доим ҳам сақланиб қолмайди. ҚЭ ва ҚП характеристикалари, жумладан температура характеристикалари бир-бирдан сезиларли даражада фарқ қилиши мумкин. Шунинг учун кремнийли ҚПларнинг температуравий характеристикалари ўрганилди. Қиёсий ўрганиш учун моно- ва поликристалли кремнийдан тайёрланган саноат ҚПлари танлаб олинди. Турли температура ва ёритилганликда ҚП нинг ВАХи ўрганилди, моно- ва поликристалл кремнийдан тайёрланган ҚП учун натижалар 11-расмда кўрсатилган.



11-расм. 739 Вт/м² ёритилганлик ва 46 °C температурада алоҳида монокристалл (m-Si) ва поликристалл (p-Si) кремнийли ҚЭларидан йиғилган ясси ҚПнинг нагрузкали ВАХ.

ВАХ таҳлили натижалари асосида моно- ва поликристалл кремнийли ҚП асосий фотоэлектрик параметрларининг температура коэффициентлари аниқланди. Кремнийли ҚЭни моделлаштиришга оид маълумотларни (3-боб), алоҳида ҚЭ, қуёш блоклари ва ҚПлари ВАХларини ҳисобга олган ҳолда умумий жадвал тузилди (4-жадвал).

3-жадвалдаги маълумотларни кремнийли ҚЭни моделлаштириш натижалари билан аниқланган маълумотлар билан таққослаб (3-боб), шуни таъкидлаш мумкинки, ҚЭнинг температура коэффициентлари нашр этилган ишларда берилган маълумотлардан бирмунча фарқ қилади.

3-жадвал

Температура ва ёритилганликнинг ўзгариши

№	ҚЭ ва ҚП типи	Экспозиция вақти, мин.					
		0	15	30	60	120	180
		Температура / Интенсивлик, ($^{\circ}C/(Вт/м^2)$)					
1	моно-Si ҚЭ	51,0/665	42,5/665	50,0/739	52,0/813	57,7/739	50,0/369
2	поли-Si ҚЭ	44,6/665	34,5/665	46,6/739	46,6/813	56,5/739	47,3/369
3	моно-Si ҚП	47,8/665	46,7/665	55,0/739	56,8/813	66,8/739	55,6/369
4	поли-Si ҚП	46,5/665	45,3/665	52,6/739	55,8/813	64,8/739	52,3/369

Моно- ва поликристалл кремнийдан тайёрланган ҚЭ, қуёш блоклари ва ясси ҚПлари асосий фотоэлектрик параметрларнинг температура коэффициентлари

№	Параметр	ҚЭ моделл	ҚЭ эксп.	Бошқа манбалар	Қуёш блоклари	Бошқа манбалар	ҚП	Бошқа манбалар
Монокристалл кремний								
1	dJ_{sc}/dT (mA/°C)	-0,00067	+6,5	+4,0	-0,003	×	-0,0011	×
2	dU_{oc}/dT (mV/°C)	-2,56	-2,45	-2,3	-1,56	×	-2,56	×
3	dFF/dT (1/°C)	-0,0012	-0,12	-0,12	-0,02	×	-0,02	×
4	$d\eta/dT$ (1/°C)	-0,0128	-0,024	-0,05	-0,029	×	-0,034	×
Поликристалл кремний								
5	dJ_{sc}/dT (mA/°C)	×	-0,004	+6,38	×	×	-0,0021	×
6	dU_{oc}/dT (mV/°C)	×	-2,85	-2,91	×	×	-5,60	×
7	dFF/dT (%/°C)	×	-0,022	-0,12	×	×	-0,03	×
8	$d\eta/dT$ (%/°C)	×	-0,021	-0,05 %	×	×	-0,047	×

Бу қуйидаги физикавий мулоҳазалар билан боғлиқ. Биринчидан, моделлаштирилган ҚЭнинг термик коэффициентлари тажрибада аниқланганлардан анча кичик. Чунки моделлаштирилган ҚЭнинг қалинлиги жуда кичик бўлганлиги сабабли қуёш нурланиши спектрининг кўринадиган ва инфрақизил қисми кремнийда ютилмайди ва температура ортиши билан ҚЭда кузатиладиган фототок қийматларининг ортиши шу билан боғлиқ. Иккинчидан, моно- ва поликристалл кремнийли қуёш элементларининг асосий фотоэлектрик параметрларидаги ўзгаришлар таққосланди, уларнинг фарқлари оптик ва иссиқлик хусусиятларини ҳисобга олган ҳолда илмий жиҳатдан асослаб берилди. Учинчидан, бу ишда узоқ вақт қуёш нури шароитида уларнинг ўзига хос хусусиятлари ўрганилди. Саноат қуёш панелларини ишлатиш бўйича амалий тавсиялар ишлаб чиқилди. Тўртинчидан, қуёш ёритилганлик зичлигининг ўзгариши шароитида моно- ва поликристалл кремнийли қуёш элементларининг асосий фотоэлектрик параметрларидаги ўзгаришларнинг ўзига хос хусусиятлари очиб берилди.

ХУЛОСА

Кремнийнинг электрофизик хусусиятларига ва унинг асосида олинган *p-n*-структураларнинг асосий фотоэлектрик параметрларига температура ўзгаришининг таъсирини замонавий рақамли асбоб-технологик

моделлаштириш ва экспериментал таҳлил орқали кенг қамровли ўрганилди, уларнинг бир қатор янги физик хусусиятлари аниқланди, такомиллаштиришга йўналтирилган техник ечимлар таклиф этилди ва ишлаб чиқилди ҳамда қуйидаги асосий илмий хулосалар шакллантирилди:

1. Турли бошланғич легирлаш даражасига ($10^{14} \div 10^{18} \text{ см}^{-3}$) эга бўлган кремнийнинг электр ўтказувчанлигининг, тақиқланган соҳа кенглигининг, заряд ташувчилар кинетик параметрларининг ва *p-n*-структураларнинг фотоэлектрик параметрларининг атроф-муҳитнинг $250 \div 350 \text{ K}$ оралиқдаги температурасига боғлиқ ҳолда ўзгаришларининг комплекс номограммалари ишлаб чиқилди.
2. Биринчи марта кремнийли структураларнинг эмиттер ва база қатламларидаги электрон ва коваклар эффектив массаларининг температурага боғлиқлик қонуниятлари аниқланди ҳамда яримўтказгичлар физикаси назарияси доирасида тушунтирилди.
3. Замонавий кремнийли фотоэлектрик *p-n*-структуралар ВАХ ва асосий фотоэлектрик параметрларининг температурага боғлиқ равишда ўзгаришининг ўзига хос хусусиятлари аниқланди ҳамда рақамли ҳисоблаш ва ўтказилган тажрибалар натижаларининг қониқарли даражада ўзаро мувофиқлиги тасдиқланди.
4. Эмиттер соҳасига киритилган шакли, ўлчами, тақсимот зичлиги ва тури бўйича мақбуллашган металл нанозарраларнинг кремнийли *p-n*-структура асосий фотоэлектрик параметрларининг температуравий коэффицентларига таъсирининг физик табиати аниқланди.
5. Стандартлаштирилган “*Sinton Instrument Suns-Voc*” ўлчаш тизими негизида яримўтказгичли *p-n*-ўтишли структураларнинг асосий фотоэлектрик параметрларига $0 \div 40 \text{ }^\circ\text{C}$ диапазонда температура ўзгаришининг таъсирини автоматлаштирилган режимда экспериментал ўлчашга имкон берувчи янги қурилма яратилди ва жорий этилди.
6. Замонавий “С#9.0” дастурий технология асосида “*PVLighthouse*” халқаро тизимида фотоэлектрик ва оптик структураларни ҳисоблаш натижаларини илмий таҳлил учун қайта ишлашга қулай “*Excel*” шаклида ифодаловчи “*STTemperature*” дастурий маҳсулоти таклиф этилди ва ишлаб чиқилди.
7. Янги техник ечимлар ёрдамида сувнинг конвекцияси ва диффузион буғланиши орқали иссиқликни самарали сарфлаш ҳисобига кремнийли фотоэлектрик энергия ўзгартиргичларнинг мўътадил эксплуатация температурасини ҳосил қилувчи янги усул илмий асосланди ва таклиф берилди. Температураси 313 K дан ошмаслигини таъминлайдиган самарали совитиш тизимига эга яримўтказгичли фотоэлектрик энергия ўзгартиргич конструкцияси ишлаб чиқилди.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 ПО
ПРИСУЖДЕНИЮ НАУЧНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ
ПО ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИМ НАУКАМ ПРИ
ФЕРГАНСКОМ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ**

АНДИЖАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ЗИЁИТДИНОВ ЖАХОНГИР НОРБОВЕВИЧ

**ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ *p-n*-СТРУКТУР НА ОСНОВЕ МОНО- И
ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ**

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам

Фергана – 2022

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за номером B2021.3.PhD/FM282.

Диссертация выполнена в Андижанском государственном университете.

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

Научный руководитель:

Алиев Райимжон

доктор технических наук, профессор.

Официальные оппоненты:

Имамов Эркин Зуннунович

доктор физико-математических наук, профессор.

Расулов Акбарали Махаматович

доктор физико-математических наук, профессор.

Ведущая организация:

Физико-технический институт

НПО "Физика-Солнце" АН РУз

Защита диссертации состоится на заседании Ученого совета по присуждению ученой степени доктора философии PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 Ферганского политехнического института в 2022 году в «___» _____ часов _____. Адрес: 150107, Узбекистан, г. Фергана, ул. Ферганская, дом 86. Тел.: (+99873) 241-13-03; факс: (+99873) 241-12-06; e-mail: uzferfizika@mail.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-методическом отделе Информационно-ресурсного центра Ферганского политехнического института (регистрационный номер _____). (Адрес: 150107, г. Фергана, ул. Ферганская, дом 86. Тел.: (+99873) 241-13-03).

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2022 года.

(протокол рассылки № _____ от «___» _____ 2022 г.)

Н.Х.Юлдашев

Председатель Научного совета по присуждению ученой степени доктора философии, д.ф.-м.н., профессор.

Б.З.Полвонов

Ученый секретарь Научного совета по присуждению ученой степени доктора философии, доктор философии по физико-математическим наукам, доцент.

Р.Я.Расулов

Председатель Научного семинара при Научном совете по присуждению ученой степени доктора философии, д.ф.-м.н., профессор.

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мире постепенный рост потребности на дополнительные энергетические ресурсы и обострение глобальных экологических проблем требуют интенсивного расширения использования источников возобновляемых видов энергии. При этом важными задачами исследований являются повышение эффективности, экологически чистых возобновляемых источников энергии – полупроводниковых фотоэлектрических преобразователей энергии, эффективное обеспечение поглощения светового потока, падающего на поверхность фотопреобразователя, уменьшение поверхностной и объемной рекомбинаций фотогенерируемых носителей заряда, получение новых перспективных моно- и поликристаллических структур для высокоэффективных фотоэлектрических энергетических устройств, изучение их электрофизических и фотоэлектрических свойств, а также исследование собственных возможностей использования источников энергии.

В настоящее время в ведущих научных центрах мира большое внимание уделяется использованию фотоэлектрических источников, изготовленных и усовершенствованных солнечных элементов (СЭ) на основе различных видов полупроводникового кремния. При этом следует указать следующие актуальные направления исследования: решение проблемы использования СЭ без концентраторов в жарких (высокотемпературных) регионах; разработка технических решений для охлаждения кремниевых элементов, так как температурные коэффициенты основных фотоэлектрических параметров кремниевых элементов существенно различаются в зависимости от материала кремния, качества *p-n*-перехода, стабильности контактных электродов и качества поверхности антиотражающего покрытия (АОП); применение инновационных поверхностных и объемных оптических ловителей во втором и третьем поколении СЭ, существенно влияющих на температурные коэффициенты основных фотоэлектрических параметров; внедрение наночастиц различных металлов на поверхность кремния с использованием наноплазмонного эффекта в СЭ третьего поколения; определение изменения основных фотоэлектрических параметров СЭ, имеющих металлические наночастицы в объеме и при поверхностном слое, *p-n*-структур в зависимости от температур.

В республике за счет развития приоритетных направлений науки, в том числе по использованию возобновляемых источников энергии существенные результаты были получены в исследованиях по повышению фотоэлектрической энергоэффективности за счет создания новых эффективных конструкций фотоэлектрических модулей и формирования наноразмерных структур в эмиттерном слое кремниевых фотопроводников на основе фотоэлектрических элементов с *p-n*-переходом. Стратегия действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан определяет важные задачи в области «...Стимулирования исследовательской и

инновационной деятельности, эффективные механизмы внедрения научных и инновационных достижений»¹. В связи с этим большое научное значение имеет изучение влияния температуры на основные фотоэлектрические параметры СЭ на основе кремния.

Данное диссертационное исследование в определенной степени способствует выполнению задач, представленных в постановлении Президента Республики Узбекистан от 7 февраля 2017 г. № ПП-4947 «О Стратегии действий по пяти приоритетным направлениям развития Республики Узбекистан на 2017-2021 годы», указах Президента от 13 февраля 2017 года № УП-2772 «О приоритетах развития электротехнической отрасли», 17 февраля 2017 г. УП-2789 № «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научных исследований» и № ПП-4422 от 22 августа 2019 г. в Постановлении «Об оперативных мерах по развитию возобновляемых и возобновляемых источников энергии» и других нормативных актах, связанных с деятельностью в этой сфере.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий в Республике Узбекистан. Данная диссертационная работа соответствует приоритетному направлению развития науки и технологий в Республике «III. Развитие возобновляемых источников энергии» в рамках государственной программы прикладных исследований: ППИ-3. «Энергетика, энерго и ресурс-сбережение, транспорт, машино и приборостроение, развитие современной электроники, микроэлектроники, электронного приборостроения».

Степень изученности проблемы. Научные работы лауреата Нобелевской премии Ж.И.Алфёрова, профессоров М.Гриина, А.Васильева, А.П.Ландсмана, В.А.Летина, В.Р. Заявлиной, Серж Абракена, Дефиз Жан-Марко, Колетт Жан-Поль, Д.С.Стребкова, Н.С.Лидаренко, В.С.Косарева, В.В.Бессель, А.Фаренбрух, Р.Бьюба, А. да Роза и других зарубежных ученых направлены с научной и практической точек зрения на повышение эффективности фотоэлектрического преобразования энергии в структурах на полупроводниковой основе различных конструкций.

Влияние факторов внешней окружающей среды, в том числе, температуры в условиях различных регионов России изучены в виде диссертационных исследований учеными А.В.Козловым, А.В.Охорзиной, А.Т.Ахметшиным и Д.А.Зезиным. Однако, влияние температуры на СЭ и солнечные панели (СП), причем с учетом исходных физических параметров базового материала не исследованы. Вопросы моделирования кремниевых СЭ изучены учеными В.М.Евдокимовым, В.С.Чеботаревым, А.В.Юрченко, А.В.Саченко и многими другими учеными. Но, использованные пути моделирования не являются цифровыми приборно-технологическими

¹ Указ Президента Республики Узбекистан № УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» от 7 февраля 2017 года // Собрание законодательства Республики Узбекистан, 2017 г., № 6, ст. 70, № 20, ст. 354, № 23, ст. 448, № 29, ст. 683, ст. 685, № 34, ст. 874, № 37, ст. 982.

методами, снабженными достаточно большой базой экспериментальных данных. Поэтому, считается весьма актуальным использование современных общепризнанных цифровых приборно-технологических методов моделирования таких, как “*PVLighthouse*” и “*Sentaurus TCAD*”, снабженных достаточно большой базой экспериментальных данных, в решении научных и технологических задач кремниевой фотовольтаики.

Таковыми учеными Узбекистана, как академики М.С.Саидов и Р.А.Муминов, профессора М.Н.Турсунов, Р.Алиев, доктора наук У.Газиев, В.Дыскин и Б.М.Абдурахманов были выявлены научные, технические и технологические особенности достижения высокой эффективности фотопреобразователей на основе кремния. Ими выполнен ряд исследований по анализу влияния температуры на частные лабораторные конструкции СЭ из пленочного, слиточного и поликристаллического кремния. Результаты таких исследований опубликованы в многочисленных журнальных статьях. Однако, комплексного диссертационного исследования по влиянию температуры на моно- и поликристаллические кремниевые СЭ по настоящее время не выполнено. Научно-прикладная задача по анализу влияния температуры на солнечные блоки и солнечные панели в условиях Узбекистана не поставлены. Поэтому, на основе вышеописанных фактов, необходимо отметить, что комплексное диссертационное исследование с целью определения механизма влияния кинетических параметров носителей заряда в условиях вариации температуры и обоснования оптимального диапазона изменений температуры, обеспечивающих более эффективное фотоэлектрическое преобразование СЭ с *p-n*-переходом, солнечных блоков и солнечных панелей на основе моно- и поликристаллического кремния является актуальной задачей.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного или научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертационная работа. Диссертационная работа выполнена в Андижанском государственном университете в соответствии с планом международных проектов ERASMUS+ 574055-EPP-1-2016-1-IT-RPPKA2-SBHE-JP «Развитие магистерской программы в области возобновляемых источников энергии и устойчивой окружающей среды», RENES (2016-2019), Всемирного банка АИФ-2/7 “Усовершенствование магистерской программы по физике возобновляемых источников энергии и устойчивой окружающей среды, стимулирующей креативную и инновационную деятельность студентов” (2019-2021).

Целью исследования является определение и научное обоснование оптимального диапазона изменений температуры, обеспечивающей более эффективное фотоэлектрическое преобразование *p-n*-структур на основе моно- и поликристаллического кремния посредством цифрового моделирования.

Задачи исследования:

исследование особенностей изменения кинетических параметров и концентрации собственных и примесных носителей заряда, электрофизических параметров кремния, механизмов переноса заряда через *p-n*-переход и уровня собирания их омическими контактами в определении характера поведения основных фотоэлектрических параметров кремниевых фотоэлектрических преобразователей в условиях вариации температуры;

определение динамики изменения ВАХ современных кремниевых фотоэлектрических *p-n*-структур, их основных фотоэлектрических параметров при изменении температуры методами моделированного численного расчета и эксперимента;

определение физического характера воздействия наночастиц металлов, внедренных в эмиттерную область кремниевой *p-n*-структуры на ее температурные характеристики;

разработка и внедрение нового устройства на базе стандартизованной измерительной системы “*Sinton Instrument Suns-Voc*”, позволяющей экспериментально исследовать в автоматическом режиме влияния изменений температуры на основные фотоэлектрические характеристики полупроводниковых структур с *p-n*-переходом;

разработка программной системы, позволяющей обрабатывать результаты расчета международной системы “*PVLighthouse*” и получить их в универсальном и комплексном “*Excel*” виде для научного анализа;

научное обоснование нового способа стимуляции умеренной температуры кремниевых фотоэлектрических преобразователей энергии за счет эффективной утилизации теплоты конвекцией воды и ее диффузионного испарения при помощи новых технических решений.

Объектом исследования являются фотоэлектрические свойства солнечных элементов с *p-n*-переходом на основе моно- и поликристаллического кремния, блоков и панелей на их основе.

Предметом исследования являются механизмы влияния кинетических параметров носителей заряда и исходных свойств полупроводниковых *p-n*-структур на выходные характеристики солнечных элементов на основе моно- и поликристаллического кремния в условиях вариации температуры.

Методы исследования: Использованы методы цифрового приборно-технологического моделирования на основе программных систем “*PVLighthouse*”, “*Sentaurus TCAD*”, “*C#9,0*” и экспериментально-лабораторные измерительные системы “*Sinton Instrument WCT-120*” и “*Sinton Instrument Suns-Voc*”, “*EDIBON - Photovoltaic. Units with SCADA: EESFC*”, а также программные продукты “*STGraphs*”, “*STTemperature*”.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

впервые составлены комплексные номограммы изменения электропроводности, кинетических параметров носителей заряда, ширины запрещенной зоны кремния и фотоэлектрических параметров кремниевых

p-n-структур с различными исходными уровнями легирования ($10^{14} \div 10^{18} \text{ см}^{-3}$) в зависимости от температуры окружающей среды в диапазоне $250 \div 350 \text{ K}$;

впервые определены зависимости эффективной массы электронов и дырок в эмиттерном и базовом слоях кремниевых структур, которые интерпретируются в рамках теории физики полупроводников;

определены особенности изменения ВАХ современных кремниевых фотоэлектрических *p-n*-структур, ее основных фотоэлектрических параметров при изменении температуры и установлена удовлетворительная взаимная корреляция данных, полученных методами моделированного численного расчета и выполненного эксперимента;

впервые был определен физический характер воздействия наночастиц металлов с оптимальными параметрами по форме, размеру, плотности распределения и вида металла, внедренных в эмиттерную область кремниевой *p-n*-структуры на ее температурные характеристики;

впервые разработаны и предложены научно обоснованные новые технические решения, обеспечивающие оптимальную рабочую температуру кремниевого солнечного элемента за счет теплоты конвекции воды и ее диффузионного испарения.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработано и внедрено новое устройство на базе стандартизированной измерительной системы “*Sinton Instrument Suns-Voc*”, позволяющее экспериментально исследовать в автоматическом режиме влияния изменений температуры на основные фотоэлектрические характеристики полупроводниковых структур с *p-n*-переходом;

предложена и разработана программная система “*STTemperature*”, основанная на использовании современной программной “*C#9,0*” технологии, позволяющая обрабатывать результаты расчета международной системы “*PVLighthouse*”, получить в универсальном и комплексном “*Excel*” виде для научного анализа;

предложен новый способ стимуляции умеренной температуры кремниевых фотоэлектрических преобразователей энергии за счет эффективной утилизации теплоты конвекцией воды и ее диффузионного испарения.

Достоверность результатов исследования подтверждается совпадением полученных экспериментальных результатов с расчетными данными, примененными современными цифровыми методами в процессе исследования, логическим единством, использованием современных компьютеризованных измерительных аппаратур, а также надежным общепринятым методом обработки результатов измерений.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследований заключается в углублении знаний о физических процессах, происходящих в *p-n*-структурах на основе кремния при преобразовании солнечной энергии в электрическую, а также в выявлении и научном обосновании особенностей изменения

кинетических параметров и концентрации собственных и примесных носителей заряда, электрофизических параметров кремния, механизмов переноса заряда через *p-n*-переход.

Практическая значимость исследования состоит в том, что: - предложено, разработано и внедрено новое устройство, обеспечивающее в автоматическом режиме экспериментальное определение влияния температуры на основные фотоэлектрические параметры полупроводниковых *p-n*-структур на базе стандартизованной измерительной системы “Sinton Instrument Suns-Voc”; - на основе применения современной программной технологии “C#9.0” разработана авторская программная система “STTemperature”, позволяющая обрабатывать результаты в международной системе “PVLighthouse” в виде “Excel”; - определена оптимальная эксплуатационная температура кремниевых фотоэлектрических преобразователей, происходящих за счет конвекции воды и ее диффузионной теплоты парообразования.

Внедрение результатов исследования. На основе полученных научных результатов по влиянию температуры на фотоэлектрические характеристики *p-n*-структур на основе моно- и поликристаллического кремния:

на основе нового метода определения оптимальной температуры фотоэлектрических преобразователей получен патент на полезную модель Федеральной службы Интеллектуальной собственности Российской Федерации на «Полупроводниковое фотоэлектрическое устройство» (№204589, 2021 год 1 июня). Разработанный новый технологический метод позволил определить оптимальную рабочую температуру кремниевых фотоэлектрических преобразователей за счет теплоты конвекции воды и диффузионного испарения;

полученные данные о вольтамперных характеристиках современных кремниевых фотоэлектрических *p-n*-структур и их основных фотоэлектрических параметров при изменении температуры, а также цифровые вычислительные методы и эксперименты были использованы при производстве фотоэлектрических устройств с улучшенными параметрами в АО «ФОТОН» (Справка ассоциации "Узэлтехсаноат" от 27 сентября 2021 года №04-3/1813). Использование научных результатов в настоящее время позволило оптимизировать фотоэлектрические процессы, происходящие в солнечных элементах на основе кремния, и повысить их эффективность в производственных условиях.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на 10 международных и 6 республиканских научных конференциях.

Публикация результатов диссертационного исследования. По теме диссертации опубликовано всего 28 научных работ, из них 7 статей опубликованы в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации

основных научных результатов докторских диссертаций. Получен 1 патент из Российской Федерации, 2 авторских свидетельства на программные продукты для ЭВМ.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованной литературы из 103 наименований и приложения. Текст диссертации изложен на 144 (из них 32 страницы рисунка и 4 страницы приложения) страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, определена связь исследований с приоритетными направлениями развития науки и технологий республики, раскрыт уровень изученности проблемы, определены цели и задачи исследования, приведены объекты исследования, методы исследования, научная новизна и практическая значимость исследования, внедрение результатов исследования, апробация и публикации работы, а также сведения об объёме и структуре диссертации.

В первой главе **“Современное состояние изучения процессов переноса заряда в полупроводниковых кристаллах и *p-n*-структурах под действием температуры”** приведен обзор литературы по теме диссертации. В частности, проанализированы процессы генерации электрического тока в полупроводниках и *p-n*-структурах, а также влияние на них температуры. Отдельное внимание уделено влиянию температуры на характеристики полупроводниковых фотоэлектрических приборов. В то же время проанализированы методы моделирования полупроводниковых фотоэлектрических приборов и воздействия на них вариации температуры. Исходя из выявленных научных и практических проблем сформулирована цель и определены задачи диссертационного исследования.

Вторая глава **“Общие проблемы методики моделирования и экспериментального исследования влияния температуры на характеристики полупроводниковых *p-n*-структур”** посвящена физико-математическому обоснованию метода приборно-технологического моделирования влияния температуры на свойства кремния и кремниевых структур.

При цифровом моделировании для определения электростатического потенциала в твердом теле необходимо решить известное уравнение Пуассона:

$$\nabla \cdot (\varepsilon \nabla \varphi + \vec{P}) = -q(p - n + N_A - N_D) - \rho_{trap} \quad (1)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость, \vec{P} – вектор поляризации, q – элементарный заряд, n и p – концентрация электронов и дырок, N_D –

концентрация ионизированных доноров, N_A – концентрация ионизированных акцепторов, ρ_{trap} – плотность заряда в ловушках (зарядовых состояниях).

При использовании системы “Sentaurus” в зависимости от поставленной задачи, уровня моделирования по требуемой точности можно выбрать различные модели переноса заряда:

- дрейф-диффузионная модель – изотермическое моделирование, маломощные устройства с большими активными областями;
- термодинамическая модель – учитывает нагревание структуры за счет протекания токов, мощные устройства с большими активными областями, устройства с плохим теплоотводом;
- гидродинамическая модель – учитывающая энергетический транспорт НЗ, подходящий для устройств с небольшими активными областями (устройства с малыми размерами);
- модель Монте-Карло – решает уравнение Больцмана для полной группы структур (наибольшая степень точности для устройств с малыми размерами).

При моделировании использована термодинамическая модель, в которой приняты для расчета тока уравнения:

$$\vec{J}_n = -nq\mu_n(\nabla\Phi_n + P_n\nabla T), \quad \vec{J}_p = -pq\mu_p(\nabla\Phi_p + P_p\nabla T), \quad (2)$$

где P_n и P_p – абсолютные термоэлектрические энергии и T – температура решетки. Модель отличается от модели диффузия-дрейфа, когда уравнение температуры решетки решено. Однако может быть решено уравнение температуры решетки, используя модель диффузия-дрейфа. Чтобы активировать термодинамическую модель надо определить термодинамическое ключевое слово в глобальном разделе «Physics».

При использовании термодинамической модели температура решетки вычислена из:

$$\frac{\partial}{\partial t}(c_L T) - \nabla \cdot (k\nabla T) = -\nabla \cdot [(P_n T + \Phi_n)\vec{J}_n + (P_p T + \Phi_p)\vec{J}_p] - \frac{1}{q} \left(E_C + \frac{3}{2} kT \right) (\nabla \cdot \vec{J}_n - qR_{net,n}) - \\ - \frac{1}{q} \left(-E_V + \frac{3}{2} kT \right) (-\nabla \cdot \vec{J}_p - qR_{net,p}) + \hbar\omega G^{opt}$$

где: k – теплопроводность, c_L – теплоемкость решетки, E_C - и E_V – энергии проводимости и энергии валентной зоны, соответственно, G^{opt} – оптический уровень скорости генерации от фотонов с частотой ω , $R_{net,n}$ и $R_{net,p}$ – скорости рекомбинации электронов и дырок, соответственно, J_n и J_p – плотности тока и вычислены, как описано в термодинамической модели для плотности тока.

С целью упрощения задачи и расширения возможностей разработана программа для ЭВМ “STTemperature” с использованием программы С# 9,0. Новая программа с объемом 0,77 Мб легко помещается носителю типа 650-

700 MB CD. На персональном компьютере “Pentium-I” с операционной средой не менее “Windows XP” полученные при помощи “PVLighthouse” результаты расчета могут быть импортированы в виде “Excel” таблицы и обработаны.

Разработано новое измерительное устройство, которое содержит 2 дополнительных конструктивных элемента, приведенное на рис. 2: теплоизолирующий корпус 4 из прозрачного материала и источник горячего воздуха 5. В качестве источника горячего воздуха 5 использовано специальное устройство паяльной системы типа “Lukey 852D+FAN”. Корпус устройства 4 выполнен из прозрачного материала для обеспечения нормальной освещенности СЭ. Поток горячего воздуха, созданный устройством 5 передается корпусу 4 через транспортер 6. Мощность источника горячего воздуха составляет 650 Вт.

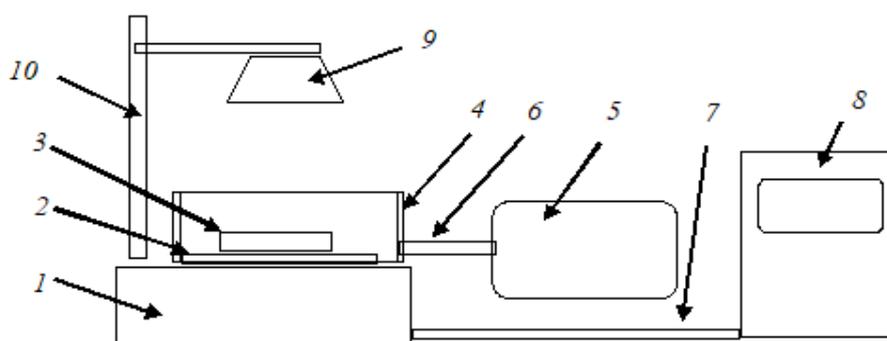


Рис. 1. Упрощенная блок-схема измерительной системы: 1-основание; 2-электропроводящий и теплоизолирующий элемент; 3-солнечный элемент; 4-теплоизолирующий корпус из прозрачного материала; 5-источник горячего воздуха; 6-транспортер горячего воздуха; 7-соединительный кабель; 8-автоматизированная система измерения (компьютер); 9-импульсный симулятор солнечного излучения; 10-вертикальная (стержень) стойка.

Разработана новая конструкция полупроводникового фотоэлектрического устройства, содержащая солнечную панель из солнечных элементов с фронтальной контактной сеткой, тыльным сплошным контактом и охлаждающую пластину из пористого материала. Она выполнена так, чтобы между тыльным контактом и охлаждающей пористой пластиной устанавливали металлический плоский контейнер-радиатор с плоской ёмкостью для воды, продольными или поперечными крайними ребрами. Геометрические размеры контейнера для воды по длине и ширине равны размерам солнечной панели, высота камеры составляет $h_k = (3 \div 5)$ мм, на задней стенке контейнера между крайними ребрами выполнены многочисленные отверстия с диаметром $a = (1 \div 10)d_{нл}$, расстояниями между соседними многочисленными отверстиями $\Delta l = (1 \div 2)a$, всю заднюю поверхность контейнера покрывают пластиной из пористого материала с толщиной $d_{нл} = (0,1 \div 1)d_m$, контейнер для воды снабжают входной и выходной трубками, входная трубка подключена к расширительному баку, установленному на высоте не меньше, чем наивысший уровень солнечной

панели (d_m – толщина металла, из которой сформирована задняя стенка контейнера для воды). Установленные по продольным или поперечным краям ребра имеют высоту h_k , достаточную для прохождения потока воздуха, служащего для отвода выделенного пористой пластиной пара воды.

На рис. 2 приведен поперечный разрез упрощенной схемы полупроводникового СЭ с элементами системы охлаждения: металлический радиатор с многочисленными отверстиями и установленными на нем пластинами из пористого материала.

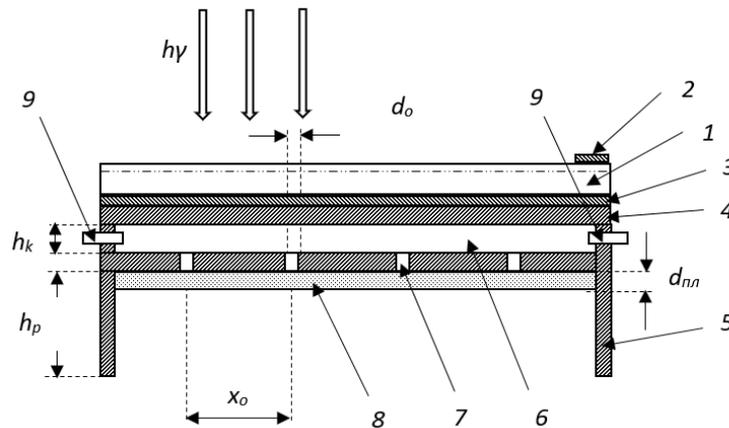


Рис. 2. Вид в сечении фотоэлектрического устройства с новой системой охлаждения: 1-Полупроводниковая пластина (с границей р-п-перехода – штриховая линия); 2-Фронтальный контакт; 3-Тыльный контакт; 4-Металлический радиатор; 5-Ребро металлического радиатора; 6-Водяная камера; 7-Капиллярные отверстия; 8-Пористая пластина; 9-входной и выходной водяные трубы.

Основные параметры кремниевого солнечного модуля, измеренные при начале и после 60 минут прямого солнечного освещения (табл. 1) свидетельствуют о следующем. При выполнении кремниевого фотоэлектрического устройства с предложенной системой охлаждения его рабочая температура в течении освещения прямым солнечным излучением не менее 60 минут нагревается до $+43 \div 44$ °С (№2 и №3), тогда, как температура устройства без системы охлаждения достигает до $+72$ °С (№1). Следовательно, основные фотоэлектрические параметры устройства с системой охлаждения имеют более высокие значения, особенно по фото-напряжению.

Таблица 1

Основные параметры кремниевого солнечного модуля, измеренные в начале и после 60 минут прямого солнечного освещения

№ примера	Тип СЭ, размеры	Измеренные параметры, при t = 0			Измеренные параметры, при t = 60 мин		
		T, K	J _{кз} (мА/см ²)	U _{хх} (В)	T, K	J _{кз} (мА/см ²)	U _{хх} (В)
1	УХ-115×85,5 мм	316	64	13	344	62	9,4
2	УХ-115×85,5 мм	316	64	13	317	64	12,6
3	УХ-115×85,5 мм	316	64	13	316	64	12,8

В третьей главе “Исследование влияния температуры на фотоэлектрические параметры кремниевых *p-n*-структур с использованием программных систем “PVLighthouse” и “Sentaurus” приведены и обсуждены результаты исследования влияния температуры на основные кинетические параметры носителей заряда в кремнии, полученные при помощи программной системы “PVLighthouse”. При выборе исходных параметров полупроводникового кремния основывались на критерии требования параметров, подходящих для изготовления эффективных СЭ. Уровень легирования выбран в диапазоне $10^{14} \div 10^{18} \text{ см}^{-3}$, а температура варьировалась в диапазоне $250 \div 350 \text{ К}$.

В качестве первичных результатов получены зависимости кинетических параметров НЗ в монокристаллическом кремнии такие, как концентрации, коэффициенты диффузии, диффузионная длина, подвижности, времени жизни основных и неосновных НЗ, а также электрической проводимости, изменение ширины запрещенной зоны от уровня легирования или от концентрации основных НЗ. Построены соответствующие семейства в виде номограммы указанных параметров от температуры и концентрации НЗ. Полученные расчетные данные позволяли заключить: 1) Подвижность электронов как для *n*-типного, так и *p*-типного кремния в $2,8 \div 3$ раза выше, чем дырок; 2) Подвижность основных и неосновных НЗ уменьшается с увеличением температуры как для *n*-типного, так и *p*-типного кремния; 3) С увеличением концентрации основных НЗ уменьшается чувствительность их подвижностей к изменениям температуры.

Также вычислена температурная зависимость удельной проводимости или удельного сопротивления кремния. Далее выполнен расчет изменения ширины запрещенной зоны в кремнии *p*-типа от температуры. По результатам можно увидеть, что изменение ширины запрещенной зоны кремния от вариации температуры идентично как при расчете для электронов, так и дырок.

Из физики полупроводников известно, что графическая зависимость $\ln(n_i T^{3/2}) = \text{const} - (E_g/2kT)$ от $1/T$ представляет собой прямую линию $\text{tg}\theta = (E_g/2kT)$. Но, в практике полученное таким образом значение энергии активации не соответствует реальному значению ширины запрещенной зоны. С повышением температуры наблюдается рост амплитуды колебания атомов решетки и, следовательно, уменьшается ширина запрещенной зоны. Также с ростом температуры изменяется и межатомное расстояние, которое также оказывает влияние на ширину запрещенной зоны. Температурная зависимость ширины запрещенной зоны выражается эмпирическим линейным законом:

$$E_g(T) = E_{g0} - \alpha T, \quad (3)$$

где E_{g0} – экстраполированная ширина запрещенной зоны при $T = 0 \text{ К}$, α – температурный коэффициент изменения ширины запрещенной зоны. По

современным данным температурный коэффициент изменения ширины запрещенной зоны для кремния равен $2,4 \times 10^{-4}$ эВ/К.

Если рассматривать комплект кинетических параметров НЗ, то можно отметить, что не изучено влияние температуры на эффективную массу НЗ. В модели переноса заряда плотность тока электронов и дырок определяется пространственным изменением их эффективной массы. Однако в программной системе “*PVLighthouse*” не предусмотрен способ такого расчета. В то же время изменение эффективной массы (расчет для электронов и дырок) в кремнии от температуры можно изучать при помощи новой программной системы, которая разработана сотрудниками лаборатории источников возобновляемой энергии АГУ. Первичные результаты такого расчета приведены на рис. 2. При этом эффективная масса электронов касается им в эмиттерном слое (*n*-типа с концентрацией 10^{17} см⁻³) и эффективная масса дырок касается им в базовом слое (*p*-типа с концентрацией 10^{15} см⁻³). Эффективная масса какой-то частицы – это динамическая масса, которая появляется при движении частицы в периодическом поле потенциала кристалла. Выражение для эффективной массы m можно представить в виде:

$$m_{n,p} = \hbar^2 (d^2 E / dk^2) - 1, \quad (4)$$

где \hbar – постоянная Планка, k – волновой вектор E – напряженность электрического поля.

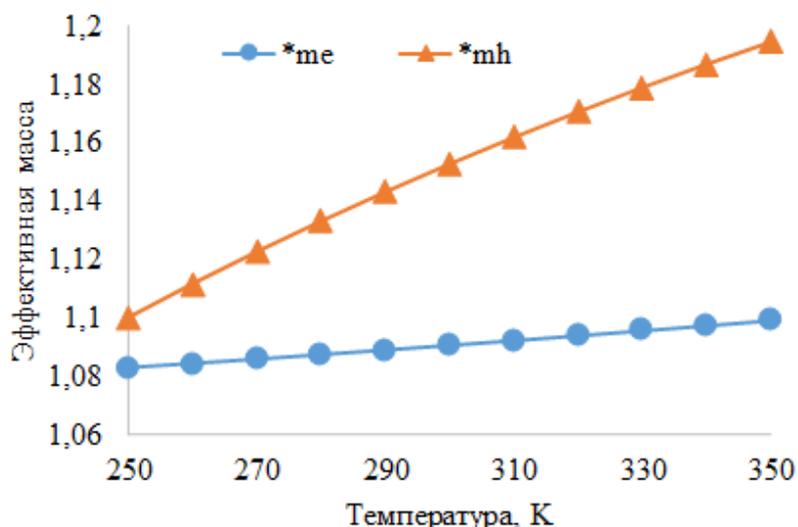


Рис. 3. Зависимость эффективной массы (расчет для электронов и дырок) в кремнии *n*-типа (донор-фосфор) от температуры.

Таким образом, впервые определены зависимости эффективной массы электронов и дырок в эмиттерном и базовом слоях кремниевых структур, взаимное соотношение которых интерпретируется в рамках теории физики полупроводников.

Представляют интерес результаты расчета влияния температуры на характеристики кремниевых *p-n*-структур при помощи системы “*Sentaurus*”.

При исследовании температурных свойств кремниевых СЭ рассмотрен диапазон температуры $250\div 350\text{ K}$, представляющий важное практическое значение для наземных и космических назначений. На рис. 4. приведены нагрузочные вольт-амперные характеристики кремниевых СЭ при различных температурах в диапазоне $250\div 350\text{ K}$.

Результаты оценки температурных коэффициентов тока короткого замыкания I_{sc} и напряжение холостого хода U_{oc} , коэффициента заполнения ВАХ FF , максимальной мощности P_m и коэффициент полезного действия η для кремниевых СЭ без и с наночастицами металла приведены в табл. 2.

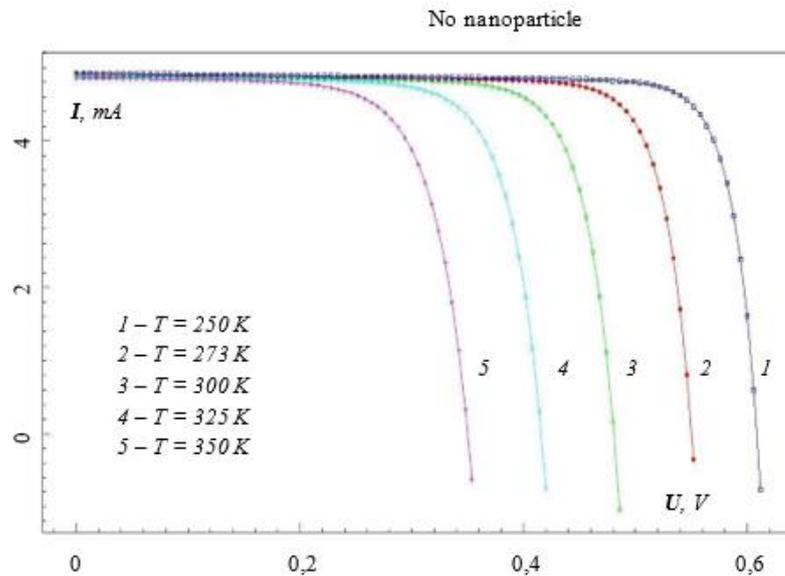


Рис. 4. Нагрузочная вольт-амперная характеристика кремниевого солнечного элемента при различных температурах.

Таблица 2

Температурные коэффициенты основных фотоэлектрических параметров солнечных элементов на основе кремния без и с наночастицами платины

Особенности материала	Температурные коэффициенты параметров СЭ				
	dV_{oc}/dT (mV / K)	dJ_{sc}/dT (mA / sm ² K)	dFF/dT (1 / K)	dP_m/dT (mW/sm ² K)	$d\eta/dT$ (1 / K)
Si	-2,56	-0,00067	-0,0012	-0,0128	-0,0128
Si (Pt)	-2,56	-0,0079	-0,0012	-0,0290	-0,0290

Сопоставление определенных в настоящей работе температурных коэффициентов основных фотоэлектрических параметров кремниевых структур с данными экспериментальных работ свидетельствует об их удовлетворительном соответствии. При этом необходимо отметить, что температурные коэффициенты основных фотоэлектрических параметров кремниевых структур, содержащих наночастиц металлов dV_{oc}/dT , dJ_{sc}/dT , dFF/dT , dP/dT и $d\eta/dT$ определены впервые.

Как известно, для кремниевых СЭ воздействие температуры на плотность тока к. з. незначительно. Однако, полученные в настоящей работе результаты свидетельствуют о том, что присутствие в объеме кристалла

кремния наночастиц металлов вызывает существенное увеличение величины (более одного порядка) $dJ_{sc}/dT = -0,0079 \text{ mA/sm}^2 \text{ K}$, причем, данная зависимость представляет собой прямолинейную функцию. Такое различие, по-видимому, связано с характером изменения фотопроводимости кремния за счет возрастающей температуры темпа термоэлектронной эмиссии электронов из наночастиц металла. Также стоит отметить, что часть светового спектра в ближнем инфракрасном диапазоне больше поглощается металлическими наночастицами.

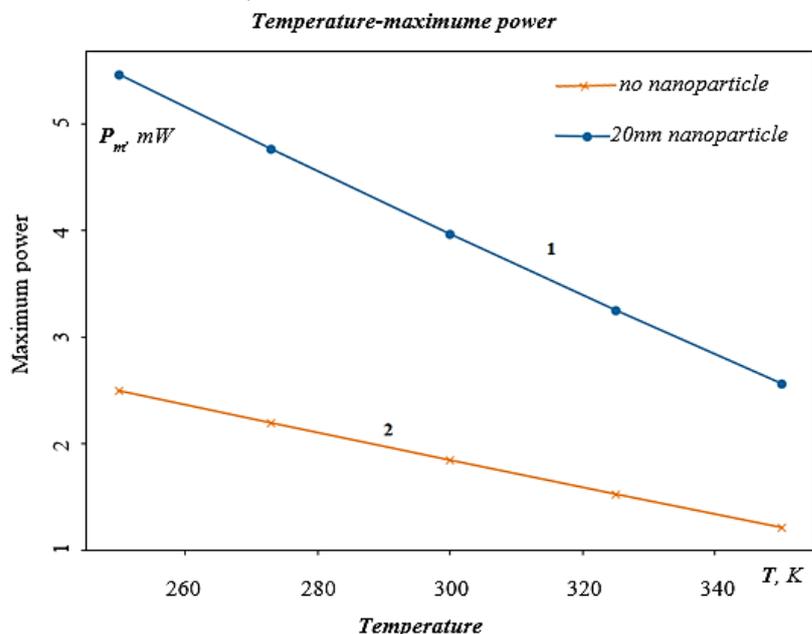


Рис. 5. Изменение максимальной мощности кремниевого солнечного элемента в зависимости от температуры: 1 – Si(Pt); 2 – Si.

Выполнен анализ темпа изменения выходной максимальной мощности кремневых СЭ в зависимости от их температуры. На рис. 5. приведены кривые расчетной зависимости температурного коэффициента максимальной мощности dP_m/dT от температуры СЭ, сформированного на основе кристаллического кремния с и без наночастиц металла (1 – Si(Pt); 2 – Si). Величина для dP_m/dT составляет для кремния с и без наночастицами металла (1 – Si(Pt); 2 – Si) соответственно $-0,0290 \text{ mW/sm}^2 \text{ K}$ и $-0,0128 - 0,0290 \text{ mW/sm}^2 \text{ K}$. Относительно высокое значение dP_m/dT (почти в 2,3 раза) для СЭ из кремния, содержащего наночастицы металла связано с быстрым темпом уменьшения плотности фототока к. з. с ростом температуры.

На рис. 6 приведены графики максимальной мощности кремниевого солнечного элемента при $T = 250 \text{ K}$ да в зависимости от фотоэлектрического напряжения для случаев использования кристаллического кремния с и без наночастиц металла (1 – Si(Pt); 2 – Si). Существенная разница в значениях $P_m(T)$ и $P_m(U)$ СЭ, сформированных на основе кристаллического кремния с и без наночастиц металла (1 – Si(Pt); 2 – Si), четко выделяемых на рис. 5 и рис. 6, по-видимому, связана с вкладом эффекта наноплазмоники, реализуемых за счет локального плазмонного резонанса частот колебаний электронной

плотности вокруг наночастиц металла. Можно отметить следующее: во-первых, несмотря на относительно высокие значения основных фотоэлектрических параметров солнечных элементов, содержащих наночастицы металла, чем солнечные элементы без них, температурные коэффициенты выходной мощности и эффективности несколько ухудшаются. Следовательно, в таких случаях требуется принятие специальных мер для охлаждения солнечных элементов. Во-вторых, более высокая fotocувствительность плазмонных СЭ проявляется при низких температурах. Можно предположить, что имеется перспективная возможность создания высокочувствительных (плазмонных) фотодатчиков для специального назначения, работающих при низких температурах.

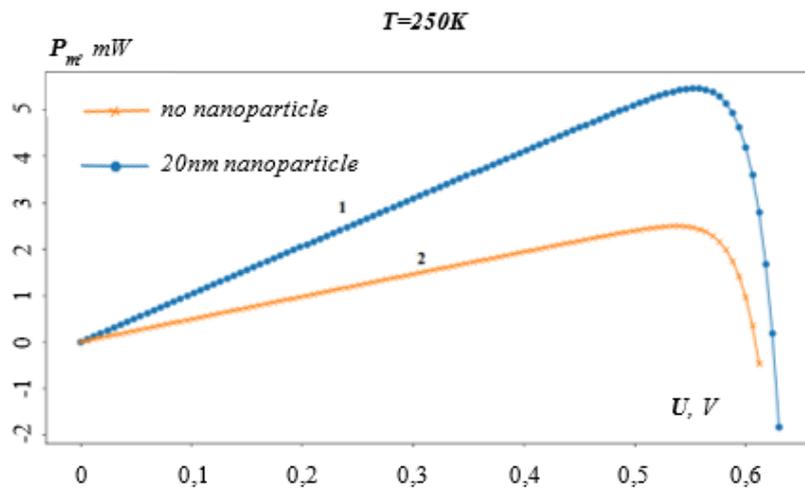


Рис. 6. Изменение максимальной мощности кремниевого солнечного элемента при $T = 250 \text{ K}$ в зависимости от напряжения: 1 – Si(Pt); 2 – Si.

В заключительной четвертой главе «Экспериментальное исследование температурных характеристик кремниевых структур, блоков и плоских панелей» приведены и обсуждены результаты экспериментального исследования температурных характеристик солнечных элементов, блоков и плоских панелей из моно- и поликристаллического кремния. Основываясь на основных представлениях физики полупроводников и изменении кинетических параметров носителей заряда, представленных в третьей главе, анализируется влияние температуры на фотоэлектрические характеристики монокристаллических и поликристаллических кремниевых фотоэлектрических структур. А также впервые изучены и выявлены особенности поведения солнечных блоков и панелей при вариации температуры и освещенности. Результаты определения параметров, исследуемых структур в условиях различной освещенности приведены в сопоставлении СЭ из моно- и поликристаллического кремния. В частности, на рис. 7 приведены зависимости напряжения холостого хода СЭ из моно- и поликристаллического кремния от уровня освещенности. На рис. 8 приведена зависимость времени жизни неосновных носителей заряда от их

концентрации в моно- и поликристаллическом кремнии в сопоставительной форме.

Также измерена нагрузочная ВАХ СЭ из поли- и монокристаллического кремния и на рис. 9 приведены кривые двух ВАХ СЭ в сопоставлении. Можно заметить некоторое преимущество СЭ из монокристаллического кремния. Но при этом необходимо учитывать, что СЭ из моно-кремния более дорого стоит, чем поли-кремния.

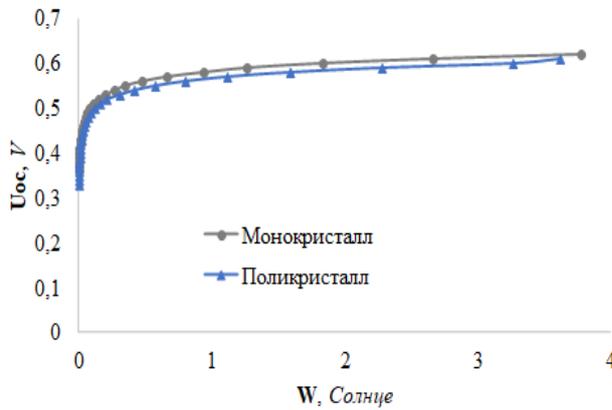


Рис. 7. Зависимость напряжения холостого хода СЭ из моно- и поликристаллического кремния от уровня освещенности.

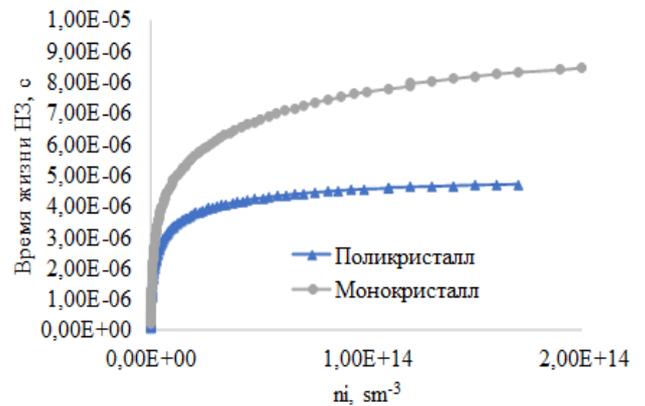


Рис. 8. Зависимость времени жизни неосновных носителей заряда от их концентрации в моно- и поликристаллическом кремнии.

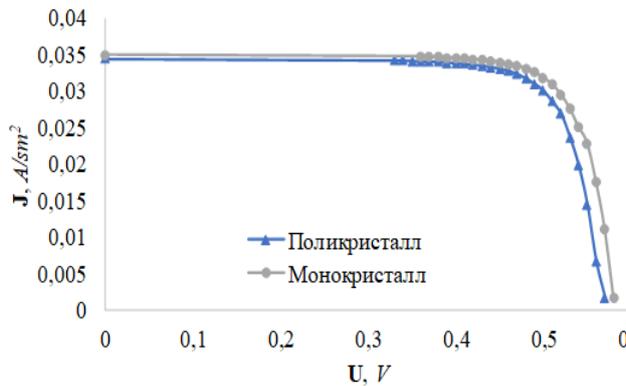


Рис. 9. Вольт-амперная характеристика СЭ из моно- и поликристаллического кремния.

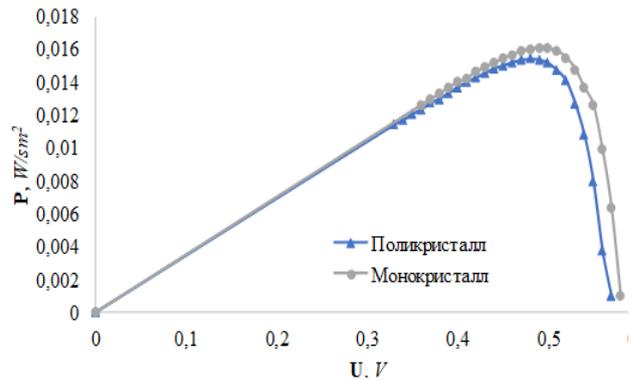


Рис. 10. «Мощность-напряжение» характеристика СЭ из моно- и поликристаллического кремния.

Температурный коэффициент для тока к. з. поликристаллического кремниевого СЭ тем больше, чем больше его площадь. При этом разница составляет 8,0 раз. Последовательное и параллельное соединение СЭ приводит к уменьшению температурного коэффициента для тока к.з. в 4 и 1,3 раза соответственно. Величина температурного коэффициента напряжения х.х. СЭ очень маленькая, как для отдельных элементов, так и при их последовательном или параллельном соединении.

При сборке плоских солнечных панелей (СП) из отдельных СЭ и блоков СЭ, не всегда сохраняются исходные характеристики первичных СЭ. Характеристики СЭ и СП могут существенно отличаться друг от друга, в т. ч. и температурные характеристики. Поэтому и проведено исследование температурных характеристик кремниевых СП. Для проведения сопоставительного исследования выбраны промышленные СП из моно- и поликристаллического кремния. Были измерены ВАХ исследованных СП при различных температурах и освещенностях, результаты по СП из моно- и поликристаллического кремния представлены на рис. 11.

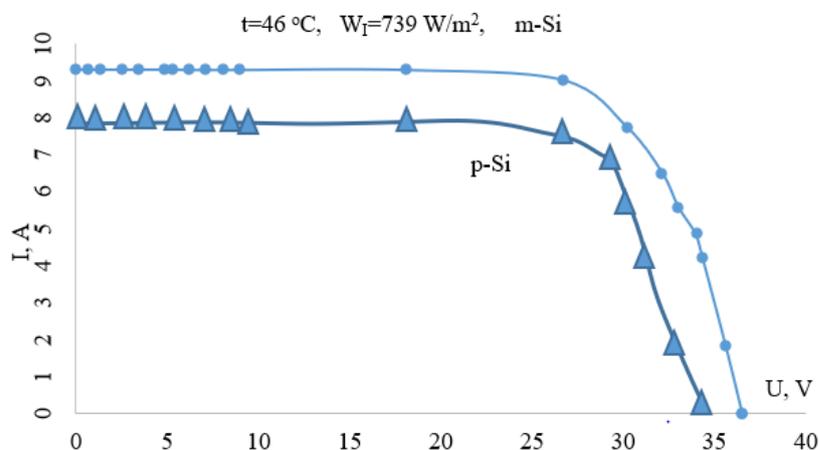


Рис. 11. Нагрузочная ВАХ плоской СП с мощностью 250 Вт, собранных из отдельных солнечных элементов из монокристаллического (m-Si) и поликристаллического (p-Si) кремния при освещенности 739 Вт/м² и температуре 46 °С.

По результатам анализа ВАХ определены температурные коэффициенты основных фотоэлектрических параметров СП, изготовленных на основе моно- и поликристаллического кремния. Учитывая данные по моделированию кремниевых СЭ (3 глава), измерения ВАХ отдельных СЭ, блоков СЭ и солнечных панелей составлена общая таблица 4.

Сопоставлением данных табл. 3 с данными, определенными по результатам моделирования кремниевого СЭ (глава 3) можно заметить, что температурные коэффициенты несколько отличаются от данных, приведенных в известных работах.

Таблица 3

Изменения температуры и освещенности по времени СЭ и плоских панелей из моно- и поликристаллического кремния

№	Тип СЭ и солнечной панели	Продолжительность экспозиции, мин.					
		0	15	30	60	120	180
		Температура / Интенсивность, (°C/(Вт/м ²))					
1	моно-Si СЭ	51,0/665	42,5/665	50,0/739	52,0/813	57,7/739	50,0/369

2	поли-Si СЭ	44,6/665	34,5/665	46,6/739	46,6/813	56,5/739	47,3/369
3	моно-Si СП	47,8/665	46,7/665	55,0/739	56,8/813	66,8/739	55,6/369
4	поли-Si СП	46,5/665	45,3/665	52,6/739	55,8/813	64,8/739	52,3/369

Таблица 4

Сопоставление температурных коэффициентов основных фотоэлектрических параметров СЭ, блоков СЭ и плоских панелей из моно- и поликристаллического кремния

№	Параметр	Для СЭ моделир	Для СЭ эксп.	Др. источ.	Для блока СЭ	Др. источ.	Для плоской панели	Др. источ.
Для монокристаллического кремния								
1	dJ_{sc}/dT (mA/°C)	-0,00067	+6,5	+4,0	-0,003	×	-0,0011	×
2	dU_{oc}/dT (mV/°C)	-2,56	-2,45	-2,3	-1,56	×	-2,56	×
3	dFF/dT (1/°C)	-0,0012	-0,12	-0,12	-0,02	×	-0,02	×
4	$d\eta/dT$ (1/°C)	-0,0128	-0,024	-0,05	-0,029	×	-0,034	×
Для поликристаллического кремния								
5	dJ_{sc}/dT (mA/°C)	×	-0,004	+6,38	×	×	-0,0021	×
6	dU_{oc}/dT (mV/°C)	×	-2,85	-2,91	×	×	-5,60	×
7	dFF/dT (%/°C)	×	-0,022	-0,12	×	×	-0,03	×
8	$d\eta/dT$ (%/°C)	×	-0,021	-0,05 %	×	×	-0,047	×

Это связано со следующими физическими соображениями. Во-первых, температурные коэффициенты моделированных СЭ на много меньше, чем экспериментальные данные. Это связано тем, что толщина моделированного СЭ слишком маленькая, из-за чего большая – видимая и инфракрасная часть солнечного излучения по спектру не поглощается в кремнии. По-видимому, обычно наблюдаемое в СЭ увеличение значений фототока с ростом температуры связано именно с этим. Во-вторых, сопоставлены изменения основных фотоэлектрических параметров моно- и поликристаллических кремниевых СЭ, научно обоснованы их различия с учетом их оптических и тепловых свойств. В-третьих, в данной работе определены особенности их поведения в условиях длительного солнечного освещения. Разработаны практические рекомендации по эксплуатации промышленных солнечных панелей. В-четвертых, выявлены особенности изменения основных

фотоэлектрических параметров моно- и поликристаллических кремниевых СЭ в условиях вариации плотности солнечного освещения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате комплексного исследования путем использования современного цифрового приборно-технологического моделирования и экспериментального анализа влияния изменения температуры на электрофизические свойства кремния и основные фотоэлектрические характеристики *p-n*-структур, созданных на его основе, выявлен ряд новых физических особенностей, предложены и разработаны новые технические решения и сформулированы следующие основные выводы:

1. Составлены комплексные номограммы изменения электропроводности, кинетических параметров носителей заряда, ширины запрещенной зоны кремния и фотоэлектрических параметров кремниевых *p-n*-структур с различными исходными уровнями легирования ($10^{14} \div 10^{18} \text{ см}^{-3}$) в зависимости от температуры окружающей среды в диапазоне $250 \div 350 \text{ K}$.
2. Впервые определены зависимости эффективной массы электронов и дырок в эмиттерном и базовом слоях кремниевых структур, которые интерпретируются в рамках теории физики полупроводников.
3. Определены особенности изменения ВАХ современных кремниевых фотоэлектрических *p-n*-структур, ее основных фотоэлектрических параметров при изменении температуры и установлена удовлетворительная взаимная корреляция данных, полученных методами моделированного численного расчета и выполненного эксперимента.
4. Определен физический характер воздействия наночастиц металлов с оптимальными параметрами по форме, размеру, плотности распределения и вида металла, внедренных в эмиттерную область кремниевой *p-n*-структуры на ее температурные характеристики.
5. Разработано и внедрено новое устройство на базе стандартизованной измерительной системы “*Sinton Instrument Suns-Voc*”, позволяющее экспериментально исследовать в автоматическом режиме влияние изменений температуры в диапазоне $0 \div 40 \text{ }^\circ\text{C}$ на основные фотоэлектрические характеристики полупроводниковых структур с *p-n*-переходом.
6. Предложена и разработана программная система “*STTemperature*”, основанная на использовании современной программной “*C#9,0*” технологии, позволяющая обрабатывать результаты расчета международной системы “*PVLighthouse*”, получить в универсальном и комплексном “*Excel*” виде для научного анализа.
7. Предложен и научно обоснован новый способ стимуляции умеренной температуры кремниевых фотоэлектрических преобразователей энергии за счет эффективной утилизации теплоты конвекцией воды и ее диффузионного испарения при помощи новых технических решений.

Предложена конструкция полупроводникового фотоэлектрического преобразователя энергии с новой более эффективной системой охлаждения, обеспечивающая рабочую температуру не более 313 К.

**SCIENTIFIC COUNCIL PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 ON AWARD OF
PHYLOSOFY DOCTOR DEGREE AT THE FERGHANA POLYTECHNIC
INSTITUTE OF UZBEKISTAN**

ANDIJAN STATE UNIVERSITY

ZIYOITDINOV JAKHONGIR NORBOYEVICH

**INFLUENCE OF TEMPERATURE ON THE PHOTOELECTRIC
CHARACTERISTICS OF *p-n* STRUCTURES BASED ON MONO- AND
POLYCRYSTALLINE SILICON**

01.04.07 – Condensed matter physics

**DISSERTATION ABSTRACT
of the Doctor of Philosophy (PhD) on Physical and Mathematical Sciences**

Ferghana – 2022

The theme of 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. B2021.3.PhD/FM282

The doctoral (PhD) dissertation was carried out at the Andijan state university.

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

Scientific supervisor:

Aliev Rayimjon

Doctor of Technical Sciences, professor.

Official opponents:

Imamov Erkin Zunnunovich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor.

Rasulov Akbarali Maxamatovich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor.

Leading organization:

Physical-technical Institute NGO

“Physics-Sun”, ASUZ

The defense of the dissertation will take place at the meeting of the Scientific Council for the award of the scientific degree of Doctor of Philosophy PhD.03/27.02.2020.FM.106.01 of the Ferghana Polytechnic Institute in 2022 at "___" _____ hours _____. Address: 150107, Uzbekistan, Ferghana, 86 Ferghana Str., Tel: (+99873) 241-13-03, (99873) 241-12-06; e-mail: uzferfizika@mail.ru.

The doctoral (PhD) dissertation can be looked through in the scientific and methodological department of the Information-Resource Centre of the Ferghana Polytechnic Institute (registered under No. _____) Address: 150107, Uzbekistan, Ferghana, 86 Ferghana str. Tel: (+99873) 241-13-03.

The abstract of the dissertation was distributed on « ___ » _____ 2022
(Registry record No. _____ dated « ___ » _____ 2022)

N.Kh.Yuldashev

Chairman of Scientific Council on award of PhD scientific degree, DSc in physics and mathematics, professor.

B.Z.Polvonov

Scientific secretary of Scientific Council on award of PhD scientific degree, PhD in physics and mathematics, docent.

R.Ya.Rasulov

Chairman of Scientific seminar at Scientific Council on award of PhD scientific degree, DSc in physics and mathematics, professor.

INTRODUCTION (annotation of PhD dissertation)

The aim of the research is to determine and scientifically substantiate the optimal range of temperature changes that provides a more efficient photoelectric conversion of p - n structures based on mono- and polycrystalline silicon through digital modeling.

The object of research work is solar cells with a p - n junction based on mono- and polycrystalline silicon, blocks and panels based on them.

The scientific novelty of the research consists the following:

for the first time complex nomograms of changes in the electrical conductivity, kinetic parameters of charge carriers, the band gap width of silicon and photovoltaic parameters of silicon p - n structures with different initial doping levels ($10^{14} \div 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) depending on the ambient temperature in the range of $250 \div 350 \text{ K}$ are compiled;

for the first time the dependences of the effective mass of electrons and holes in the emitter and base layers of silicon structures were determined, which are interpreted within the framework of the theory of semiconductor physics;

the features of the change in the I - V characteristic of modern silicon photovoltaic p - n structures, its main photovoltaic parameters with a change in temperature are determined, and a satisfactory cross-correlation of the data obtained by the methods of simulated numerical calculation and the performed experiment is established;

for the first time determined the physical nature of the effect of metal nanoparticles with optimal parameters in shape, size, distribution density and type of metal, embedded in the emitter region of the silicon p - n structure on its temperature characteristics;

for the first time scientifically based new technical solutions have been developed and proposed to ensure optimal operating temperature of a silicon solar cell due to the heat of water convection and its diffusion evaporation.

Implementation of research results. Based on the scientific results obtained on the effect of temperature on the photoelectric characteristics of p - n structures based on mono- and polycrystalline silicon, the following were obtained:

on the basis of a new method for determining the optimal temperature of photovoltaic converters, a patent for a utility model of the Federal Service for Intellectual Property of the Russian Federation for "Semiconductor photoelectric device" was obtained (RU No. 204589, 2021 June 1). The developed new technological method made it possible to determine the optimal operating temperature of silicon photovoltaic converters due to the heat of convection and diffusion evaporation;

The obtained data on the voltage characteristics of modern silicon photovoltaic p - n structures and their main photovoltaic parameters with temperature changes, as well as digital computational methods and experiments were used in the production of photovoltaic devices with improved parameters in JSC "PHOTON" (Reference of the association "Uzeltexsanoat" dated September 27, 2021 No. 04-3/1813). The use of scientific results has now made it possible to

optimize photovoltaic processes occurring in silicon-based solar cells and increase their efficiency in production conditions.

The structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, 4 chapters, a conclusion, a list of 103 references and an appendix. The text of the dissertation is presented on 144 (of this, 32 pages of the figure and 4 pages of the application) pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST of PUBLISHED WORKS

I бўлим (Часть I; Part I)

1. Свистова Т.В., Меньшикова Т.Г., Плотникова Е.Ю., Рембеза Е.С., Алиев Р., Зияитдинов Ж.Н., Уринов К.И., Гуломов Ж.Ж., Урмонов Б.К. Патент Российской Федерации RU №204589 «Полупроводниковое фотоэлектрическое устройство», 01.06.2021, Бюл. №16.
2. Aliev R., Gulomov J., Abduvohidov M., Aliev S., Ziyoitdinov Zh., and Yuldasheva N. Stimulation of Photoactive Absorption of Sunlight in Thin Layers of Silicon Structures by Metal Nanoparticles. // Гелиотехника (Applied solar energy), Vol. 56, №5, 2020, С. 364-370. [01.00.00; №1, №3 Scopus].
3. Алиев Р., Зиёитдинов Ж., Гуломов Ж., Абдувохидов М., Урманов Б. Влияние температуры на фотоэлектрические процессы в кремниевых солнечных элементах. // Научный вестник Андижанского государственного университета (Физика-математика тадқиқотлари), т. 3, вып. 2, 2021, С. 18-24 (01.00.00; №13).
4. Алиев Р., Зиёитдинов Ж., Урманов Б. Влияние ультразвуковой обработки поверхностей пластин кристаллического кремния на физические свойства устройств солнечной энергетики. // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» 2020, № 7-18. С. 12-25 (01.00.00; №9). [№12 Index Copernicus, №18 Ulrich's Periodicals Directory, №35 CrossRef].
5. Aliev R., Ziyoitdinov J., Urmanov B. Changing of surface properties of silicon plates under mechanical influence of ultrasonic frequency. // TRANS Asian Journal of Marketing and Management Research (TAJMMR) India, 2020, Vol 9, № 7-8. pp. 18-24. [№23 Scientific Journal Impact Factor (SJIF 2020 – IF: 7.209)]. DOI: 10.5958/2279-0667.2020.00030.9.
6. Gulomov J., Aliev R., Nasirov M., and Ziyoitdinov J. Modeling metal nanoparticles influence to properties of silicon solar cells. // International journal of Advanced Research (IJAR) 2020, 8(11) pp. 336-345. [№12 Index Copernicus, №14 ResearchBib, №16 Directory Indexing of International Research Journals-CiteFactor, №18 Ulrich's Periodicals Directory, №23 Scientific Journal Impact Factor (SJIF 2020 – IF: 7.337), №35 CrossRef, №40 ResearchGate].
7. Зиёитдинов Ж.Н. Кремний асосли куёш элементида заряд ташувчиларнинг асосий кинетик характеристикаларига температура ўзгаришининг таъсири. // «Современные тенденции развития физики полупроводников: проблемы, достижения и перспективы» сборник материалов международной научно-рецензируемой онлайн-конференции, 28 мая 2020 г. www.e-science.uz, С. 75-79.

II бўлим (Часть II; Part II)

1. Зиётдинов Ж., Гуломов Ж., Алиев Р., Носиров М., Абдувохидов М., Мирзаалимов А., Мирзаалимов Н. “STTEMPERATURE” физик тажрибаларнинг виртуал моделлари. Ўзбекистон Республикаси Адлия вазирлиги ҳузуридаги Интеллектуал мулк агентлиги. Гувоҳнома № DGU 08848.
2. Муйдинова М., Гуломов Ж., Абдувохидов М., Зиётдинов Ж., Насриддинов С., Алиев Р. “STGRAPHS”. Ўзбекистон Республикаси Адлия вазирлиги ҳузуридаги Интеллектуал мулк агентлиги. Гувоҳнома № DGU 08622
3. Абдувохидов М.К., Мирзаалимов А.А., Зиётдинов Ж.Н., Мирзаалимов Н.А., Гуламов Ж.Ж., Мадаминава И.М. Создание новых программ численного моделирования и платформ для моделирования солнечных элементов. // Universum: Технические науки. Научный журнал. Российская Федерация, Москва, 2020, 6(75), С. 14-17. [№14 ResearchBib, №16 Directory Indexing of International Research Journals-CiteFactor, №18 Ulrich’s Periodicals Directory].
4. Хонбутаева Д.А., Козимжонов Н.А., Абдувохидов М.К., Мирзаалимов А.А., Мирзаалимов Н.А., Зиётдинов Ж.Н., Гуламов Ж.Ж. Влияние гамма-излучения на солнечный элемент. // Universum: Технические науки. Научный журнал. Российская Федерация, Москва, 2020, 10(79), С. 78-81. [№14 ResearchBib, №16 Directory Indexing of International Research Journals-CiteFactor, №18 Ulrich’s Periodicals Directory].
5. Gulomov J.J., Ziyoidtinov J.N., Madaminova I.M. Modeling the temperature influence on silicon bases solar cells by Sentaurus TCAD. // “Молодой учёный” (“Young Scientist”). Россия. 2020, Часть I, № 17, С. 1-4. [№18 Ulrich’s Periodicals Directory].
6. Алиев Р., Мирзаалимов А., Муйдинова М., Зияитдинов Ж. Фотоэлектрические преобразователи энергии и актуальные проблемы их усовершенствования. // Посвященной 28-летию независимости республики Узбекистан и 60-летию заслуженного деятеля науки республики Каракалпакстан, профессору Исмайлову Канатбаю Абдреймовичу. ККГУ, Нукус, 2019, С. 28-29.
7. Алиев Р., Носиров М., Юлдашева Н., Зияитдинов Ж., Муйдинова М., Мирзаалимов А. Повышение оптической эффективности кремниевых солнечных элементов путем использования наночастиц металлов. // Материалы международной конференции «Современные проблемы возобновляемых источников энергии и устойчивой окружающей среды», 26-27 сент., 2019 г. – Ташкент, С. 14-18.
8. Алиев Р., Зияитдинов Ж., Урманов Б. Влияние механической обработки ультразвуковой частоты поверхности кремния на его оптические свойства. // Материалы Российско – Узбекского международного научно-методического семинара «Возобновляемые источники энергии и

- устойчивая окружающая среда», Воронеж, 15-22 окт., 2019 г. Андижан, С. 60-63.
9. Алиев Р., Зияитдинов Ж., Юлдашева Н., Носиров М. Стабилизация высокой эффективности кремниевых солнечных элементов внедрением наночастиц некоторых металлов. // Материалы Российско – Узбекского международного научно-методического семинара «Возобновляемые источники энергии и устойчивая окружающая среда», Воронеж, 15-22 окт., 2019 г. Андижан, С. 118-124.
 10. Aliev R., Nosirov M., Ziyoidtinov J., Gulomov J. Quyosh elementlarini modellashtirishda kompyuterlardan foydalanish. // “Муқобил энергия фойдаланишнинг жорий ҳолати ва истиқболлари” мавзусида Республика миқёсидаги илмий-амалий конференция материаллари, 22-23 аперль, 2020 й. НамМҚИ, Наманган, С. 264-266.
 11. Зияитдинов Ж., Муйдинова М., Гуломов Ж. Фронтал сирти текстурланган куёш элементи оптик хусусиятларининг назарий таҳлили. // Сборник тезисов “Международной научной конференции “Наноструктурные полупроводниковые материалы в фотоэнергетике”, 9-10 окт., 2020 й. ТГТУ, Ташкент, С. 110-113.
 12. Абдувохидов М.К., Гуломов Ж.Ж., Алиев Р., Зияитдинов Ж., Муйдинова М. Цифровое моделирование температурных свойств кремниевых солнечных элементов. // Сборник тезисов “Международной научной конференции “Наноструктурные полупроводниковые материалы в фотоэнергетике”, 9-10 окт., 2020 й. ТГТУ, Ташкент, С. 108-110.
 13. Алиев Р., Гуломов Ж., Абдувохидов М., Алиев С., Зияитдинов Ж. Стимулирование поглощения солнечного излучения в тонких слоях кремниевых структур при помощи наночастиц металлов. // Сборник тезисов докладов V Международной научной конференции «Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниковых микро- и наноструктурах». 13-14 нояб., 2020 г., ФерПИ, Фергана, С. 167-172.
 14. Зайнабидинов С.З., Алиев Р., Юлдашева Н., Зиётдинов Ж. Металл нанозарраларда фотоэмиссия. // Академик С.З.Зайнабидиновнинг 75 йиллик таваллудига бағишланган “Замонавий микроэлектрониканинг ривожланишида фан, таълим инновация интеграцияси” Республика илмий-услугий анжумани материаллари. 24-25 декабрь 2020 й., АндДУ, Андижон, С. 178-179.
 15. Ziyoidtinov J. Kremniy asosli quyosh elementlarining fotoelektrik parametrlariga haroratning ta`siri. // Академик С.З.Зайнабидиновнинг 75 йиллик таваллудига бағишланган “Замонавий микроэлектрониканинг ривожланишида фан, таълим инновация интеграцияси” Республика илмий-услугий анжумани материаллари. 24-25 декабрь 2020 й., АндДУ, Андижон, С. 340-342.
 16. Муйдинова М.А., Зиётдинов Ж.Н., Эралиев А.Ж. Металлоксид оптик қатламли структураларнинг оптик характеристикалари. // Академик С.З.Зайнабидиновнинг 75 йиллик таваллудига бағишланган “Замонавий

- микроэлектрониканинг ривожланишида фан, таълим инновация интеграцияси” Республика илмий-услубий анжумани материаллари. 24-25 декабрь 2020 й., АндДУ, Андижон, С. 368-370.
17. Aliev R., Ziyoidtinov J., Qahhorov J., Rashidov B. Kremniy asosli quyosh elementining asosiy fotoelektrik parametrlarining temperatura va yorug'lik intensivligiga bog'liqligi. // Материалы международной конференции «Тенденции развития физики конденсированных сред», 25 мая, 2021 г. – ФерДУ, Фергана, С. 234-238.
 18. Ziyoidtinov J., Aliev R., Nosirov M., G'ulomov J. Kremniy va yurqa quyosh elementlarining xususiyatlariga temperatura ta'sirining fizik asoslari. // “Ёш олимлар ва физик талабаларнинг I Республика илмий анжумани материаллари” мавзусида Республика миқёсидаги илмий-амалий конференция материаллари, 21 апрель, 2021 й. ЎЗМУ ҳузуридаги Яримўтказгичлар физикаси ва микроэлектроника илмий-тадқиқот институти, Тошкент, С.179-180.
 19. Алиев Р., Зиёитдинов Ж., Носиров М. Влияние температуры на фотоэлектрические процессы в кремниевых солнечных элементах с наночастицами. // Материалы международной конференции «Роль передовых инновационных технологий и образования в решении задач автоматизации и энергетики, направленная на повышение энергоэффективности производств и социальной сферы» 24-25 июня, 2021 г, НамМТИ, Наманган, С. 387-389.
 20. Aliev R., Ziyoidtinov J., Gulomov J., Abduvohidov M., Urmanov B. Digital modelling of influence of temperature on photo-electric processes in silicon solar cells. // Материалы XXII Международной научно-практической конференции “Энергетическая эффективность в XXI столетии”, Киев, 20-21 май, 2021, С. 532-536.
 21. Gulomov J., Aliev R., Mirzaalimov A., Abduvoxidov M., Kakhkhorov J., Mirzaalimov N., Rashidov B., Ziyoidtinov J., Temirov S., Eraliev A., Izzatillaev Kh. Oddiy va nanozarracha kiritilgan kremniy asosli quyosh elementining fotoelektrik parametrlarini yorug'likning tushish burchagiga bog'liqligi. // Междисциплинар-ный научный журнал «Общество и инновации» (2021) в.2, № 1 С. 13-22.

Илмий раҳбар

Р.Алиев

Талабгор

Ж.Н.Зиёитдинов

Авторефератнинг ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги нусхалари
Фарғона политехника институти муассислигидаги “**Scientific technical
journal**” журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилди.
(_____2022й.)

Босишга рухсат этилди: 2022 й. Нашриёт босма табағи—3,5.
рақамли босма усули. Times гарнитураси.
Шартли босма табағи—1,75. Бичими 64x108 1/16. Адади 100.

“Poligraf Super Servis” МЧЖ
150100. Фарғона шаҳар, Авиасозлар кўчаси 2-уй

