

**ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ҚОШИДАГИ
ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАР ФИЗИКАСИ ВА МИКРОЭЛЕКТРОНИКА
ИЛМИЙ-ТАДҚИҚОТ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ФАЛСАФА
ДОКТОРИ ИЛМИЙ ДАРАЖАСИНИ БЕРУВЧИ
PhD.30.08.2018.ФМ/Т.01.12 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

**ЎЗБЕКИСТОН ФАНЛАР АКАДЕМИЯСИ
ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ**

ТУКФАТУЛЛИН ОСКАР ФАРИТОВИЧ

**ИССИҚ ИҚЛИМ ШАРОИТИДА n - ВА p -ТИП ЎТКАЗУВЧАНЛИ
КРИСТАЛЛИ КРЕМНИЙ АСОСИДАГИ САМАРАЛИ ҚУЁШ
ЭЛЕМЕНТЛАРИ ВА ФОТОИССИҚЛИК АЙЛАНТИРГИЧЛАР
ИШЛАНМАСИ**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси (техника фанлари)

**ТЕХНИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Тошкент – 2019

**Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD)
диссертацияси автореферати мундарижаси**

**Оглавление автореферата диссертации
доктора философии (PhD) по техническим наукам**

**Contents of dissertation abstract
of doctor of philosophy (PhD) on technical sciences**

Тукфатуллин Оскар Фаритович

Иссиқ иқлим шароитида *n*- ва *p*-тип ўтказувчанли кристалли кремний асосидаги самарали қуёш элементлари ва фотоиссиқлик айлантиргичлар ишланмаси 3

Тукфатуллин Оскар Фаритович

Разработка эффективных солнечных элементов и фототеплопреобразователей из кристаллического кремния *n*- и *p*-типа проводимости для условий жаркого климата 27

Тукфатуллин Оскар Фаритович

Development of efficient solar cells and photovoltaic/thermal systems made of crystalline silicon of *n*- and *p*-type conductivity for hot climate conditions 51

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works 55

**ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ҚОШИДАГИ
ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАР ФИЗИКАСИ ВА МИКРОЭЛЕКТРОНИКА
ИЛМИЙ-ТАДҚИҚОТ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ФАЛСАФА
ДОКТОРИ ИЛМИЙ ДАРАЖАСИНИ БЕРУВЧИ
PhD.30.08.2018.ФМ/Т.01.12 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

**ЎЗБЕКИСТОН ФАНЛАР АКАДЕМИЯСИ
ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ**

ТУКФАТУЛЛИН ОСКАР ФАРИТОВИЧ

**ИССИҚ ИҚЛИМ ШАРОИТИДА n - ВА p -ТИП ЎТКАЗУВЧАНЛИ
КРИСТАЛЛИ КРЕМНИЙ АСОСИДАГИ САМАРАЛИ ҚУЁШ
ЭЛЕМЕНТЛАРИ ВА ФОТОИССИҚЛИК АЙЛАНТИРГИЧЛАР
ИШЛАНМАСИ**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси (техника фанлари)

**ТЕХНИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Тошкент – 2019

Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида № В2019.2.PhD/T1045 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси С.А. Азимов номидаги «Физика – Куёш» ИИБ Физика-техника институтида бажарилган.

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

Илмий раҳбар:

Турсунов Мухаммад Нишанович
техника фанлари доктори

Расмий оппонентлар:

Абдукадыров Мухитдин Абдурашитович
техника фанлари доктори, профессор

Тачилин Станислав Анатольевич
техника фанлари номзоди, доцент

Етакчи ташкилот:

Фарғона давлат университети

Диссертация ҳимояси Ўзбекистон Миллий университети қошидаги Яримўтказгичлар физикаси ва микроэлектроника илмий тадқиқот-институти ҳузуридаги фалсафа доктори илмий даражасини берувчи PhD.30.08.2018.FM/T.01.12 рақамли илмий кенгашнинг 2019 йил « ___ » _____ соат ___ даги мажлисида бўлиб ўтади (Манзил: 100057, Ўзбекистон, Тошкент шаҳри, Янги Олмазор кўчаси, 20-ўй. Тел.: (+998) 71-248-79-94, факс: (+998) 71-248-79-92, e-mail: info@ispm.uz), ЎЗМУ қошидаги ЯФМ ИТИ мажлислар зали.

Диссертация билан Ахборот технологияларини жорий этиш бўлимида танишиш мумкин (___ рақам билан рўйхатга олинган). Манзил: 100057, Ўзбекистон, Тошкент шаҳри, Янги Олмазор кўчаси, 20-ўй. Тел.: (+998) 71-248-79-94.

Диссертация автореферати 2019 йил « ___ » _____ да тарқатилди.

(2019 йил « ___ » _____ даги ___ рақамли реестр баённомаси).

Ш.Б. Утамурадова

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

С.С. Насриддинов

Фалсафа доктори илмий даражасини берувчи
Илмий кенгаш котиби, т.ф.д., доцент

А.Т. Мамадалимов

Фалсафа доктори илмий даражасини
Илмий кенгаш қошидаги илмий семинар раиси,
ф.-м.ф.д., профессор, академик

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳонда бугунги кунда гелиоэнергетика соҳасида асосий тенденциялардан бири яримўтказгичли фотоэлектрик технологиялар ютуқларидан фойдаланиш катта аҳамиятга эга. Шунинг учун қуёш энергиясининг тўғридан-тўғри яримўтказгичли элементларини электр энергиясига айлантириш доимий долзарб мавзулардан бўлиб қолмоқда. Бунда чекланмаган муддат давомида эксплуатация қилиш имконини берувчи ишончли ва универсал ўзгарткич қурилмаларининг назарий асосларини ишлаб чиқиш ва ушбу фотоэлектрик модуллардан ҳар қандай масштабдаги энергетик тизимларни яратиш муҳим вазифаларидан бири бўлиб қолмоқда.

Бугунги кунда дунёда яримўтказгичли қуёш элементларидан фойдаланишнинг бош муаммоларидан бири уларнинг параметрлари ва тавсифларини эксплуатация шарт-шароитларига боғлиқлиги ҳисобланади. Кўпчилик ишлаб чиқарувчилар ердаги қуёш нурланишига мувофиқ бўлган спектрдаги АМ1.5G тенг атмосфера массасидаги қуёш элементлари ва фотоэлектрик модулларнинг сертификациясини ўтказадилар. Ушбу ҳолат максимал қувватдан олинувчи фойданинг камайишига ва қуёш элементларининг максимал ФИК пасайишига ва бунинг оқибатида фотоэлектрик модулларнинг ҳам пасайишига олиб келади. Бунда нурланиш оқимининг интенсивлиги 1000 Вт/м^2 тенг, фотоэлектрик модульнинг ҳарорати эса $25 \text{ }^\circ\text{C}$ атрофидаги ҳаво ҳароратига тенг бўлиши лозим. Реал шароитларда (Ўзбекистоннинг иссиқ континентал иқлим шароитларида) ҳатто, салқин жойдаги ҳавонинг ҳарорати ($\geq 40 \text{ }^\circ\text{C}$) дан анча юқори, қуёш радиацияси оқими билан нурланувчи юзанинг ҳарорати, айниқса, ёз ойларида сертификация шартларига мос келувчи ҳароратдан ($> 70 \text{ }^\circ\text{C}$) ҳам ошади. Мазкур ҳолат максимал қувват олинишини камайтиради ва демак қуёш элементларининг максимал ФИК ва бунинг оқибати бўлмиш фотоэлектрик модулларни камайишига олиб келади.

Шунинг учун яримўтказгичли қуёш элементларини ва фотоэлектрик модуллари қувватини ва ўзгартириш ФИКни ошириш муаммоларининг ҳал этилиши талаб этилади. Юқори ҳаво ҳарорати ва қизишга олиб келувчи қуёш нурланиш спектр таркиби каби ўзига хос жиҳатларга эга бўлган Ер шарининг иссиқ минтақаларидаги қурғоқчил иқлим шароитларида самарали ишлаш лаёқатига эга янги конструкцияларни ишлаб чиқиш масаласи муҳим аҳамиятга эга.

Мазкур тадқиқот иши Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2013 йил 1 мартдаги «Муқобил энергия манбаларини янада ривожлантириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги ПФ-4512-сон¹ фармони ва Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 26 майдаги «2017–2021 йилларда муқобил энергияни янада ривожлантириш, иқтисодиёт ва ижтимоий соҳалар энергия самарадорлигини ошириш бўйича чоралар дастури тўғрисида»ги

¹ Указ Президента Республики Узбекистан от 01.03.2013 г. № УП-4512 «О мерах по дальнейшему развитию альтернативных источников энергии». Собрание законодательства Республики Узбекистан, 2013 г. № 10 (562), Ст. 124. – СС. 90–93.

ПҚ-3012-сон¹ қарорида келтирилган муқобил энергияни ривожлантиришнинг устувор йўналишларига мувофиқ бажарилган.

Шунингдек, ушбу диссертация Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги «2017–2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги ПФ-4947-сон² Фармонида ва 2017 йил 13 февралдаги «2017–2021 йилларда электро-техника саноатини бошқаришни тез суратлар билан ривожлантириш ва диверсификациялаш чора-тадбирлари тўғрисида»ги ПҚ-2772-сон³ қарори, 2017 йил 17 февралдаги «Фанлар Академияси фаолиятини, илмий-изланишга оид ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги ПҚ-2789-сон⁴ қарори ва фан ва технологиялар соҳасида қабул қилинган бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда кўзда тутилган вазифаларнинг бажарилишига муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялар ривожланишининг «III. Энергетика, энергиятежамкорлик, транспорт, машина ва асбобсозлик; замонавий электроника, микроэлектроника, фотоника ва электрон асбобсозликни ривожлантириш» устувор йўналишига мос илмий дастурлар доирасида бажарилган.

Муаммони ўрганилганлик даражаси. Ҳароратни қуёш элементлари ва фотоэлектрик модуллар параметрлари ва тавсифларига таъсир кўрсатишга бўлган қизиқиш 1970 йилларда чиқарилган илмий нашрларда акс эттирилган. Жумладан, Д.Л. Эванс ва Л.В. Флоршютс (Аризона штати Университети, АҚШ) биринчи бор ҳароратни кўтарилиши билан кремнийли монокристалл элементлар ва модуллар қуввати ва ФИК чизиқли камайишини кўрсатиб бердилар. Ҳозирги вақтгача охириги икки ўн йилликда қиздиришни кремнийли моно- ва мультикристалли элементлар ва модулларига таъсирини назарий ва амалий нуқтаи назардан П. Вурфель (Амалий физика институти, Германия), Т. Маркварт (Саутгемптон Университети, Буюк Британия), И. Тобайас, К. дель Канизо (Мадрид политехника Университети, Испания) Х. Алонсо (ISOFOТON, Испания), Т.Т. Чау (Фан ва техника коллежи, Хитой) ва бошқалар томонидан ўрганилган. Уларда элементлар ва модулларнинг ишчи ҳароратининг кўтарилиши, ўзгариш самарадорлигини чизиқли пасайтириши ва чиқиш қувватини камайтириши кўрсатиб берилди.

¹ Постановление Президента Республики Узбекистан от 26.05.2017 г. № ПП-3012 «О программе мер по дальнейшему развитию возобновляемой энергетики, повышению энергоэффективности в отраслях экономики и социальной сфере на 2017–2021 годы». Собрание законодательства Республики Узбекистан, 2017 г. № 22 (782), ст. 424. – СС. 323–346.

² Указ Президента Республики Узбекистан № УП-4947 от 07.02.2017 г. «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан». Собрание законодательства Республики Узбекистан, 2017 г. № 6 (766), ст. 70. – С. 223–248.

³ Постановление Президента № ПП-2772 от 13 февраля 2017 г. «О мерах по дальнейшему совершенствованию управления, ускоренному развитию и диверсификации электротехнической промышленности на 2017–2021 гг.». Национальная база данных законодательства, 13.02.2017 г.

⁴ Постановление Президента Республики Узбекистан от 17.02.2017 г. № ПП-2789 «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности». Собрание законодательства Республики Узбекистан, 2017 г. № 8 (768), ст. 117. – СС. 289–300.

Ўзбекистонда яримўтказгичли кремнийли қуёш элементлари ва фотоэлектрик модулларнинг қизиши билан боғлиқ муаммоларни ечиш билан шуғулланувчи замонавий илмий мактабни асосчиси ва бошқарувчиси таниқли олим М.Н. Турсунов ҳисобланади. Мазкур йўналиш бўйича унинг шогирдларидан А.Г. Комилов ва И.А. Йўлдошев тадқиқотлар олиб борган. Фотоиссиқлик ўзгарткичлари ва улар асосидаги тизимлардаги иссиқлик жараёнларини назарий таҳлил қилинишига Р.Р. Авезов, Ш.И. Клычев, Ж.С. Ахатов каби олимларнинг бир қатор ишлари бағишланган. Хорижда ушбу йўналиш бўйича кўпсонли мутахассислар иш олиб борган. Булардан энг таниқлилари Т.Т. Чау (Гонконг), Ю. Трипаногоностопулос (Греция), А.С. Джоши (Канада), Х.А. Зондаг (Нидерландия) ва бошқалар ҳисобланади.

Тадқиқотнинг диссертация бажарилган олий таълим муассасаси илмий тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Тадқиқот иши Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси «Физика – Қуёш» ИИБ Физика-техника институтида А-12-007 «Қишлоқ аҳолиси учун кўчма фотоэлектрик таъминот манбаини ишлаб чиқиш ва яшаш» (2013–2015 йй.), МК-47/2012 халқаро ўзбек-корейс илмий-техник лойиҳаси ва «Чорвачилик ферма объектларини энергия билан таъминлаш учун фотоэлектрик, фотоиссиқлик ва биогаз қурилмалари асосида автоном кўп функцияли мажмуа яратиш ва уни ишга тушириш» (2013–2014 йй.) номли ИЗ-ФА-0-11738 инновацион лойиҳасининг «Иссиқ иқлимли шароитларда самарали ишловчи, кремнийли қуёш элементлари асосидаги фотоэлектрик қурилма ишлаб чиқиш» мавзусидаги А-12-007 давлат илмий-техник лойиҳаси доирасида ўтказилган илмий-тадқиқот ишлар режасига мувофиқ бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади иссиқ иқлимли шароитларда электр энергиясини генерацияланиши учун мўлжалланган кремнийли қуёш элементлари, фотоэлектрик модуллар ва суюқлик туридаги комбинирланган фотоиссиқлик ўзгарткичларини ишлаб чиқишдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

2–10 Ом·см солиштирма қаршилик ва саёз жойлашган $p-n$ -ўтишларга ($\leq 1\text{мкм}$) эга бўлган, юпқа базали ($\leq 200\text{мкм}$) кремнийли монокристалл қуёш элементларидан фотоэлектрик модуллар ишлаб чиқиш;

дастлабки материалнинг электрофизик хусусиятларига боғлиқ равишда салт кучланиш, қисқа туташув токи ва кремнийли монокристалл фотоэлектрик модулларининг вольтампер тавсифларини ҳароратга боғлиқлик ҳолатларини аниқлаш;

стандарт 36 элементли кремнийли моно- ва мультикристалл фотоэлектрик модуллардан фойдаланилишида кўрғошин-кислотали аккумулятор батареялари зарядларини қиздиришда паст даражада бўлиш сабабларини аниқлаш ва иссиқ иқлимли шароитларида ишлашга мўлжалланган фотоэлектрик тизимларни ишлаб чиқиш;

аккумулятор батареяларини зарядланиш ва зарядсизланиш хусусиятларини кремнийли моно- ва мультикристалл фотоэлектрик модулларга боғлиқлик ҳолатларини ҳисобга олувчи заряд контроллерини ишлаб чиқиш;

унинг иссиқлик ва механик параметрларини ва тавсифларини аниқлаш учун мўлжалланган текис фотоиссиқлик ўзгарткич иссиқлик моделини яратиш;

электр энергияси олиш учун текис конструкцияли суқ иссиқлик ташувчига эга, эркин циркуляцияланувчи ва фотоэлектрик модулдан паст потенциал иссиқлик энергиясини олувчи автоном фотоиссиқлик ўзгартгичли тизимларни ишлаб чиқиш.

Тадқиқот объекти сифатида иссиқ иқлим шароитларида самарали ишловчи фотоэлектрик элементлар, модуллар ва тизимлар конструкциялари ҳисобланади.

Тадқиқот предмети суюқликли совутишдан фойдаланувчи яримўтказгичли қуёш элементлари, фотоэлектрик модуллар ва комбинирланган фотоиссиқлик ўзгартгичлар яшаш усуллари, шунингдек уларнинг ҳароратга боғлиқ электрик, механик ва иссиқлик хусусиятлари ҳисобланади.

Тадқиқотнинг усуллари. Диссертация ишини бажариш жараёнида технологик услублар (механик ишлов, кимёвий зарарсизлантириш, газ фазаси ичидан диффузияланиш, вакуумли чанглаш, скрайбирлаш, кавшарлаш, герметизациялаш) электрик ва иссиқлик параметрларини ўлчаш услублари (кучланишлар, тоқлар, қувват, ФИК, ҳароратлар) ва тавсифлар (ВАХ, электрик ва иссиқлик тавсифларини вақт ва ҳароратга боғлиқлиги) ва иссиқлик жараёнларини моделлаштиришнинг математик услублари қўлланилди.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

2 ва 10 Ом·см солиштирма қаршилик ва саёз жойлашган $p-n$ -ўтишларга (≤ 1 мкм) эга бўлган юпқа, базали (≤ 200 мкм) қаттиқ жисмли диффузандлардан термодиффузия услубида олинган кремнийли монокристалл қуёш элементларидан фотоэлектрик модуллар ишлаб чиқилган;

илк бор монокристалл кремнийли қуёш элементларидан ясалган, аммо турли ўтказувчанлик ($\rho(n) = 2$ Ом·см) ва $\rho(p) = 10$ Ом·см) ва солиштирма қаршиликдаги, стандарт синов шароитларидаги ҳароратдан 2–3 марта юқори ҳароратларгача қуёш нурланиши билан бир хилда киздирилишида ($T_{\text{ФЭМ}} > [2 \div 3] \times T_{\text{СТС}}$) 2–3 салт юриш кучланиши ($\Delta U_{\text{ХХ}}/\Delta T$) ва қисқа туташув тоқи ($\Delta I_{\text{КЗ}}/\Delta T$) ҳарорат коэффицентлари ўртача 1,5 мартага фарқ қилиши исботланган;

($T_{\text{ФЭМ}} \geq T_{\text{СТС}}$) стандарт синов шароитларидаги ҳароратдан 2–3 марта юқори бўлган ($T_{\text{ФЭМ}}$) модуллар ҳароратларидаги 36 кремнийли моно- ва мульткристалл қуёш элементларидан иборат стандарт фотоэлектрик модулларнинг оптимал қувват нуктасидаги кучланишнинг камайиши муносабати билан буферли қўрғошин-кислотали аккумулятор батареялари заряди ($I_{\text{ФЭМ}} \sim (T_{\text{ФЭМ}})^{-1}$) модульнинг ҳароратига тескари мутаносиб тоқ орқали содир бўлиши аниқланган;

илк бор 40 кремнийли қуёш элементларидан иборат фотоэлектрик модуллар ва улар асосида киздириш натижасида юзага келувчи кучланиш етишмовчилигини компенсациялаш имконини берувчи тизимлар ишлаб чиқилган;

илк бор салт юриш кучланишини ютувчи юза ҳароратига боғлиқликлар фарқини аниқлаш имконини берувчи эркин циркуляцияланувчи суюқлик туридаги текис конструкцияли фотоиссиқлик ўзгартгичи ва фотоиссиқлик ўзгартгичдаги қуёш элементларининг ҳароратини аниқлаш усули ишлаб чиқилган;

илк бор иссиқлик ташувчининг контакти фотоэлектрик модулининг орқа юзасидан полиэтилен қават орқали содир бўлувчи эркин циркуляцияланувчи суёқ турдаги текис конструкцияли фотоиссиқлик ўзгартгичлари ишлаб чиқилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

Иссиқ иқлимли шароитларда ишлатиш учун мўлжалланган кремнийли монокристалл қуёш элементлари ва модулларини яшаш усули ишлаб чиқилган;

Стандарт синов шароитларига нисбатан юқори ҳароратларда ишлашга мўлжалланган кремнийли кристалл фотоэлектрик модулларга эга фотоэлектрик тизимларнинг турли конструкциялари такомиллаштирилган;

Иссиқ иқлим шароитларида ишлашга мўлжалланган, фотоэлектрик модуллардан олинувчи заряднинг ўзига хос хусусиятларини ҳисобга олувчи қўрғошин-кислотали аккумулятор батареялари заряд контроллери яратилган;

Кристалл материалининг сони ва тури бўйича турли кремнийли фотоэлектрик модуллардан тузилган эркин циркуляцияланувчи суёқ иссиқлик ташувчили стационар ва олиб юрилувчи текис фотоиссиқлик ўзгартгич тизимлари конструкциялари яратилган;

Текис фотоиссиқлик ўзгартгичининг иссиқлик ва механик параметрларини ҳисоблашни амалга ошириш имконини берувчи дастурлар мажмуаси ишлаб чиқилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги қуёш нурланишини фотоэлектрик ўзгартириш бўйича ҳозирги замон илмий тасаввурлар назариясидан ва улар асосидаги элементлар ҳамда тизимлардан, текис сув иситувчи қуёш коллекторларидаги иссиқлик жараёнлари тўғрисидаги тасаввурлардан, шунингдек уларнинг параметрлари ва тавсифларини экспериментал тадқиқ этиш стандарт услубларидан фойдаланилган ҳолда экспериментал тадқиқотларда ўлчов асбоблари, синов стендлари ва Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси «Физика – Қуёш» ИИБ ФТИ синовлар полигони ва синов-технологик базасидан фойдаланилди. Ҳисоблашларда шу каби ишларнинг ўтказилишида кенг фойдаланилувчи услублар ва ҳисоблаш воситаларидан фойдаланилган ҳолда фотоэлектрик модуллар ва тизимларни 5–6 йил мобайнида комбинирланган фотоиссиқлик ўзгартгичлар тизими 3 йил давомида синаш ишлари ўтказилиши билан таъминланган.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Олинган натижалар электр ва иссиқлик энергияларни суёқ иссиқлик ташувчили фотоиссиқлик ўзгартгичли тизимларда генерацияланиш жараёнларини ўзаро боғлиқлиги тўғрисидаги тасаввурларни кенгайтириш имконини беради. Фотоэлектрик элементлар ва модуллар яшашнинг технологик услублари, турли мақсадларга мўлжалланган фотоэлектрик тизимларнинг ишлаб чиқилган конструкциялари ва ишлаб чиқилган ускуналарни эксплуатацион синовларида тўпланган тажриба, иссиқ иқлимли шароитларда ишланишнинг ўзига хослигини ҳисобга олувчи ускуналар ва асбобларни ишлаб чиқарилишини (локализация) маҳаллийлаштириш имконини беради.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Иссиқ иқлим шароитида кремний асосидаги самарали қуёш элементлари ва фотоиссиқлик айлантргичлар ишланмасини яратиш асосида:

термодиффузия услубида олинган кремнийли монокристалл қуёш элементлари асосида ишлаб чиқилган фотоэлектрик қурилма модулига Ўзбекистон Республикаси Давлат патент идорасининг саноат намунасига патенти олинган («Фотоэлектрик қурилма модули», SAP 00859-сон, 2010 й.). Ишлаб чиқилган фотоэлектрик қурилма модули фойдали иш коэффицентини ошириш имконини берган;

эркин циркуляцияланувчи суюқлик туридаги текис конструкцияли фотоиссиқлик ўзгартгичи ва фотоиссиқлик ўзгартгичдаги қуёш элементларининг ҳароратини аниқлаш усули асосида яратилган Қуёш коллектор-фото-иссиқлик-ўзгартрувчи комбинацияланган фотоэлектрик қурилмаси III Республика Инновацион ғоялар, технологиялар ва лойиҳалар ярмаркасида «Ёш олимлар ва талабаларнинг энг яхши инновацион лойиҳаси номинацияси» ғолиби бўлган (2010 й.). Ишлаб чиқилган фотоэлектрик қурилма энергияни тежаш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Диссертация ишининг асосий натижалари 6 та ҳалқаро ва 5 та республика миқёсидаги илмий-амалий конференцияларда муҳокама қилинган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация материаллари бўйича 25 та илмий ишлар, шу жумладан 11 та илмий мақола-лар Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссияси томонидан тавсия этилган журналларда, шуларнинг 7 таси чет эл журналларида нашр этилди, 12 та маърузалар тезиси конференция материаллари тўпламида ва 2 та патент фойдали модель ва саноат намунаси сифатида чоп этилди.

Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши. Диссертация иши кириш қисм, тўрт боб, хулоса ва фойдаланилган адабиётлар рўйхати, иловалардан иборат. Диссертациянинг ҳажми 126 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида ўтказилган тадқиқотларнинг долзарблиги ва зарурати асосланган, тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари, объект ва предметлари тавсифланган, республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, олинган натижаларнинг илмий ва амалий аҳамияти очиқ берилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий қилиш, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг «**Яримўтказгичли қуёш элементлари, фотоэлектрик модуллар ва фотоиссиқлик ўзгартгичлари**» деб номланган биринчи боб турли яримўтказгич материалларидан ясалган бир фазали қуёш элементларининг (ҚЭ) маълум бўлган турларига ва фотоэлектрик модуллар (ФЭМ) конструкцияси тўғрисидаги адабиётлар обзорида бағишланган. Моно-ва поликристалл ҚЭ конструкцияси ва материаллари билан боғлиқ асосий

йўқотилишлар таҳлили келтирилган, ҳароратни ҚЭ ва ФЭМ га кўрсатадиган таъсири ва уни пасайтириш усуллари кўриб чиқилган. Суюқлик туридаги фотоиссиқлик ўзгартгичлари (ФИЎ) ва фотоиссиқлик ўзгартгичли тизимларнинг (ФИЎТ) ишлаш принципи кўриб чиқилган. Адабиётларда берилган маълумотларни таҳлил қилиш асосида диссертация ишининг мақсад ва вазифалари белгиланган.

«Кремнийли қуёш элементлари ва фотоиссиқлик ўзгартгичларини ишлаб чиқиш» деб номланган иккинчи боб иссиқ иқлимли шароитларда самарали ишлаши учун кремнийли ҚЭ, ФЭМ ва ФИЎТ ишлаб чиқилишининг илмий ва технологик жиҳатларига бағишланган.

Босқичлар тарзида дастлабки асосларни саралаш босқичидан бошлаб, элементларни ФЭМ ҳолида бирлаштириш онигача бўлган ҚЭ ясаиш технологияси кўриб чиқилган. Бу технология 76 мм ўтказувчанлик диаметрига эга, *n*- ва *p*-турдаги кремний монокристалл пластинкаларидан ҚЭ ясашга мўлжалланган.

Заводда ишланган 300 мкм ±10% қалинликдаги монокристалл кремний пластинкаларини қўлланиши билан боғлиқ анъанавий технологиядан фарқли равишда, таклиф этилаётган технологик схема, яримўтказгичли асбоблар ва микросхемалар ясаишида бракланишдан ўтмаган пластинкалардан фойдаланиш имконини беради, бу эса цикл бошида саралаш босқичи киритилишини талаб этади.

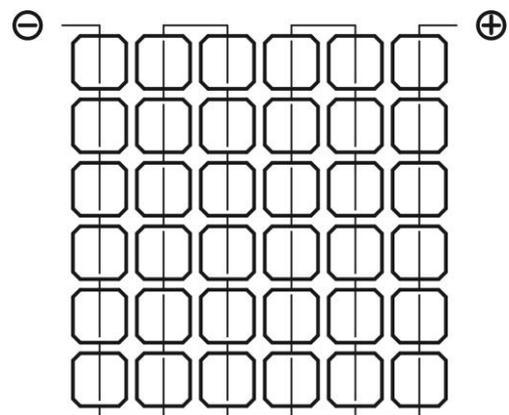
Иккинчи босқич дастлабки материалнинг ўзига хос хусусиятларини ҳисобга олган ҳолда модификацияланган ва аввал олинган эпитаксиал ва диффузион қатламларни йўқотиш учун зарур бўлган, пластинкаларни узоқ вақт жилвирланишини ўз ичига олади. Кремнийли пластинкаларнинг юқори мўртликда бўлиши, 200 мкм ±10% қиймат билан чекланган максимал эришилувчи қалинликни чегаралайди, бу қизишга олиб келувчи, кремний пластинкаси томонидан қуёш нурунинг инфрақизил соҳасининг бир қисмини ўтказилишини ошириш учун айнан берилган қалинлик талаб қилинишидаги шартга мос келади. Қалинликни бундан кейинги камайиши структурани тайёрланиш жараёнида бракни кўпайишига олиб келади.

Диффузион жараёнлар очик қувурли СДО-125/3-15,0 электр печида ўтказилди. Бор нитриди пластинкалари азот кислотасида тозаланиб, 600 °С ҳароратда қуритилгандан кейин кварц қайиқча воситасида реакторга киритилди. Реакторни бор билан тўйинтириш 1100 °С ҳароратда 60 мин давомида амалга оширилди. Диффузия жараёни 1050 °С ҳароратда ўтказилди. Бор нитрид ва кремний (КЭФ-10) пластинкалари ўртасидаги масофа 2–2,5 мм (эмпирик равишда танланди) атрофида сақлаб турилди. *p–n*-ўтишнинг ётиш чуқурлиги режимга боғлиқ равишда 0,4–1 мкм. Бор диффузия жараёнини ўтказилишида, инерт муҳит сифатида азот ёки куруқ ҳаводан фойдаланилди. Бундан кейинги операцияларни ўтказиш учун *p–n*-ўтиш пластинкаларнинг орқа томонидан М7 микрокукунлар билан жилвирлаш орқали йўқотилди, боросиликат шиша эса фронталь юзадан плавик кислота орқали йўқотилди.

Фосфорнинг диффузияси 1030–1050 °С ҳароратларда 20–40 минут давомида ўтказилди. Бунда p - n -ўтишнинг ётиш чуқурлиги 0,4 дан 0,7 мкм гача миқдорни ташкил қилди (КДБ-2) пластинкасининг орқа томонидан p - n -ўтишни йўқотилиши ва фронталь юзани фосфорсиликат шиша қолдиқларидан тозалаш бор диффузиясидаги каби амалга оширилди. Изотип p - p^+ -ўтиш пластинкаларнинг орқа томонидан алюминийни юмшатиш услуби орқали амалга оширилди. Фосфор диффузияси билан саёз ётувчи p - n -шаклланишидан кейин, қарши p - n -ўтиш структуранинг орқа томонидан йўқотилди. Сўнг кремний монооксиддан ҳимоя қопламани қўллаш орқали алюминийни юмшатилиши билан пластинкаларнинг орқа томонида p - p^+ -ўтиш шакллантирилди. ҚЭ юзасида кичик омли ом контактини ҳосил қилиш учун, контакт тўрини таглик билан яхши адгезияланишига эришилиш имконини берувчи, Ti – Ni – Cu дан ташкил топган кўпқатламли тизимдан фойдаланилди. Фронтал юзада ёритилувчи қопламни яратиш учун, ион чанглаш бўйича экспериментларда экспериментал тарзда фундаментал хусусиятлари ўрганилган (SiO_x ($x = 1\div 2$)) кремний оксидларидан фойдаланилди. Si_nO_m^- ($n = 1\div 7$, $m = 1\div 15$) ва Si_nO_m^+ ($n = 1\div 3$, $m = 1\div 4$) кластер ионларининг барқарорлиги ва структура схемалари ўрганилди. Энг барқарор кластер ионлари (SiO_2) кремний диоксида мономер ва заряд ташувчи (O) кислороддан ташкил топган комплекс ионлар эканлиги аниқланди. Мазкур ҳолат SiO_2 қатламларининг юқори кимёвий турғунлигини белгилайди.

ФЭМ ва ФИЎ яшаш жараёнлари баён этилди. Хусусан, ФЭМ даги ҚЭ намликбардош герметизациясига алоҳида эътибор қаратилди. Натижада n -турдаги ҚЭ дан $\rho = 2 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ҳамда p -турдаги $\rho = 10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ўтказувчанликдаги 36 элементдан ташкил топган ФЭМ олинди (1-расм).

Иссиқлик аккумулятори ва ФИЎТ таянч-йўналиш механизмининг ишлаб чиқариш технологияси ва унинг ўзига хос хусусиятлари баён этилди. Иссиқлик аккумулятори ва таянч йўналиш олувчи ФИЎТ механизмининг ишлаб чиқарилиш технологияси ва унинг ўзига хос хусусиятлари баён



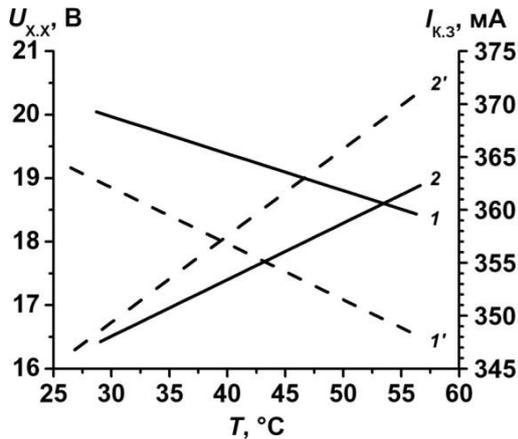
а) б)
1-расм. 36 кремний монокристалл ҚЭ дан иборат ФЭМ:
а) фотография; б) электр уланишлар схемаси.

қилинган. Аккумуляцияловчи тизим конструкциясини оддийлиги, энергияни ўзгаришига бўлган йўқотилишлар мавжуд бўлувчи, иссиқлик алмаштиргични истисно этади, иссиқлик аккумуляцияловчи модда сифатида эса бир вақтнинг ўзида иссиқлик ташувчи бўлган сувдан фойдаланилади.

«Иссиқ иқлимли шароитларда ишловчи қуёш элементлари, фотоэлектрик модулларни ва тизимларни синаш» деб номланган учинчи боб иссиқ иқлим шароитларига мўлжаллаб ясалган кремнийли ҚЭ ва ФЭМ асосий электрик параметрларини синаш ва таҳлил қилишга бағишланган. Монокристалл кремний пластинкаларининг икки туридан фойдаланилди. Иккала турларнинг дастлабки тагликлари 76 мм диаметрга эга. Биринчи тури интеграл схемаларни ишлаб чиқарилиш жараёнида бракка чиқарилди ва фосфор билан легирланган n -тур ўтказувчанликдаги эпитаксиал қатламнинг 3,3–20 мкм қалинлигига эга бўлди, бунда эпитаксиал қатламнинг солиштира қаршилиги 0,8–7,5 Ом·см чегарасида ўзгартирилди. Бор билан легирланган (КДБ-10) p -турдаги ўтказувчанлик тагликлари (111) текисликдаги кристаллографик ўқлар йўналиши билан 300–380 мкм қалинлик ва $\rho = 10$ Ом·см солиштира қаршиликка эга бўлди. Эпитаксиал қатламни йўқотилишидан кейин фосфорни ~1 мкм чуқурликда диффузиялаш орқали p - n -ўтиш тайёрланди. Тагликларни иккинчи тури бўлиб фосфор билан легирланган n -тур ўтказувчанликдаги ва кристаллографик ўқларнинг (100) йўналиш олиши билан, $\rho = 2$ Ом·см (КЭФ-2) солиштира қаршиликка эга бўлган кремний пластинкалари бўлди. Иккинчи тур пластинкалари 350 мкм қалинликка эга эди. p - n -ўтиш борни 0,4÷0,5 мкм чуқурликда диффузиялаш услуби орқали тайёрланди.

Олинган ҚЭ дан 36 кетма-кет тарзда уланган элементлардан ташкил топган икки кўринишдаги ФЭМ (p - ва n - тур ўтказувчанликдаги) тайёрлаш учун фойдаланилди. $G = 800$ Вт/м² қуёш нурланиш оқимида ФЭМ p -тур элементлари 500 мА яқин қисқа туташув токини ва 19,7 В ($T = 20$ °С) салт кучланишни генерациялайди, ФЭМ n -тур элементларида эса 600 мА гача катталиқдаги қисқа туташув токи ва 20,6 В ($T = 20$ °С) салт кучланиши ишлаб чиқилади. ФЭМ майдонлари тенг ўлчамга (0,15 м²) эга бўлади.

ФЭМ икки турдаги чиқиш параметрларининг ҳароратга боғлиқликлари 2-расмда келтирилган. Келтирилган ҳароратлар оралиғида салт юриш кучланиши U_{XX} чизиқли камаяди, қисқа туташув токи I_{K3} эса кучсиз равишда ортади. Ушбу боғлиқликнинг хусусиятлари назарий натижалар билан сифат жиҳатдан мувофиқлашади. $\rho = 2$ Ом·см солиштира қаршиликка эга n -тур монокристалл кремнийдан бўлган ФЭМ салт юриш кучланиши ва қисқа туташув токининг ҳарорат коэффициентлари мос равишда $\Delta U_{XX}/\Delta T = 57,14$ мВ/°С ва $\Delta I_{K3}/\Delta T = 0,54$ мА/°С катталikka эга, $\rho = 10$ Ом·см солиштира қаршилиқдаги p -тур монокристалл кремнийдан бўлган ФЭМ эса мос равишда $\Delta U_{XX}/\Delta T = 91,53$ мВ/°С ва $\Delta I_{K3}/\Delta T = 0,81$ мА/°С. n -тур монокристалл кремнийдан бўлган ФЭМ даги ҚЭ нинг кучланиш ҳарорат коэффициенти маълумотлардагига нисбатан 1,5–1,6 марта кичик миқдорга ва p -тур кремнийдан бўлган ҚЭ нинг ҳарорат коэффициентига нисбатан 1,6 мар-



2-расм. $\rho = 2 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, $n\text{-Si}$ дан ФЭМ нинг U_{XX} I_{K3} хароратга боғлиқликлари (1 ва 2 эгрилар) ва $p\text{-Si}$ $\rho = 10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ($1'$ ва $2'$).
1, $1'$ – U_{XX} ; 2, $2'$ – I_{K3} .

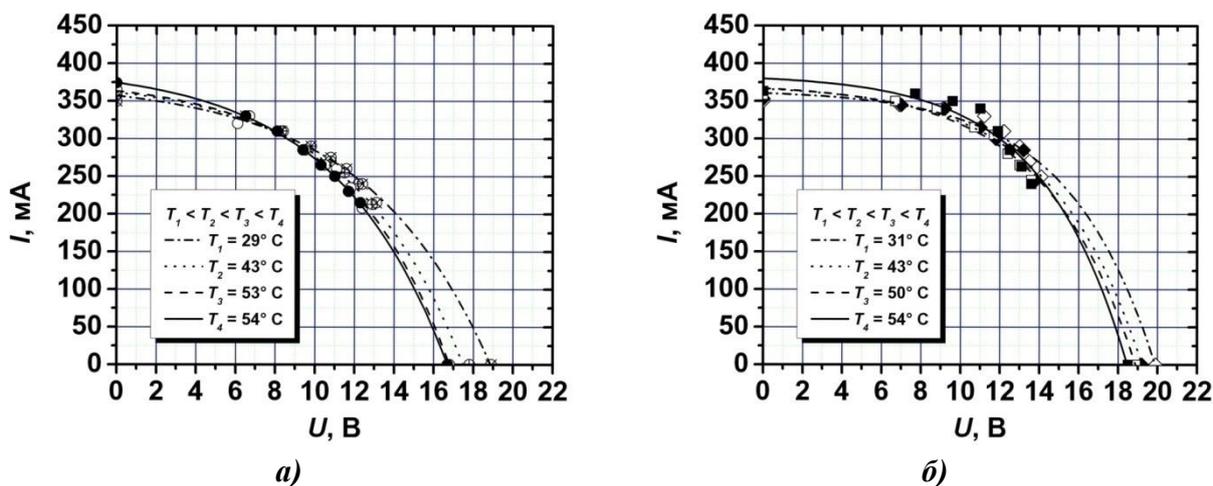
та кичик микдорга эга. Охирги ҳолат яримўтказгич ишлаб чиқариш-нинг n -тур даги пластинкалардан ясалган ҚЭ салт юриш кучланиши бўйича кам ҳарорат сезгирлигига эга деб хулоса қилиш имконини беради.

Ҳароратни кўтарилишида ФЭМ U_{XX} камайиши асосан ҚЭ хусусий заряд ташувчилари концентрациясини ортиши туфайли юзага келади. Ҳароратни кўтарилиши билан тўйиниш токи экспоненциал равишда ортиб боради, бу ҳароратни кўтарилишида U_{XX} ни деярли чизиқли пасайишига, I_{K3} ўзгариши эса сезиларсиз — $\Delta I_{K3}/\Delta T < 1 \text{ mA}/^\circ\text{C}$ бўлади.

Таъкидлаш жоизки, ФЭМ $\Delta U_{XX}/\Delta T$ кучланиш ва $\Delta I_{K3}/\Delta T$ ток ҳарорат коэффицентлари ҚЭ материалнинг солиштирма қаршилиги билан корреляцияланади. Шунинг учун иссиқ шароитларда кремнийнинг $2 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ дан камроқ дастлабки солиштирма қаршилигига эга бўлган ҚЭ дан фойдаланиш мақсадга мувофиқ бўлади.

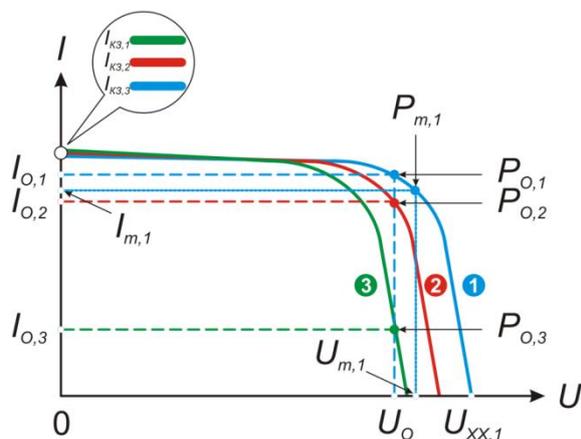
$\rho = 10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ $p\text{-Si}$ ва $\rho = 2 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ $n\text{-Si}$ дан ФЭМ турли ҳароратларида олинган ВАХ оиласи 3-расмда келтирилган. Ўлчовлар $\sim 500 \text{ Вт}/\text{м}^2$ интенсивликдаги нурланиш оқими интенсивлигида ФЭМ табиий қуёш ёруғлигида ўтказилди. Тушаётган нурланишнинг қувват катталигининг паст қийматда бўлиши Тошкент шаҳрида июль-август ойларининг иккинчи ярмида кундузги вақтда атмосферани саноат ва транспорт чиқиндилари билан ифлосланиши билан боғлиқ маҳаллий шаффофлигини ўзгариши билан боғлиқдир.

Фотоэлектрик модулар қизишини аккумулятор батареяларнинг зарядланиш жараёнига салбий таъсир кўрсатиши кўриб чиқилди. Чиқиш қувватини камайиши лаборатория шароитларида $T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ (STC) ўлчанган, $T_A > T_0$ бўлишида, қайсики $T_A = 30 \div 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ҚЭ ҳароратиэса ($T_{CЭ}$) $90 \text{ }^\circ\text{C}$ етиши мумкин бўлган реал эксплуатация қилиниш шароитларида ўлчаниб намоён этилган ФЭМ қувватига мувофиқ эмаслигига олиб келади. ФЭМ қувватини камайишининг асосий сабаби бўлиб ҚЭ салт юриш кучланишини камайиши ҳисобланади. Бунинг натижасида аккумуляцияланган электр энергиядан фойдаланувчи ФЭТ да аккумулятор батарея (АБ) зарядининг токи жиддий камаяди. Манашу охирги ҳолат баъзи ҳолларда ўзгартирилиш самарадорлигини стандарт синов шароитларидагига (STC) нисбатан 50% гача пасайишига олиб келади.



3-расм. Тўғридан-тўғри қуёш радиацияси таъсири остида кремнийдан ФЭМ ҳароратини кўтарилиши билан ВАХ ўзгариши: а) *p*-тур; б) *n*-тур.

Кўргазма сифатида ҳарорат кўтарилиши билан боғлиқ ФЭМ даги ВАХ ўзгариши кўриб чиқилди. У томонидан берилувчи қувват максимал қийматга етувчи, ФЭМ мувофиқлашган иш режимига мос келувчи ВАХ 4-расмда келтирилган (STC). Реал шароитларда, хатто атрофдаги ҳарорат STC ($T_A < T_0$) бўлишида сертификатланишда ҚЭ ҳарорати элементлар ҳароратидан юқори бўлади. 4-расмда ҚЭ турли ($T_1 > T_2 > T_3$) ҳароратларда ва атрофдаги ҳароратларда олинган ВАХ лар келтирилган (1,2 ва 3 эгрилар). $I_{m,1}$ ва $U_{m,1}$ катталиклар ($P_{m,1} = I_{m,1}U_{m,1}$), $T_1 = 35^\circ\text{C}$ ҳароратда ФЭМ максимал чиқиш қувватига эришилишидаги ток ва кучланиш қийматларидир.



4-расм. Турли ҳароратларда ФЭМ вольтампер тавсифлари:
 1 – $T_1 = 35^\circ\text{C}$ ($T_A = 15^\circ\text{C}$);
 2 – $T_2 = 54^\circ\text{C}$ ($T_A = 30^\circ\text{C}$);
 3 – $T_3 = 71^\circ\text{C}$ ($T_A = 45^\circ\text{C}$).

ФЭТда 12 В номинал кучланиш билан қўлланиши учун мўлжалланган ФЭМ ҳолатида, ҚЭ сони 36 тенг бўлади. (P_m) максимал қувват нуқтасига мувофиқ келувчи ФЭМ кучланишнинг қиймати, STC бўлишида $U_m = 18\text{ В}$ ($\pm 1\%$) катталиқка эга. ҚЭ 10°C исишида ушбу кучланишнинг катталиги 0,7–0,9 В га камаяди. Бироқ ом юкланишидан фарқланган ҳолда, юкланишдаги кучланишнинг ўзгариши занжирдан оқиб ўтувчи токка боғлиқ бўлишида, потенциаллар фарқи ўлчанишидаги АБ ҳолатида, ток амалда ўзгармас бўлиб қолади. Шунинг учун автоном ФЭТларнинг ФЭМ чиқиш тавсифларини электр энергиясининг аккумуляцияланиш тизим остининг

эксплуатацион тавсифлари билан, айнан, АБ га меъерий-техник ҳужжатлар орқали ўрнатиловчи номинал (стандарт) кучланиш ва заряд токи билан бирга уйғунлаштирилиши лозим. АГМ технологияси бўйича ишлаб чиқилган кўрғошин-кислотали АБ қўлланишида ва уларни циклик режимда ёки тенглашувчи заряд режимида эксплуатация қилинишида, заряднинг тўлиқ цикли тугалланиши учун кучланишни 14,1–14,4 В атрофида сақлаб турилиши талаб этилади. 4-расмда ушбу диапазоннинг юқориги чегарасига АБ-ни тўлиқ зарядланиши учун (U_0) кучланиш мувофиқ келади. Бунда ФЭМ томонидан генерацияланувчи ток ($I_{0,1}$), АБ чуқур зарядланиш ҳолатида, тўлиқ зарядга сарфланади ва заряд жараёнида АБга берилувчи ФЭМ қуввати $P_{0,1} = I_{0,1}U_{0,1}$ тенг бўлади (4-расм). 4-расмдан кўринганидек ҚЭ ҳароратини кўтарилиши билан ($T_1 = 35\text{ }^\circ\text{C}$) заряд токининг катталиги ошиши мумкин ($I_{0,1} > I_{m,1}$). ҚЭ ҳароратини бундан кейинги ортиши ($T_2 = 54\text{ }^\circ\text{C}$) ўзгармас U_0 кучланишида (4, 2-расм) заряд токини камайишига ($I_{0,2} < I_{0,1}$) олиб келади. ҚЭ ҳарорати хали юқори бўлган ҳолларда ($T_3 = 71\text{ }^\circ\text{C}$), U_0 номинал қийматга $I_{0,3} < I_{0,2} < I_{0,1}$ ток мувофиқ келади. Бундан, АБ заряди кучланишининг ўзгармас қиймати бўлиш ҳолатида заряднинг (U_0 токи ФЭМ да жойлашган ҚЭ ҳароратига боғлиқ бўлади. Бунда STC ($T_0 = 25\text{ }^\circ\text{C}$) бўлишидаги ҳароратга нисбатан ҚЭ ни 40–60 °C га ўта қизиши, секин зарядга ёки АБ тўлиқ зарядининг мавжуд бўлмаслигига ва оқибатда уни тез ишдан чиқишига олиб келади.

Июль–августда 1–3 м/с шамол тезлигида ўтказилган ўлчовлар, ҳароратлар фарқи, стандарт синов шароитларидаги қийматларга нисбатан атроф муҳитнинг 47–48 °C ҳароратларида 52 °C гача етишини кўрсатади ва бу $U_{\text{ХХ}}$ ўртача 20,3 В дан 16,4 В гача камайишига олиб келади.

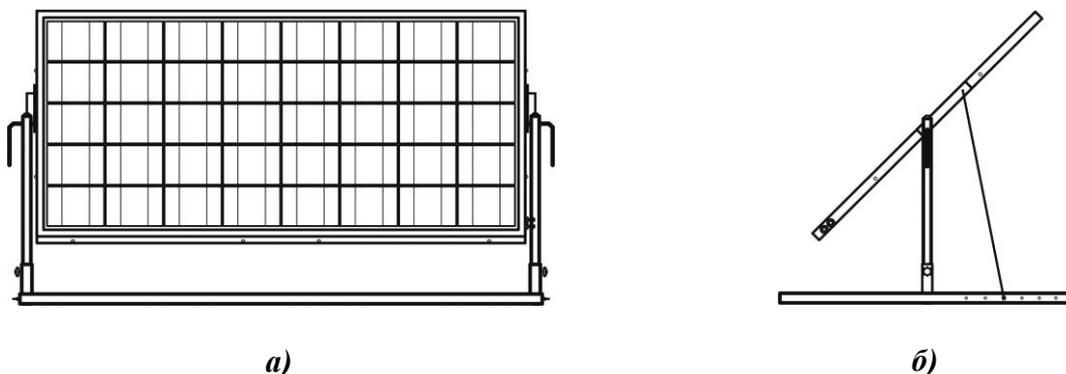
Шундай қилиб, Ўзбекистондаги йилнинг ёз даврлари учун хос бўлган юқори ҳароратларда (айниқса, шамолнинг тезлиги 5 м/с.дан кам бўлган ҳолларда) 36 ҚЭ дан тайёрланган ФЭМ, ҳароратнинг кўтарилиши билан бир неча мартага камаювчи АБ заряднинг зарурий токини таъминлай олмайди.

Кўча ёриткичлар тизими ва иссиқ иқлим шароитларида ишлаши учун мўлжалланган сейсмологик станциялар ускуналарини электр билан таъминлаш учун ишлаб чиқилган фотоэлектрик тизимлар конструкциялари баён этилган. Ишлаб чиқилган кўча ёриткичлари ФЭМда асосий бўлиб ҳисобланувчи ҚЭнинг 36 кремнийли монокристалларидан бўлган ФЭМдан фойдаланилди.

Наманган шаҳри шароитларида ўта қизиш салбий таъсирлари билан боғлиқ ФЭТ салт юриш кучланиши бўйича йўқотилишларни компенсациялаш учун, асосий модульга қўшимча равишда, 4 та кетма-кет уланган ҚЭ дан ташкил топган ФЭМ уланди. Қўшимча равишда қўшилган ФЭМда асосий модульда фойдаланилувчи ҚЭ конструкциялари ва электрик параметрлари бўйича ҚЭ га айнан ўхшашдир. Қўшимча ФЭМ асосийсининг устида жойлашган. Иккала ФЭМ ҳам уларни монтаж қилинишида горизонтал ва вертикал текисликда буришга имкон берувчи пўлат конструкцияга маҳкамланган. Бундай конструкция ФЭТни Қуёшнинг жойлашиш ҳолатига нисбатан оптимал йўналтирилишини таъминлайди. ФЭМ жойнинг

кенглигига тенг бўлган горизонт чизигига нисбатан қия бурчак остида жойлаштирилган (Наманган шаҳри шароитлари учун — 40° – 41°). ФЭМ фронталь юзасини қушларнинг чиқиндисидан ҳимоя қилиш учун тишли зихга эга пластинкалардан фойдаланилди. ФЭМ йўналтириш учун хизмат қилувчи пўлат конструкция электр энергиясини аккумуляцияланиш тизимостини ва ёритиш тизимостини тутиб турувчи конструкциянинг бир қисми бўлиб ҳисобланади. ФЭТ тутиб турувчи конструкцияси баландлиги 9 м бўлган темирбетондан бўлган ёритувчи устунга маҳкамланган.

Иссиқ иқлим шароитларида уларнинг ишлаш самарадорлигини ошириш мақсадида асосий вазифа бўлиб ҳисобланган ФЭМ конструкцияларини такомиллаштириш бўйича ўтказилган тадқиқотлар, янги автоном ФЭТ яратиш имконини берди, шунинг учун ФИК — 14,4% бўлган поликристал кремний асосидаги ҚЭ дан ташкил топган асосий компоненти ФЭМ (5-расм) бўлган 280 Вт генерациялаш қувватига эга ФЭТ ясалди. Фойдаланилувчи ҚЭ Корея Республикасида ишлаб чиқарилган. Унинг ўлчамлари ва қалинлиги мос равишда $156 \times 156 \times 0,2$ мм ташкил этади.



5-расм. Таянч-бурилиш қурилмасининг фотоэлектрик модули:
а) олдиндан кўриниш; б) ўнгдан кўриниш.

Элементларнинг юзаси текстураланган фронтал қатламга қопланган ёритилувчи қаватга эга. ФЭТ электр энергиясини генерацияловчи тизимости таянч-бурилувчи қурилма устида ўрнатилган икки ФЭМдан ташкил топган.

Ҳар қайси ФЭМ кетма-кет тарзда уланган 40 ҚЭдан ташкил топган. Электр энергиясини аккумуляциялаш тизимостиси 200 А·с АБ номинал сиғимдан, АБ заряд–разряд контролердан ташкил топган. Электр энергияси истеъмолчиси бўлиб, сейсмологик станциянинг ўлчов ускунаси юкланган кучланиш инвертори ҳисобланади.

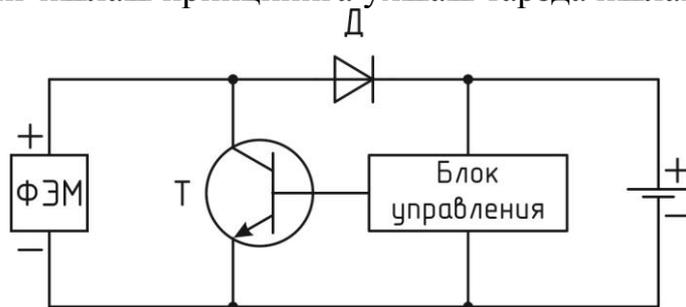
ФЭМ дан зарядланувчи кўрғошин-кислотали аккумулятор батареялари заряд контроллерининг конструкцияси ва ишлаш принципи кўриб чиқилди. Ишлаб чиқилган АБ заряд контроллери параллел кучланиш стабилизаторининг ишлаш принципига ўхшаш тарзда ишлайди, мувозанатловчи қаршилик ролини эса ФЭМ ички қаршилиги бажаради. Агар АБ томонидан зарядланувчи (НРЦ) очик занжирнинг кучланиши унинг тўлиқ зарядига мос келувчи катталиқдан камроқ бўлса, бошқарув схемаси Т

транзисторни ёпиқ ҳолатга келтиради. Ушбу ҳолатда ФЭМ генерацияланувчи токдан АБни зарядланиши учун фойдаланилади.

АБ заряд ва НРЦ катталигини 100% зарядланишига мувофиқ келувчи қийматга етишида, бошқарув схемаси Т транзисторни очади ва ФЭМ токи аккумуляторнинг кучланишини ортишини ва уни қайта зарядланишини олдини олган ҳолда транзистор орқали тармоқланади. Модомики АБ тўлиқ зарядланганлик ҳолати бир онда юзага келмас экан, Т транзистор ҳам очик ҳолатга бир зумда эмас, балки унинг ўз-ўзидан зарядланишини компенсацияловчи АБни қўшимча тарзда таъминловчи токка мос келувчи катталиқкача заряд токини камайтириш билан секин-аста ўтади. Схеманинг бундай тузилишининг афзаллиги бўлиб, ФЭМдан АБ заряд токининг асосий занжирида ФЭМ энергиясини йўқотилишини юзага келтирувчи бошқарув элементлари мавжуд эмас. Фақат Д химоя диодидагина энергия йўқотилишлари мавжуд.

Фотоэлектрик модуллардан зарядланувчи кўрғошин-кислотали аккумулятор батареялари заряд контроллерининг конструкцияси ва ишлаш принципи кўриб чиқилди. Қуёш ФЭТ лойиҳалаштириш муаммоларидан бири бўлиб ҳисобланади. ҚЭ томонидан кун давомида ишлаб чиқарилувчи электр энергиясини аккумуляциялашдан иборат, чунки, кўпчилик ҳолатларда электр асбоблари ва ускуналари қуёш нурланишисиз ҳам ишлаши керак бўлади. Бироқ, ФЭМни АБга бевосита уланишида тизимни ФИК пасайиб кетишига ва ҳатто АБ ишдан чиқишига олиб келувчи салбий ҳолатлар кузатилади. Масалан, ФЭМ орқали амалга ошувчи АБ разряд сутканинг қоронғу вақтларида ҚЭнинг $p-n$ -ўтишларининг ички қаршилиги билан шартланади, улардан энг жиддийлари базанинг кетма-кетликдаги қаршилиқларидан, металл-яримўтказгич ва диффузион қаватнинг узун қаршилигидан ташкил топган кетма-кет қаршилиқ ҳисобланади.

Ишлаб чиқилган АБ заряд котроллери (6-расм) параллел кучланиш стабилизаторининг ишлаш принципига ўхшаш тарзда ишлайди, мувозанат-

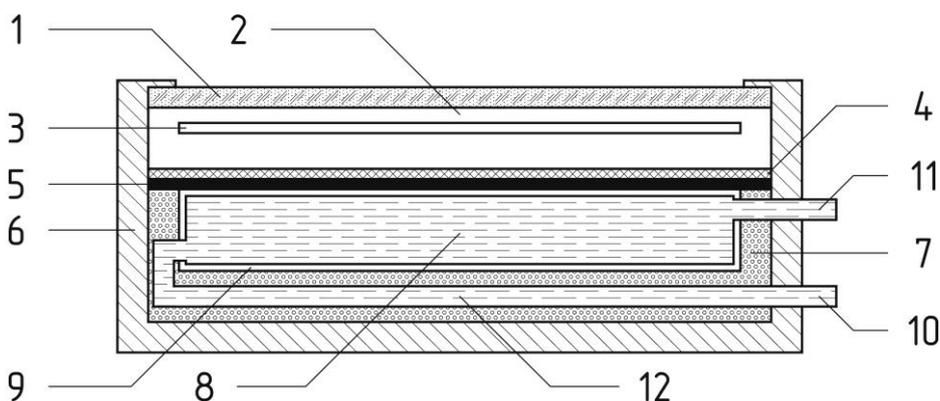


6-расм. КЗ АБ функционал схемаси.

ловчи қаршилиқ ролини эса ФЭМ ички қаршилиги бажаради. Агар АБ томонидан зарядланувчи (НРЦ) очик занжирнинг кучланиши унинг тўлиқ зарядига мос келувчи катталиқдан камроқ бўлса, бошқарув схемаси Т транзисторни ёпиқ ҳолатга келтиради. Ушбу ҳолатда ФЭМ генерацияланувчи токдан АБни зарядланиши учун фойдаланилади. АБ заряд ва НРЦ катталигини 100% зарядланишига мувофиқ келувчи қийматга етишида,

бошқарув схемаси Т транзисторни очади ва ФЭМ токи аккумуляторнинг кучланишини ортишини ва уни қайта зарядланишини олдини олган ҳолда транзистор орқали тармоқланади. Модомики АБ тўлиқ зарядланганлик ҳолати бир онда юзага келмас экан, Т транзистор ҳам очик ҳолатга бирзумда эмас балки унинг ўз-ўзидан зарядланишини компенсацияловчи АБни кўшимча тарзда таъминловчи токка мос келувчи катталиккача заряд токини камайтириш билан секин-аста ўтади. Схеманинг бундай тузилишининг афзаллиги ФЭМдан АБ заряд токининг асосий занжирида ФЭМ энергиясини йўқотилишини юзага келтирувчи бошқарув элементлари мавжуд эмас. Фақат Д химоя диодидагина энергия йўқотилишлари мавжуд. Баён этилган йўқотилишлар энергияси контроллерда иссиқликка айланади ва ташқи ҳавонинг табиий конвекцияси туфайли совутилувчи корпуснинг пастки девори орқали чиқарилади. Схема шунингдек ФЭМ АБдагига қараганда кўпроқ бўлган салт юриш кучланишида АБ мавжуд бўлмаслигида истъмолчига узатилувчи берилган чиқиш кучланишининг максимал қийматини сақланишини таъминлайди.

«Суюқлик туридаги текис фотоиссиқлик ўзгартгичли тизимлар» деб номланган тўртинчи боб ишлаб чиқилган конструкцияларга ва текис ФИЎ ва ФТЎТ ишлаш принципларининг таърифига бағишланган. ФТЎТ иккиланган функцияни бажарувчи, хусусан, қуёш энергиясини ютиб, унинг бир қисмини электр энергиясига айлантиради, энергиянинг қолган қисмини эса иссиқлик кўринишида иссиқлик ташувчига узатади (7-расм). Агар ФЭМ текис ҚК элементи каби қаралса, у ҳолда ҚЭ герметизацияловчи компаунднинг орқа қавати қора рангга бўялган химоя пленкаси ҚК нинг ютувчи юзаси бўлиб ҳисобланади. ҚЭ ютилиш спектрининг асосий қисмига нисбатан шаффоф қопламлар (химоя ойнаси ва герметизацияловчи компаунднинг фронтал қавати) ютувчи юзанинг устидан жойлашган.



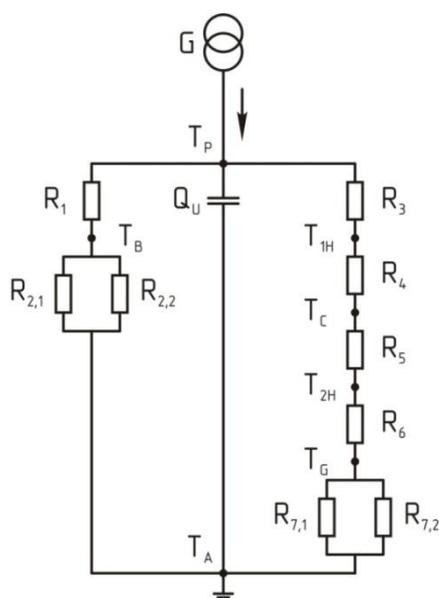
7-расм. Фотоиссиқлик ўзгартгич элементларининг жойлашиш схемаси:
1 – химоя ойнаси; 2 – герметизацияловчи компаунд; 3 – қуёш элементлари;
4 – химоя пленкаси; 5 – иссиқлик ютувчи қават; 6 – корпус;
7 – иссиқлик изоляцияси; 8 – иссиқлик олибкетувчи канал; 9 – полимер қобик;
10 – кириш штуцери; 11 – чиқиш канали; 12 – қувурўтказгич.

Улар ФИЎ коллектор қисмидан атмосферага конвектив ва радиацион йўқотилишларни камайтиради. Иссиқликни иссиқлик ташувчига узатилиши иссиқлик олиб кетувчи каналда содир бўлади. Шундай қилиб, ФЭМдан бир вақтнинг ўзида электр энергияси генератори ва ҚК абсорбери сифатида фойдаланилади. Бундай конструкцияда ҚК иссиқлик ташувчи иссиқлик узатилиш жараёнлари воситасида ФЭМ орқа томонини совуши ҳисобига исийди. ФИЎ маълум қиялик бурчагида иссиқлик ташувчининг илиқ қаватларини совуқ қаватларига нисбатан ҳаракатланиши содир бўлади.

Мазкур ФИЎ фотоиссиқлик ўзгартгичидаги иссиқлик жараёнлари кўриб чиқилди ва энергоқурилманинг коллектор қисми параметрларини ҳисоблаш услубиятининг таърифи келтирилди. Кўриб чиқилаётган ФИЎ кечувчи иссиқлик жараёнлари текис ҚКда кечувчи жараёнларга айнан ўхшаш, шунинг учун ФИЎ қаватларидаги иссиқлик йўқотилишлари ва ҳароратларни аниқлаш учун иссиқлик жараёнлар ягона иссиқлик занжирида кўрсатилувчи услубдан фойдаланилади. Таъриф этилган услубият герметиканинг фронтал қавати ҳароратини T_{2H} ва химоя ойнаси T_G ҳароратини ҳаво ҳароратининг T_A турли қийматларидаги ФИЎ ютувчи юзасининг ўртача ҳароратига боғлиқ равишда белгилаш имкониятини беради (8-расм).

ФИЎ қаватларининг чизикли ўлчамлари уларнинг қалинликларидан анча катта, шунинг учун ФИЎ нинг ён томонларидан иссиқлик йўқотилишлари ҳисобга олинмайди, ҳар қайси қават юзаси бўйича бўлган ҳарорат эса ўзгармас ҳисобланади. G энергияли қуёш нурланиши T_P ҳарорат билан, ютувчи юзани қиздиради. Бу энергия (Q_U) иссиқлик ташувчини иситишга ва ФИЎнинг фронтал ва орқа томонидан иссиқлик йўқотилишларига сарфланади.

ФИЎ корпусининг орқа томонидан энергия йўқотилиши R_1 , $R_{2,1}$ ва $R_{2,2}$ қаршилиқлар орқали кўрсатилган. R_1 — иссиқлик изоля-циясининг термик қаршилиги, $R_{2,1}$ ва $R_{2,2}$ — мувофиқ равишда ташқи муҳитга конвекцияланиш ва нурланиш билан шартланувчи қаршиликлар. Корпуснинг орқа томони



8-расм. ФИЎ нинг иссиқлик схемаси.

муҳитга нурланишидан энергия йўқотилишлари T_P ҳароратли иссиқлик ютувчи қаватдан T_{1H} ҳароратли герметикнинг орқа томонига олиб ўтилувчи сўнг T_C ҳароратли ҚЭга ва герметиканинг T_{2H} ҳароратли фронтал қавати энергиялар миқдорига тенг. R_3 , R_4 , R_5 ва R_6 — герметизацияловчи компаунднинг орқа қавати ҚЭ ва герметизацияловчи компаунднинг фронтал қавати термик қаршилиқлари. $R_{7,1}$ ва $R_{7,2}$ мувофиқ равишда T_G ҳароратли химоя ойнаси орқали T_A ҳарорат билан ташқи муҳитга конвекцияланиш ва нурланиш билан шартланувчи қаршилиқлар.

ФИЎ фронтал юзасидан йўқотилишлар нурланиш ва конвекция билан шартланади. Конвектив иссиқлик бериш коэффициентининг тахминий қиймати:

$$h_w = 5,7 + 3,8V, \quad (1)$$

бунда V — шамолнинг тезлиги.

Ҳимоя ойнаси орқали йўқотилишлар коэффициенти қуйидаги формула орқали аниқланади:

$$h_{G \rightarrow S} = \varepsilon_G \sigma (T_G^2 + T_S^2) (T_G + T_S), \quad (2)$$

бунда ε_G — шишанинг қоралик даражаси, σ — Стефан–Больцман доимийси, T_S — осмон ҳарорати. Ойна орқали ташқи муҳитга вақт бирлиги ичида майдон бирлигидан йўқотилувчи энергия:

$$q_{G \rightarrow S} = (h_{G \rightarrow S} + h_w)(T_G - T_S). \quad (3)$$

У ҳолда ҳимоя ойнасидан иссиқликни ташқи муҳитга узатилиш қаршиликлари учун $R_{7,1}$ ва $R_{7,2}$ ифодаларни қуйидаги формуладан аниқланиши мумкин бўлган R_7 кўринишида тасаввур қилиниши мумкин

$$R_7 = \frac{1}{h_{G \rightarrow S} + h_w}. \quad (4)$$

Ҳимоя ойнасининг радиацион қаршилиги осмон орқали T_S ҳароратда нурланиш билан иссиқлик алмашилишини ҳисобга олади. осонлаштириш мақсадида ушбу қаршилиқни T_A ҳаво ҳароратига тааллуқли деб ҳисоблаймиз. Герметиканинг фронтал қавати орқали нурланиш билан шартланувчи фойдали иссиқлик энергияси йўқотилишлари, нурланиш орқали иссиқлик узатиш коэффициенти билан тавсифланади

$$h_{2H \rightarrow G} = \frac{\sigma (T_{2H} + T_G)(T_{2H}^2 + T_G^2)}{\frac{1}{\varepsilon_H} + \frac{1}{\varepsilon_G} - 1}, \quad (5)$$

бунда ε_H — герметиканинг қоралик даражаси. Ҳимоя ойнасига иссиқликни герметиканинг фронтал қавати орқали узатилиши билан боғлиқ энергия йўқотилишлари қуйидагига тенг

$$q_{2H \rightarrow G} = h_{2H \rightarrow G} (T_{2H} - T_G). \quad (6)$$

Термик қаршилиқ учун ифода фақат нурланиш орқали иссиқлик узатиш коэффициенти орқали аниқланади, чунки герметизацияловчи компаунднинг зич қавати конвекция орқали иссиқлик алмашилиш имконини инкор этади

$$R_6 = \frac{1}{h_{2H \rightarrow G}}. \quad (7)$$

Айнан ўхшаш ифодани ютилувчи юзадан герметиканинг фронтал қаватига нурланиш орқали узатиш коэффициенти учун ёзилиши мумкин.

ФИЎ учун ютувчи юза устидан ташқи муҳитга йўқотилиш тўлиқ коэффициенти

$$U_T = \frac{1}{R_5 + R_6 + R_7}. \quad (8)$$

Таъкидлаш жоизки, ютувчи юзадан ҳимоя ойнасига узатилувчи иссиқлик оқими, ютувчи юзадан герметиканинг фронтал қаватига узатилувчи

энергия оқимига тенг. Ўз навбатида герметиканинг фронтал қаватидан химоя ойнасига йўналган энергия оқими герметика фронтал қаватидан ташқи муҳитга ўтувчи энергия оқимига тенг, уҳолда герметика фронтал қаватининг ҳарорати учун ифода қуйидаги кўринишда ёзилиши мумкин

$$T_{2H} = T_P - \frac{U_T(T_P - T_G)}{h_{P \rightarrow 2H}}, \quad (9)$$

химоя ойнаси ҳарорати учун эса

$$T_G = T_{2H} - \frac{U_T(T_{2H} - T_S)}{h_{2H \rightarrow G}}. \quad (10)$$

Итерациялар услубини қўллаш, (8) га мувофиқ қуйидаги кўриниш олувчи йўқотишлар коэффицентини U_T олиш имконини беради

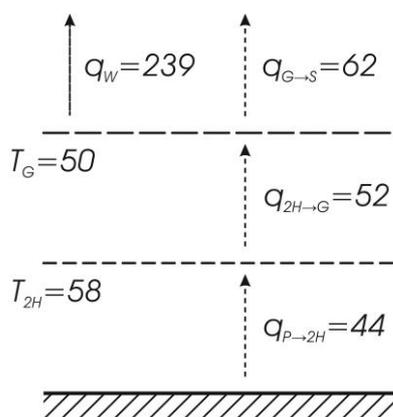
$$U_T = \left(\frac{1}{h_{P \rightarrow 2H}} + \frac{1}{h_{2H \rightarrow G}} + \frac{1}{h_{G \rightarrow S} + h_W} \right)^{-1}. \quad (11)$$

Итерациялаш услубияти $h_{P \rightarrow 2H}$, $h_{2H \rightarrow G}$, $h_{G \rightarrow S}$ ва U_T коэффицентларни T_G ихтиёрий берилган қийматларида кетма-кетликда ҳисобланишидан иборатдир. Герметиканинг фронтал қавати ҳарорати ойна ҳарорати ва ютувчи юза ҳарорати орасидаги ўртача ҳарорат каби аниқланади

$$T_{2H} = \frac{T_P + T_G}{2}. \quad (12)$$

Сўнг ушбу ҳисобларнинг натижаларидан юқорида келтирилган формулалар бўйича T_{2H} ва T_G ҳисоблаш учун фойдаланилади. Агар олинган қийматлар бошланғич ихтиёрий танланганларга яқин бўлса, ҳисоб тугатилади. Акс ҳолда, олинган қийматлар дастлабки каби қабул қилинади ва ҳисоблаш жараёни такрорланади.

Баён этилган услубият герметиканинг фронтал қавати ва химоя ойнаси-



9-расм. Ҳарорат ($^{\circ}\text{C}$) ва иссиқлик йўқотилишларини ($\text{Вт}/\text{м}^2$) ФИЎ юқориги юзаси орқали тақсимланиши: $T_A = 40$ $^{\circ}\text{C}$; $V = 5$ м/с; $T_P = 65$ $^{\circ}\text{C}$.

нинг ҳаво ҳароратининг турлича қийматларида ФИЎ ютувчи юзасининг ўртача ҳароратига боғлиқ ҳолда аниқлаш имконини беради (9-расм).

Ушбу ФИЎ конструкциясида ойна юзасидан ташқи муҳитга иссиқликни конвектив узатилиш устунлик қилади. Кўрсатилган шароитларда нурланиш ҳисобига умумий иссиқлик йўқотилишларига қараганда иссиқлик йўқотилиши 1,5 марта кўпдир. ФИЎ изоляциянинг орқа томонидаги термик қаршилилиги қуйидагига тенг

$$U_B = \frac{k}{L}, \quad (13)$$

бунда k ва L — мувофиқ равишда иссиқлик узатиш коэффициентлари ва изоляция қалинлиги.

Ён томон изоляциясининг қалинлиги пастки юза изоляцияси L қалинлигига тенг, шунда ён юзалардан иссиқлик йўқотилиши U_S коэффициентини уларнинг майдонига A_S кўпайтмаси қуйидаги ифода орқали аниқланади

$$(UA)_S = \frac{2(a+b) \times D \times k}{L}, \quad (14)$$

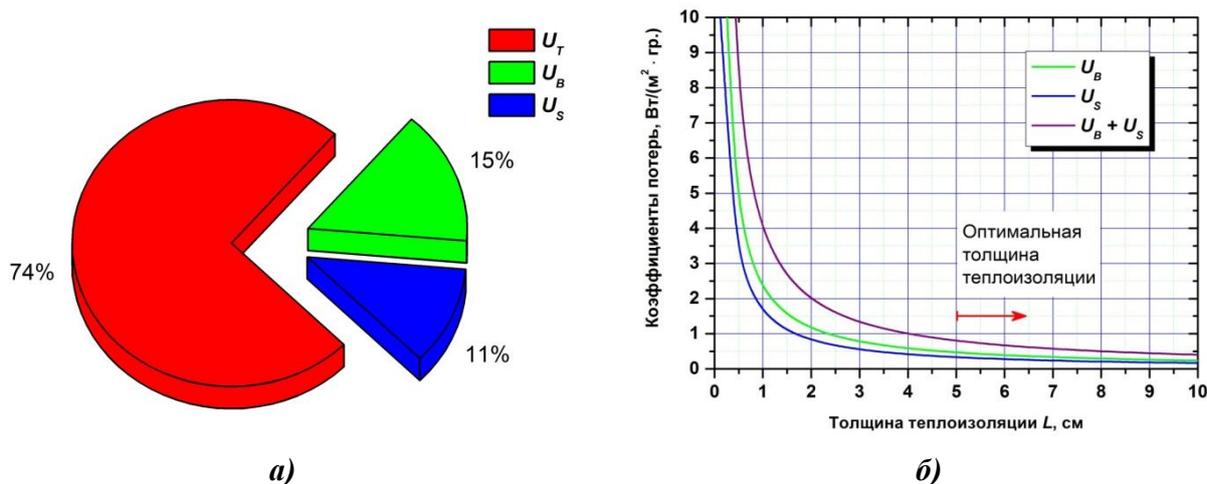
бунда a ва b — мувофиқ равишда ютувчи юзанинг кенглиги ва узунлиги, D — эса иссиқлик олиб ўтувчи ФИЎ каналининг баландлиги.

ФИЎ фронтал майдони бирлигига нисбат қилинган ён юзалардан A_T йўқотилишлар иссиқлик йўқотилишлари коэффициентини аниқлаш имконини беради

$$U_S = \frac{(UA)_S}{A_T}. \quad (15)$$

Ушбу модель доирасида ён юзалардан иссиқлик йўқотилиши, ФИЎ умумий йўқотишлар ҳажмининг 11% ташкил этади (10, *а*-расм). Ушбу ёндашув шунингдек орқа U_B ва ён юзалар U_S орқали иссиқлик йўқотилишлар коэффициентларига боғлиқ равишда иссиқлик изоляциясининг оптимал қалинлигини аниқлашга имкон беради (10, *б*-расм).

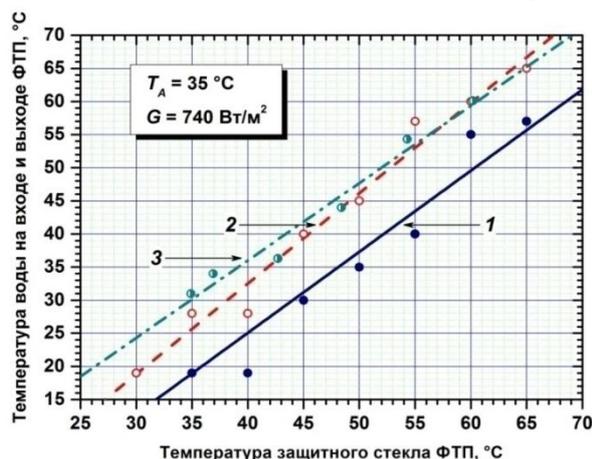
Мазкур фотоиссиқлик ўзгартгичнинг иссиқлик олиб кетилувчи каналидаги радиацион ва конвектив йўқотилишлар таҳлил этилди. Унинг фойдали энергияси ва фойдали иш термик коэффициенти аниқланди. Ҳимоя ойнаси ҳароратини бирмодулли ФТЎнинг кириш ва чиқиш жойидаги ҳароратга боғлиқлигининг назарий ва экспериментал маълумотларининг солиштирма таҳлили амалга оширилди (11-расм).



10-расм. Иссиқлик йўқотилиш улушлари (*а*) ва ён ва орқа юзалар орқали иссиқлик йўқотилишлари коэффициентларини ФИЎ иссиқлик изоляциясининг қалинлигига (*б*) боғлиқлиги.

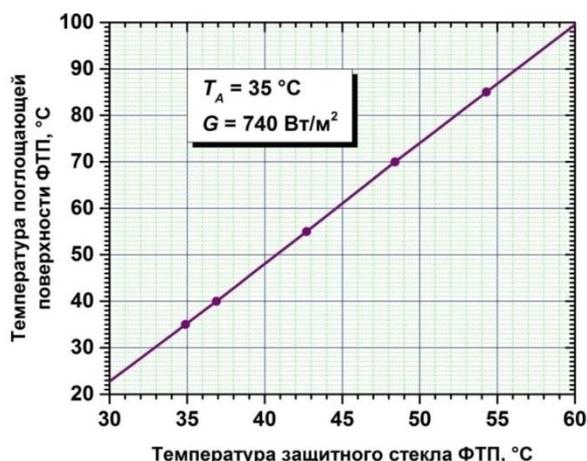
Модомики ФИЎ кўпчилигининг конструкцияси унинг орқа юзасига бевосита қулай ўтиш мавжуд эмаслиги билан боғлиқ қийинчиликлар сабабли ҚЭ ҳароратини тўғридан-тўғри ўлчанишига имкон бермас экан, иссиқликни олиб ўтилиш жараёнлари тўғрисидаги юқорида баён этилган тасаввурларни қўлланиши ҚЭ ҳароратини ҳисоблашлар воситасида аниқлаш имконини беради.

12-расмда аввал кўриб чиқилган ФИЎ ютувчи юзасининг ҳароратини, ташқи муҳитнинг маълум бўлган ($T_A = 35\text{ }^\circ\text{C}$) ҳароратида ва қуёш нурланиши ($G = 740\text{ Вт/м}^2$) интенсивлигида, унинг ҳимоя ойнаси ҳароратига боғлиқлиги



11-расм. ФТЎ ҳимоя ойнаси ҳароратини ФТЎ-га кириш (1) ва чиқиш (2) жойидаги сувнинг ҳароратига боғлиқлиги. (3) тўғри чизик юқорида баён этилган услубиятнинг ҳисоб-китоблар натижаларини таърифлайди.

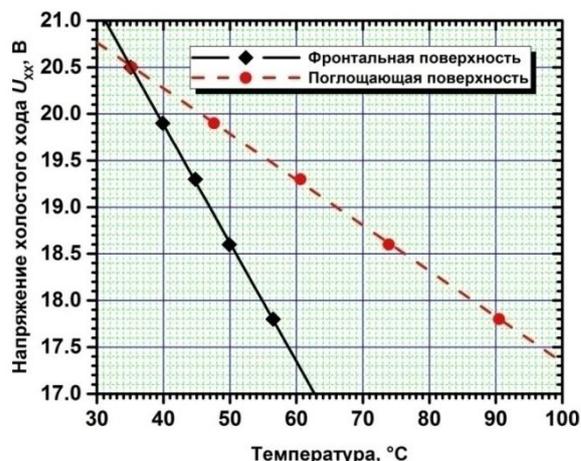
ган ютувчи юза ҳароратига боғлиқлиги кўрсатилган. Максимал электр қувватининг ҳароратга оид таҳлили шуни кўрсатдики, қуёш нурланишининг



12-расм. Ютувчи юзанинг ҳароратини ФИЎ ҳимоя ойнасининг ҳароратига боғлиқлиги.

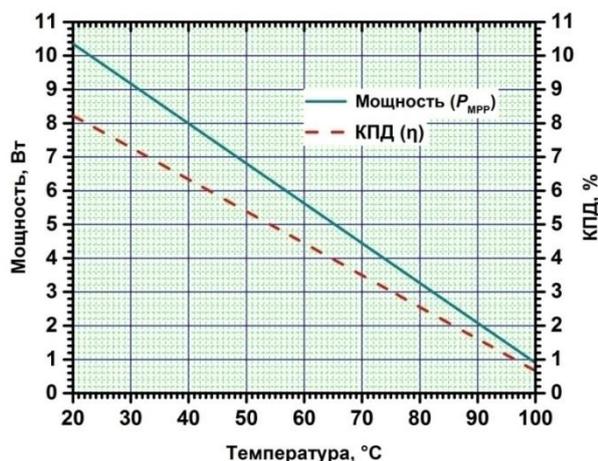
кўрсатилган ҚЭ ҳароратини аниқлаш учун у ФИЎ ютувчи юзасининг ҳароратига тенг деб фараз қилинишининг ўзи етарли бўлади.

Унинг электрик параметрлари ва вақтинчалик тавсифлари белгиланди. Ютувчи юзанинг ҳароратини ФИЎ ҳимоя ойнасининг ҳароратига боғлиқлиги (12-расм) ФЭМ учун стационар шароитларда салт юриш кучланишини ҳароратга боғлиқлик таҳлилининг ўтказиш имконини беради. 12-расмда ФЭМ салт юриш кучланишини унинг ҳимоя ойнасини қиздирилишидаги (ФИЎ фронтал юзасининг) ўлчовга оид боғлиқлиги ва шу кучланишни 13-расмдан олин-

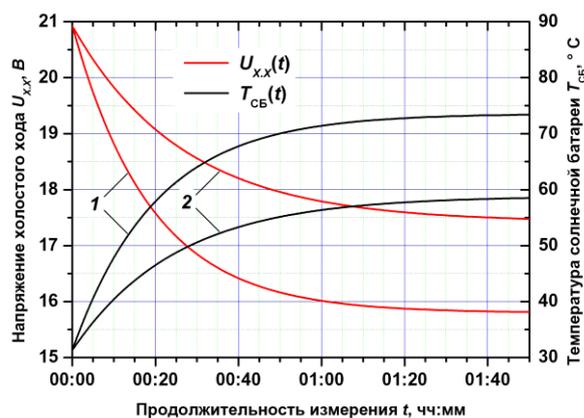


13-расм. Салт юриш кучланишини ($U_{\text{с}ю}$) ҳимоя ойнаси ҳароратига (T_G) фотоиссиқлик ўзгартгичнинг ютувчи юзаси ҳароратига (T_P) боғлиқлиги.

$G = 780 \text{ Вт/м}^2$ зичлигида ФЭМ қувватининг ҳарорат коэффициенти $\Delta P_{\text{МРР}}/\Delta T_{\text{ФЭМ}} = 0,129 \text{ Вт/}^\circ\text{С}$ катталиқка ФЭМ ФИК ҳарорат коэффициенти эса — $\Delta \eta/\Delta T_{\text{ФЭМ}} = 0,095\%/^\circ\text{С}$ катталиқка эга бўлади. Демак, ФЭМ ҳароратини 25°С дан 100°С гача кўтарилиши билан максимал генерацияланувчи электр қуввати ва ФИК 10 марта камаяди. Стационар режимга ўтишгача бўлган ФИЎТ иши кўриб чиқилди. ФЭМ салт юриш кучланиши ($U_{\text{ХХ}}$) ва ҳароратни (T_P), ташқи муҳитнинг $T_A = 35^\circ\text{С}$ ҳароратида ва нурланиш оқимининг $G = 780 \text{ Вт/м}^2$ жадаллигидаги амалий синовлар бошланиш онидан бошлаб совутишсиз ва совутиш билан ўзгариши 14-расмда келтирилган.



14-расм. Қувватни ($P_{\text{МРР}}$) ва ФИК ($\eta_{\text{ФЭМ}}$) нифотоиссиқлик ўзгартгич қуёш элементларининг (T_P) ҳароратига боғлиқлиги.



15-расм. ҚЭ (T_P) ФИЎТ совутишсиз (1) ва совутиш билан (2) ($U_{\text{ХХ}}$) салт юриш кучланиши ва ҳароратни ташқи муҳитнинг $T_A = 35^\circ\text{С}$ ҳароратда $G = 780 \text{ Вт/м}^2$ нурланиш интенсивлигида ўлчаниш вақтига (t) боғлиқлиги.

ФИЎТ динамик тавсифлари салт юриш кучланиши ($U_{\text{ХХ}}$) ва ФЭМ ҳарорати (T_P) ўртасидаги корреляцияни акс эттиради. $U_{\text{ХХ}}$ ва $T_{\text{ФЭМ}}$ катталиқларни (t) вақт бирлиги ичида ўзгариши экспоненциал боғланиш орқали таърифланади. Кўринадики, катталиқларни ўзини тутиш хусусияти совутишсиз ва совутилиш ҳолатларида бир хил, аммо ҳар хил иссиқлик ташувчилар билан бўлган жараёнларни акс эттиради: иссиқлик ташувчи сифатида ҳаво бўлиши ҳолатида (15, 1-расм) ва иссиқлик ташувчи сув бўлишида (15, 2-расм). 15, 2-расмдан шунингдек иссиқ даврларда ФИЎ суяқ иссиқлик ташувчидан фойдаланилишида эксплуатация қилиниши лозимлиги келиб чиқади, чунки унинг мавжуд бўлмаслик ҳолатида ҚЭ ўтақизиши кузатилади.

Тўрт фотоэлектрик модуллардан ташкил топган фотоиссиқлик ўзгартгичнинг унумдорлигига боғлиқ электрик параметрлари ва тавсифлари ўлчанди. Юпқа базали кремний қуёш элементлари асосидаги фотоиссиқлик ўзгартгичларининг вольтампер тавсифлари олинди.

ХУЛОСА

1. 2 ва 10 Ом·см солиштирма қаршилик ва саёз жойлашган p - n -ўтишларга ($\leq 1 \text{ мкм}$) эга бўлган, юпқа базали ($\leq 200 \text{ мкм}$) қаттиқ жисмли диффузонт-

лардан термодиффузия услубида олинган кремнийли монокристалл қуёш элементларидан фотоэлектрик модулар ишлаб чиқилди;

2. 36 монокристалл кремнийли қуёш элементларидан ясалган, аммо турли ўтказувчанлик ва ($\rho(n) = 2 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) ва $\rho(p) = 10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) солиштирма қаршилиқдаги, стандарт синов шароитларидаги ҳароратдан 2–3 марта юқори ҳароратларгача қуёш нурланиши билан бир хилда киздирилишида ($T_{\text{ФЭМ}} > [2\div 3] \times T_{\text{STC}}$) 2–3 салт юриш кучланиши ($\Delta U_{\text{XX}}/\Delta T$) ва қисқа туташув токи ($\Delta I_{\text{КЗ}}/\Delta T$) ҳарорат коэффицентлари ўртача 1,5 мартага фарқ қилиши биринчи бор экспериментлар орқали исботланди ва бу янада юқорирок солиштирма қаршилиққа эга материалдаги асосий бўлмаган заряд ташувчиларнинг яшаш вақтини узайиши ва концентрациясини ортиши билан шартланади.

3. ($T_{\text{ФЭМ}} \geq T_{\text{STC}}$) стандарт синов шароитларидаги ҳароратдан 2–3 марта юқори бўлган ($T_{\text{ФЭМ}}$) модулар ҳароратларидаги 36 кремнийли моно- ва мультикристалл қуёш элементларидан бўлган стандарт фотоэлектрик модуларнинг оптимал қувват нуқтасидаги кучланишни камайиши муносабати билан буферли қўрғошин-кислотали аккумулятор батареялари заряди ($I_{\text{ФЭМ}} \sim T_{\text{ФЭМ}}^{-1}$) модульнинг ҳароратига тесқари мутаносиб ток орқали содир бўлиши аниқланди ва илк бор 40 кремнийли қуёш элементларидан иборат кремнийли фотоэлектрик модулар ва улар асосида киздириш натижасида юзага келувчи кучланиш етишмовчилигини компенсациялаш имконини берувчи тизимлар ишлаб чиқилди;

4. Илк бор параллел турдаги заряд контроллери конструкциясида, таянч кучланиш олиниши учун бошқарилувчи p - n -ўтишли n -каналли майдон транзисторида ток стабилизаторидан фойдаланилди ва бу қўрғошин-кислотали аккумулятор батареяларини ($U_{\text{ФЭП}} = 13,8\div 25,2 \text{ В}$) қийматлар кенг диапазонида кучланишни генерацияловчи фотоэлектрик модулардан зарядлаш имконини берди.

5. Илк бор салт юриш кучланишини ютувчи юза ҳароратига боғлиқликлар фарқини аниқлаш имконини берувчи эркин циркуляцияланувчи суюқлик туридаги текис конструкцияли фотоиссиқлик ўзгартгичи иссиқ модели ишлаб чиқилди ва фотоиссиқлик ўзгартгичдаги қуёш элементларининг ҳароратини аниқлаш усули таклиф этилди;

6. Илк бор иссиқлик ташувчининг контакти фотоэлектрик модулининг орқа юзасидан полиэтилен қават орқали содир бўлувчи, эркин циркуляцияланувчи суюқ турдаги текис конструкцияли фотоиссиқлик ўзгартгичлари ишлаб чиқилди.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.30.08.2018.FM/Т.01.12
ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ
ПРИ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ ИНСТИТУТЕ ФИЗИКИ
ПОЛУПРОВОДНИКОВ И МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ
НАЦИОНАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА УЗБЕКИСТАНА**

**ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
АКАДЕМИИ НАУК РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

ТУКФАТУЛЛИН ОСКАР ФАРИТОВИЧ

**РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И
ФОТОТЕПЛОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ИЗ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО
КРЕМНИЯ *n*- И *p*-ТИПА ПРОВОДИМОСТИ ДЛЯ УСЛОВИЙ
ЖАРКОГО КЛИМАТА**

01.04.10 – Физика полупроводников (технические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD)
ПО ТЕХНИЧЕСКИМ НАУКАМ**

Ташкент – 2019

Тема диссертации доктора философии (Doctor of Philosophy) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете министров Республики Узбекистан за № В2019.2.PhD/T1045.

Диссертация выполнена в Физико-техническом институте НПО «Физика – Солнце» им. С.А. Азимова Академии наук Республики Узбекистан.

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

| | |
|-------------------------------|--|
| Научный руководитель: | Турсунов Мухамад Нишанович доктор технических наук |
| Официальные оппоненты: | Абдукадыров Мухитдин Абдурашитович доктор технических наук, профессор Тачилин Станислав Анатольевич кандидат технических наук, доцент |
| Ведущая организация: | Ферганский государственный университет |

Защита диссертации состоится « ___ » _____ 2019 года в ___ часов на заседании Научного совета по присуждению ученой степени доктора философии PhD.30.08.2018.FM/T.01.12 при Научно-исследовательском институте физики полупроводников и микроэлектроники Национального университета Узбекистана имени Мирзо Улугбека (Адрес: 100057, г. Ташкент, ул. Янги Алмазар, 20. Тел.: (+998) 71-248-79-94, факс: (+998) 71-248-79-92, e-mail: info@ispm.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в отделе внедрения информационных технологий института (зарегистрирована за № ___). Адрес: 100057, г. Ташкент, ул. Янги Алмазар, 20. Тел.: (+998) 71-248-79-94.

Автореферат диссертации разослан « ___ » _____ 2019 года
(Реестр протокола рассылки № ___ от « ___ » _____ 2019 г.)

Ш.Б. Утамурадова
председатель Научного совета по присуждению
ученой степени доктора философии,
д.ф-м.н., профессор

С.С. Насриддинов
ученый секретарь Научного совета по присуждению
ученой степени доктора философии,
д.т.н., доцент

А.Т. Мамадалимов
председатель Научного семинара при Научном совете по присуждению
ученой степени доктора философии,
д.ф-м.н., академик

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время в мире одной из основных тенденций в гелиоэнергетике является повсеместное использование достижений полупроводниковых фотоэлектрических технологий. Поэтому по-прежнему остаётся актуальной возможность прямого преобразования солнечной энергии полупроводниковыми солнечными элементами в электрическую энергию, поскольку они являются надёжными и универсальными преобразовательными устройствами с теоретически неограниченным сроком эксплуатации. Создание энергетических систем любого масштаба из фотоэлектрических модулей на базе этих элементов является важной задачей.

На сегодняшний день в мире одной из ключевых проблем использования полупроводниковых солнечных элементов является зависимость их параметров и характеристик от условий эксплуатации. Большинство производителей проводят сертификацию солнечных элементов и фотоэлектрических модулей в спектре, соответствующем наземному солнечному излучению при атмосферной массе равной AM1.5G. При этом интенсивность потока излучения равна 1000 Вт/м^2 , а температура солнечных элементов в фотоэлектрическом модуле должна соответствовать температуре окружающего воздуха и быть равной $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ($298,16 \text{ K}$). В реальных условиях (например, в условиях жаркого континентального климата Узбекистана) температура воздуха в тени в летний период намного больше ($> 40 \text{ }^\circ\text{C}$), а температура на поверхности, облучаемой потоком солнечной радиации, особенно в летние месяцы в разы превышает ($> 70 \text{ }^\circ\text{C}$) величину температуры, соответствующую условиям сертификации. Данное обстоятельство приводит к уменьшению отдачи максимальной мощности и, следовательно, максимального КПД солнечных элементов и, как следствие, фотоэлектрических модулей.

Поэтому для решения проблем повышения мощности и КПД преобразования полупроводниковых солнечных элементов и фотоэлектрических модулей важное значение имеет разработка их новых конструкций, способных эффективно работать в условиях аридного климата жарких регионов Земли, особенностями которого являются высокие температуры воздуха и состав спектра солнечного излучения, приводящего к нагреву.

Результаты исследовательской работы, изложенные в диссертации, по содержанию соответствуют Указу Президента Республики Узбекистан № УП-4512 от 1 марта 2013 г. «О мерах по дальнейшему развитию альтернативных источников энергии»¹, а также приоритетным направлениям развития возобновляемой энергетики, приведённым в Постановлении

¹ Указ Президента Республики Узбекистан от 01.03.2013 г. № УП-4512 «О мерах по дальнейшему развитию альтернативных источников энергии». Собрание законодательства Республики Узбекистан, 2013 г. № 10 (562), Ст. 124. – СС. 90–93.

Президента Республики Узбекистан № ПП-3012 от 26 мая 2017 г. «О программе мер по дальнейшему развитию возобновляемой энергетики, повышению энергоэффективности в отраслях экономики и социальной сфере на 2017–2021 годы»¹.

Настоящее диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в Указе Президента Республики Узбекистан № УП-4947 от 7 февраля 2017 г. «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017–2021 годы»², в Постановлениях Президента № ПП-2772 от 13 февраля 2017 г. «О мерах по дальнейшему совершенствованию управления, ускоренному развитию и диверсификации электротехнической промышленности на 2017–2021 гг.»³ и № ПП-2789 от 17 февраля 2017 г. «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности»⁴, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в области науки и технологий.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан. Данная исследовательская работа выполнена в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий «III. Энергетика, энергоресурсосбережение, транспорт, машино- и приборостроение; развитие современной электроники, микроэлектроники, фотоники, электронного приборостроения».

Степень изученности проблемы. Интерес к влиянию температуры на параметры и характеристики солнечных элементов и фотоэлектрических модулей отражён в публикациях со второй половины 1970-х годов. Д.Л. Эванс и Л.В. Флоршютц (Университет штата Аризона, США) первыми показали линейное уменьшение мощности и КПД кремниевых монокристаллических элементов и модулей с ростом температуры. До настоящего времени в последние два десятилетия влияние нагрева на кремниевые моно- и мультикристаллические элементы и модули с теоретической и практической точки зрения изучали П. Вурфель (Институт прикладной физики, Германия), Т. Маркварт (Университет Саутгемптона, Великобритания), И. Тобийас, К. дель Канизо (Мадридский политехнический университет, Испания), Х. Алонсо (ISOFOTON, Испания), Т.Т. Чау (Колледж

¹ Постановление Президента Республики Узбекистан от 26.05.2017 г. № ПП-3012 «О программе мер по дальнейшему развитию возобновляемой энергетики, повышению энергоэффективности в отраслях экономики и социальной сфере на 2017–2021 годы». Собрание законодательства Республики Узбекистан, 2017 г. № 22 (782), ст. 424. – СС. 323–346.

² Указ Президента Республики Узбекистан № УП-4947 от 07.02.2017 г. «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан». Собрание законодательства Республики Узбекистан, 2017 г. № 6 (766), ст. 70. – С. 223–248.

³ Постановление Президента № ПП-2772 от 13 февраля 2017 г. «О мерах по дальнейшему совершенствованию управления, ускоренному развитию и диверсификации электротехнической промышленности на 2017–2021 гг.». Национальная база данных законодательства, 13.02.2017 г.

⁴ Постановление Президента Республики Узбекистан от 17.02.2017 г. № ПП-2789 «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности». Собрание законодательства Республики Узбекистан, 2017 г. № 8 (768), ст. 117. – СС. 289–300.

науки и техники, Китай) и др. Ими показано, что повышение рабочей температуры элементов и модулей линейно снижает эффективность преобразования и, следовательно, уменьшает выходную мощность.

В Узбекистане основателем современной научной школы решающей проблемы, связанные с нагревом полупроводниковых кремниевых солнечных элементов и фотоэлектрических модулей, является М.Н. Турсунов. В данном направлении проводили исследования его ученики А.Г. Комилов и И.А. Юлдошев. Теоретическому анализу тепловых процессов в фототеплопреобразователях и системах на их основе посвящён ряд работ Р.Р. Аvezова, Ш.И. Клычева, Ж.С. Ахатова и Н.Р. Аvezовой. За рубежом в этом направлении работают многочисленные специалисты. К наиболее известным относятся Т.Т. Чау (Китай), А.С. Джоши (Канада), Ю. Трипанангостопулос (Греция), Х.А. Зондаг (Нидерланды) и другие, что свидетельствует о необходимости проведения исследований и разработок в данной области.

Связь темы диссертации с научными исследованиями научно-исследовательской организации, где выполнена диссертационная работа. Работа выполнена в Физико-техническом институте НПО «Физика – Солнце» АН РУз в соответствии с планами научно-исследовательских работ, проведённых в рамках государственного научно-технического проекта на тему А-12-007 «Разработка фотоэлектрической установки на основе кремниевых солнечных элементов, эффективно работающих в условиях жаркого климата» (2009–2011 гг.), международного узбекско-корейского научно-технического проекта МК-47/2012 «Разработка и изготовление переносного фотоэлектрического источника питания для сельского жителя» (2013–2015 гг.) и инновационного проекта ИЗ-ФА-0-11738 «Создание и ввод в действие автономного многофункционального комплекса на основе фотоэлектрической, фототепловой и биогазовой установок для обеспечения энергией объектов животноводческой фермы» (2013–2014 гг.).

Целью исследования является разработка кремниевых солнечных элементов, фотоэлектрических модулей и комбинированных фототеплопреобразователей жидкостного типа, предназначенных для генерирования электрической энергии в условиях жаркого климата.

В соответствии с поставленной целью решались следующие **задачи исследования:**

разработать фотоэлектрические модули из кремниевых монокристаллических солнечных элементов с тонкой базой (≤ 200 мкм), имеющие удельное сопротивление 2 и 10 Ом·см и мелкозалегающие *p-n*-переходы (≤ 1 мкм);

выявить особенности температурных зависимостей напряжения холостого хода, тока короткого замыкания и вольтамперных характеристик кремниевых монокристаллических фотоэлектрических модулей в зависимости от электрофизических свойств исходного материала;

установить причину низкого уровня заряда свинцово-кислотных

аккумуляторных батарей при использовании стандартных 36-элементных кремниевых моно- и мультикристаллических фотоэлектрических модулей, связанную с нагревом, и разработать фотоэлектрические модули и автономные фотоэлектрические системы, предназначенные для работы в условиях жаркого климата;

разработать контроллер заряда, учитывающий особенности процессов заряда и разряда аккумуляторных батарей от кремниевых моно- и мультикристаллических фотоэлектрических модулей;

разработать тепловую модель плоского фототеплопреобразователя жидкостного типа для определения его тепловых и механических параметров и характеристик;

разработать автономные фототеплопреобразовательные системы плоской конструкции с жидким теплоносителем без принудительной циркуляции для получения электрической энергии и имеющей отвод низкопотенциальной тепловой энергии от фотоэлектрического модуля.

Объектом исследования являются конструкции фотоэлектрических элементов, модулей и систем, эффективно работающих в условиях жаркого климата.

Предметом исследования являются способы изготовления полупроводниковых солнечных элементов, фотоэлектрических модулей и комбинированных фототеплопреобразователей, использующих жидкостное охлаждение, а также их электрические, механические и тепловые свойства, зависящие от температуры.

Методы исследования. В процессе выполнения диссертационной работы применялись технологические методы (механическая обработка, химическое травление, диффузия из газовой фазы, вакуумное напыление, скрайбирование, пайка, герметизация), методы измерения электрических и тепловых параметров (напряжения, токи, мощности, КПД, температуры), характеристик (ВАХ, зависимость электрических и тепловых характеристик от времени и температуры) и математические методы моделирования тепловых процессов.

Научная новизна исследования:

разработаны фотоэлектрические модули из кремниевых монокристаллических солнечных элементов с тонкой базой (≤ 200 мкм), имеющие удельное сопротивление 2 и 10 Ом·см и мелкозалегающие p - n -переходы (≤ 1 мкм), полученные методом термодиффузии из твердотельных диффузантов;

впервые экспериментально показано, что температурные коэффициенты напряжения холостого хода ($\Delta U_{XX}/\Delta T$) и тока короткого замыкания ($\Delta I_{КЗ}/\Delta T$) стандартных фотоэлектрических модулей, изготовленных из монокристаллических кремниевых солнечных элементов с разными типами проводимости и удельными сопротивлениями ($\rho(n) = 2$ Ом·см и $\rho(p) = 10$ Ом·см) при одинаковом нагреве солнечным излучением, превышающем в 2–3 раза температуру при стандартных условиях испытаний

($T_{\text{ФЭМ}} > [2\div 3] \times T_{\text{СТС}}$), различаются в 1,5 раза;

впервые установлено, что уменьшение напряжения в точке оптимальной мощности стандартных фотоэлектрических модулей из 36 кремниевых моно- и мультикристаллических солнечных элементов при температурах модулей, превышающих в 2–3 раза температуру при стандартных условиях испытаний ($T_{\text{ФЭМ}} \geq T_{\text{СТС}}$), свинцово-кислотные аккумуляторные батареи заряжаются током обратно пропорциональным температуре модуля ($I_{\text{ФЭМ}} \sim T_{\text{ФЭМ}}^{-1}$);

впервые разработаны кремниевые фотоэлектрические модули из 40 кремниевых солнечных элементов и системы на их основе, позволяющие компенсировать дефицит напряжения, возникающий в результате нагрева;

разработана тепловая модель фототеплопреобразователя плоской конструкции жидкостного типа без принудительной циркуляции, позволившая впервые определять температуру солнечных элементов в фототеплопреобразователе;

впервые разработаны фототеплопреобразователи плоской конструкции жидкостного типа без принудительной циркуляции, в которых контакт теплоносителя с тыльной поверхностью фотоэлектрического модуля происходит через полиэтиленовый слой.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработана технология изготовления кремниевых монокристаллических солнечных элементов и модулей, предназначенных для работы в жарких климатических условиях;

разработаны конструкции фотоэлектрических систем с кремниевыми кристаллическими фотоэлектрическими модулями, предназначенными для работы при температурах выше температур применяемых при сертификации в стандартных условиях испытаний;

разработан контроллер заряда свинцово-кислотных аккумуляторных батарей, учитывающий особенности заряда от фотоэлектрических модулей, предназначенных для работы в условиях жаркого климата;

созданы конструкции стационарных и переносных плоских фототеплопреобразовательных систем с жидким теплоносителем без принудительной циркуляции, состоящих из разных по количеству и типу кристаллического материала кремниевых фотоэлектрических модулей;

разработан комплекс программ, позволяющий проводить расчёт тепловых и механических параметров плоского фототеплопреобразователя.

Достоверность результатов исследования обеспечена использованием современных научных представлений теории фотоэлектрического преобразования солнечного излучения элементами и системами на их основе и представлений о тепловых процессах в плоских водонагревательных солнечных коллекторах, а также стандартных методов экспериментального исследования их параметров и характеристик. В экспериментальных исследованиях использовались измерительные приборы, испытательные стенды, испытательный полигон и опытно-технологическая база ФТИ НПО «Физика–Солнце» АН РУз. В расчётах использовались методы и средства вычисления,

широко применяемые при проведении подобного рода работ. Испытания фотоэлектрических модулей и систем проводились в течение 5–6 лет, комбинированных фототеплопреобразовательных систем — 3 года.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Полученные результаты позволяют расширить представления о взаимосвязи процессов генерирования электрической и тепловой энергии в фототеплопреобразовательных системах с жидким теплоносителем.

Технологические методы изготовления солнечных элементов и модулей, разработанные конструкции фотоэлектрических систем различного назначения и накопленный опыт эксплуатационных испытаний разработанных оборудования позволит локализовать производство оборудования и приборов, учитывающих особенности работы в условиях жаркого климата.

Внедрение результатов исследования.

На основе созданных солнечных элементов и фототеплопреобразователей, эффективных для жаркого климата:

разработан модуль фотоэлектрической установки из кремниевых монокристаллических солнечных элементов, полученных методом термодиффузии, на который получен патент на промышленный образец Государственного патентного ведомства Республики Узбекистан («Модуль фотоэлектрической установки», №SAP00859, 2010г.). Усовершенствованный модуль фотоэлектрической установки позволил увеличить коэффициент полезного действия;

конструкция плоской фототеплопреобразовательной системы со свободной конвекцией и метод определения температуры солнечных элементов по напряжению холостого хода позволил разработать «Солнечную комбинированную фототеплопреобразовательную установку», которая победила в номинации «Самый лучший инновационный проект молодых учёных и студентов» на III «Республиканской ярмарке инновационных идей, технологий и проектов» (2010 г.). Усовершенствованная фотоэлектрическая установка позволяет экономить энергию.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 6 международных и 5 республиканских конференциях.

Публикация результатов исследований. По материалам диссертации опубликовано 25 научных работ, в том числе 11 научных статей в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией РУз для публикации основных научных результатов диссертаций, из них 7 работ в зарубежных, 12 тезисов докладов в сборниках материалов конференций и 2 патента.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, основной части, заключения, списка использованной литературы, списка условных обозначений и терминов и двух приложений. Объём диссертации составляет 126 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обосновывается актуальность темы, рассматривается связь диссертационного исследования с приоритетным направлением развития науки и технологий, в частности с возобновляемой энергетикой в республике. Сделан обзор основных научных исследований, проводимых в мире по темам, затрагиваемым в диссертации, проанализирована степень изученности проблемы. Показана связь диссертации с научными исследованиями организации, где выполнена диссертационная работа. Сформулирована цель и поставлены задачи, определены объект, предмет и методы исследования, выявлена научная новизна, определены критерии достоверности полученных результатов, показана научная и практическая значимость результатов исследования, даны краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, кратко излагаются содержание и приведена информация об объёме и структуре диссертации.

Первая глава **«Полупроводниковые солнечные элементы, фотоэлектрические модули и фототеплопреобразователи»** посвящена литературному обзору известных типов однопереходных солнечных элементов (СЭ) из различных полупроводниковых материалов, конструкциям фотоэлектрических модулей (ФЭМ) и фотоэлектрических систем (ФЭС). Проведён анализ основных потерь, связанных с конструкцией и материалом моно- и поликристаллических СЭ. Рассмотрено влияние температуры на СЭ и ФЭМ, и способы её снижения. Рассмотрен принцип работы, конструкции фототеплопреобразователей (ФТП) и фототеплопреобразовательных систем (ФТПС) жидкостного типа. На основе анализа литературных данных определены цель и задачи диссертационной работы.

Вторая глава **«Разработка кремниевых солнечных элементов и фототеплопреобразователей»** посвящена научным и технологическим аспектам разработки кремниевых СЭ, ФЭМ и ФТПС для эффективной работы в условиях жаркого климата.

Поэтапно рассмотрена технология изготовления СЭ от стадии сортировки исходных подложек до момента соединения элементов в ФЭМ. Технология предназначена для изготовления СЭ из монокристаллических пластин кремния *n*- и *p*-типа проводимости диаметром 76 мм. В отличие от традиционной технологии с применением заводских пластин монокристаллического кремния толщиной $300 \text{ мкм} \pm 10\%$ предлагаемая технологическая схема позволяет применять пластины, не прошедшие отбраковку при изготовлении полупроводниковых приборов и микросхем, что требует введения этапа сортировки в начале цикла. Этап механической обработки модифицирован с учётом особенности исходного материала и включает в себя более длительную шлифовку пластин, необходимую для удаления полученных ранее эпитаксиальных и диффузионных слоёв. Повышенная хрупкость кремниевых пластин накладывает ограничение на максимально достижимую толщину, ограниченную значением $200 \text{ мкм} \pm 10\%$, что соответствует условию, когда для увеличения

пропускания пластиной кремния части инфракрасной области солнечного излучения, приводящего к нагреву, требуется именно данная толщина. Дальнейшее уменьшение толщины приводит к увеличению брака в процессе изготовления структуры.

Диффузионные процессы проводились в электропечи СДО-125/3-15,0 с открытой трубой. Пластины нитрида бора после очистки в азотной кислоте и сушки при 600 °С загружались посредством кварцевой лодочки в реактор. Насыщение реактора бором проводилось при температуре 1100 °С в течение 60 мин. Процесс диффузии проводился при температуре 1050 °С. Расстояние между пластинами нитрида бора и кремния (КЭФ-10) выдерживалось равным 2–2,5 мм (подобрано эмпирически). Глубина залегания p - n -перехода в зависимости от режима 0,4–1 мкм. В качестве инертной среды при проведении процесса диффузии бора использовали азот или сухой воздух. Для проведения дальнейших операций p - n -переход с тыльной части пластин удалялся шлифовкой микропорошком М7, а боросиликатное стекло с фронтальной поверхности удалялось в плавиковой кислоте.

Диффузия фосфора проводилась при температурах 1030–1050 °С в течение 20–40 мин. При этом глубина залегания p - n -перехода составляла от 0,4 до 0,7 мкм. Удаление p - n -перехода с тыльной стороны пластины (КДБ-2) и очистка фронтальной поверхности от остатков фосфоросиликатного стекла проводилась аналогично, как в случае диффузии бора. Изотипный p - p^+ -переход на тыльной стороне пластин осуществлялся методом отжига алюминия. После формирования мелкозалегającego p - n -перехода диффузией фосфора с тыльной стороны структуры удалялся встречный p - n -переход. Затем формировался p - p^+ -переход на тыльной стороне пластин отжигом алюминия с применением защитного покрытия из монооксида кремния.

Для получения низкоомного омического контакта на поверхностях СЭ использована многослойная система, состоящая из Ti–Ni–Cu, позволившая достичь хорошей адгезии контактной сетки с подложкой.

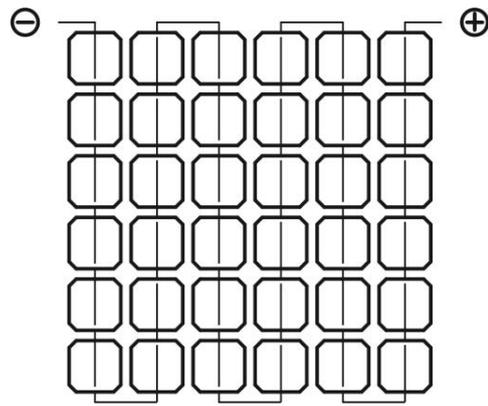
Для создания просветляющего покрытия на фронтальной поверхности были использованы оксиды кремния (SiO_x ($x = 1 \div 2$)), фундаментальные свойства которого были изучены в экспериментах по ионному распылению. Изучены стабильности и возможные структурные схемы кластерных ионов Si_nO_m^- ($n = 1 \div 7$, $m = 1 \div 15$) и Si_nO_m^+ ($n = 1 \div 3$, $m = 1 \div 4$). Установлено, что стабильные кластерные ионы являются комплексными ионами, состоящими из мономера диоксида кремния и кислорода, несущего заряд. Данное обстоятельство определяет высокую химическую стойкость слоёв SiO_2 .

Описаны процессы изготовления ФЭМ и ФТП. В частности, особое внимание уделено влагостойкой герметизации СЭ в ФЭМ. В результате получены ФЭМ из СЭ n -типа с удельной проводимостью $\rho = 2$ Ом·см и p -типа с $\rho = 10$ Ом·см, состоящие из 36 элементов (рис. 1).

Описана технология производства и особенности аккумулятора теплоты и опорно-ориентационного механизма ФТПС. Простота конструкции аккумулирующей системы исключает теплообменник, в котором неизбежны



а)



б)

Рис. 1. ФЭМ из 36 кремниевых монокристаллических СЭ:
а) фотография; б) схема электрических соединений.

потери на преобразование энергии, а в качестве теплоаккумулирующего вещества используется вода, являющаяся одновременно теплоносителем.

Третья глава «Испытание солнечных элементов, фотоэлектрических модулей и систем в условиях жаркого климата» посвящена испытанию и анализу основных электрических параметров изготовленных кремниевых СЭ и ФЭМ в условиях жаркого климата. Использовались два вида монокристаллических кремниевых пластин. Исходные подложки обоих видов имели диаметр 76 мм. Первый вид был отбракован в процессе производства интегральных схем и имел толщину эпитаксиального слоя 3,3–20 мкм *n*-типа проводимости, легированного фосфором, при этом удельное сопротивление эпитаксиального слоя варьировалось в пределах 0,8–7,5 Ом·см. Подложки *p*-типа проводимости, легированные бором (КДБ-10), имели толщину 300–380 мкм с ориентацией кристаллографических осей в плоскости (111) и удельное сопротивление $\rho = 10$ Ом·см. После удаления эпитаксиального слоя изготавливался *p–n*-переход методом диффузии фосфора на глубину ≈ 1 мкм. Вторым видом подложек являлись пластины кремния *n*-типа проводимости, легированного фосфором, с удельным сопротивлением $\rho = 2$ Ом·см (КЭФ-2) и ориентацией кристаллографических осей (100). Пластины второго вида имели толщину 350 мкм. *p–n*-переход изготавливался методом диффузии бора на глубину 0,4–0,5 мкм.

Полученные СЭ использовались для изготовления двух видов ФЭМ (*p*- и *n*-типа проводимости), состоящих из 36 последовательно соединённых элементов. При потоке солнечного излучения $G = 800$ Вт/м² элементы *p*-типа ФЭМ генерируют ток короткого замыкания около 500 мА и напряжение холостого хода 19,7 В ($T = 20$ °С), а ФЭМ на элементах *n*-типа вырабатывает ток короткого замыкания величиной до 600 мА и напряжение холостого хода 20,6 В ($T = 20$ °С). Эффективная площадь ФЭМ одинакова (0,15 м²).

Температурные зависимости выходных параметров ФЭМ двух типов приведены на рис. 2. В интервале приведённых температур напряжение холостого хода $U_{ХХ}$ уменьшается линейно, а ток короткого замыкания $I_{КЗ}$

слабо увеличивается. Характер этих зависимостей качественно согласуется с теоретическими результатами. Температурные коэффициенты напряжения холостого хода и тока короткого замыкания ФЭМ из монокристаллического кремния n -типа с удельным сопротивлением $\rho = 2 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ имеет величину $\Delta U_{\text{ХХ}}/\Delta T = 57,14 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$ и $\Delta I_{\text{КЗ}}/\Delta T = 0,54 \text{ мА}/^\circ\text{C}$ соответственно, а ФЭМ из монокристаллического кремния p -типа с удельным сопротивлением $\rho = 10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ — $\Delta U_{\text{ХХ}}/\Delta T = 91,53 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$ и $\Delta I_{\text{КЗ}}/\Delta T = 0,81 \text{ мА}/^\circ\text{C}$ соответственно. Температурный коэффициент напряжения СЭ в ФЭМ из монокристаллического кремния n -типа имеет величину в 1,5–1,6 раз меньшую по сравнению с данными и в 1,6 раз меньшую по сравнению с температурным коэффициентом СЭ из кремния p -типа. Последнее обстоятельство позволяет сделать вывод, что меньшей температурной чувствительностью по напряжению холостого хода обладают СЭ, изготовленные из пластин n -типа полупроводникового производства.

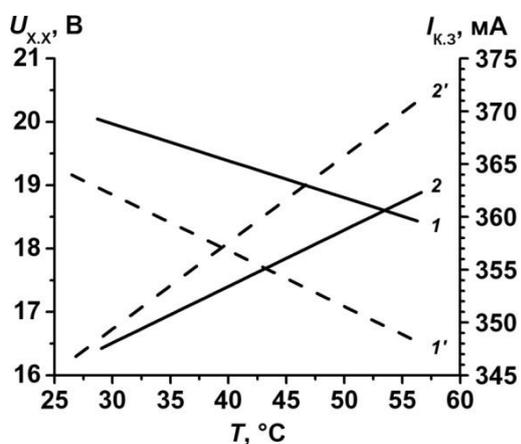


Рис. 2. Температурные зависимости напряжения холостого хода ($U_{\text{ХХ}}$) и тока короткого замыкания ($I_{\text{КЗ}}$) ФЭМ из n -Si с $\rho = 2 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ (кривые 1 и 2) и p -Si с $\rho = 10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ (кривые 1' и 2'). Кривые 1, 1' — $U_{\text{ХХ}}$; 2, 2' — $I_{\text{КЗ}}$.

Уменьшение $U_{\text{ХХ}}$ ФЭМ при повышении температуры вызвано в основном повышением концентрации собственных носителей зарядов в СЭ. Ток насыщения возрастает экспоненциально по мере роста температуры, что приводит почти к линейному спаду $U_{\text{ХХ}}$ при увеличении температуры, а изменение $I_{\text{КЗ}}$ не существенно — $\Delta I_{\text{КЗ}}/\Delta T < 1 \text{ мА}/^\circ\text{C}$.

Следует отметить, что температурные коэффициенты напряжения $\Delta U_{\text{ХХ}}/\Delta T$ и тока $\Delta I_{\text{КЗ}}/\Delta T$ ФЭМ коррелируют с удельным сопротивлением материала СЭ. Поэтому будет целесообразным в жарких условиях использовать СЭ с исходным удельным сопротивлением кремния менее $2 \text{ Ом}\cdot\text{см}$.

Семейства ВАХ, снятых при разных температурах ФЭМ из p -Si с $\rho = 10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ и n -Si с $\rho = 2 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ приведены на рис. 3. Измерения проводились при естественном солнечном освещении ФЭМ с интенсивностью потока излучения $\approx 500 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Низкое значение величины мощности падающего излучения связано с изменением локальной прозрачности атмосферы в результате загрязнения промышленными и транспортными отходами в дневное время в Ташкенте, во второй половине дня в июле–августе.

Рассмотрено негативное влияние нагрева фотоэлектрических модулей на

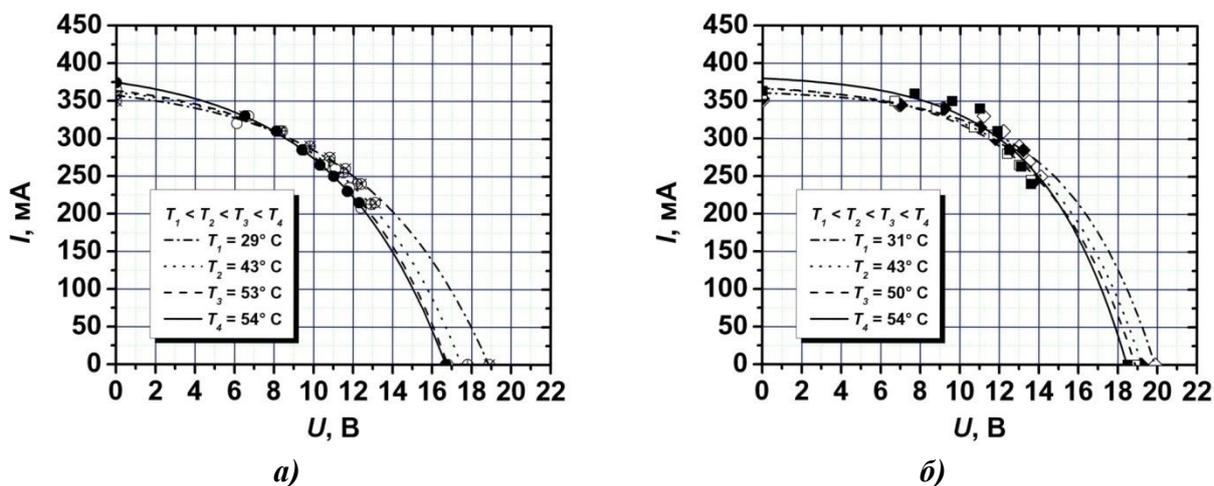


Рис. 3. Изменение ВАХ с ростом температуры ФЭМ из кремниевыхпод действием прямой солнечной радиации СЭ: а) *p*-тип; б) *n*-тип.

процесс заряда аккумуляторных батарей. Уменьшение выходной мощности приводит к несоответствию заявленной мощности ФЭМ, измеренной в лабораторных условиях при $T_0 = 25\text{ °C}$ (STC), мощности в реальных условиях эксплуатации при $T_A > T_0$, где $T_A = 30\div 50\text{ °C}$, а температура СЭ ($T_{СЭ}$) может достигать 90 °C . Основной причиной уменьшения мощности ФЭМ является падение напряжения холостого хода СЭ. Вследствие этого в ФЭС, использующей аккумулятирование электрической энергии, существенно уменьшается ток заряда аккумуляторной батареи (АБ). Последнее обстоятельство в некоторых случаях приводит к снижению эффективности преобразования до 50% от стандартных условий испытаний (STC).

Для наглядности рассмотрены изменения ВАХ ФЭМ, связанные с ростом температуры. ВАХ, соответствующая согласованному режиму работы ФЭМ, при котором отдаваемая им мощность достигает максимального значения, представлена на рис. 4 (STC). В реальных условиях, даже когда температура окружающего воздуха меньше температуры при STC ($T_A < T_0$) температура СЭ больше температуры элементов при сертификации. На рис.4 представлено семейство ВАХ (кривые 1, 2 и 3), полученные при различных температурах СЭ ($T_1 > T_2 > T_3$) и температурах окружающего воздуха. Величины $I_{m,1}$ и $U_{m,1}$ — значения тока и напряжения, при которых достигается максимальная выходная мощность ФЭМ ($P_{m,1} = I_{m,1}U_{m,1}$) при температуре $T_1 = 35\text{ °C}$.

В случае ФЭМ, рассчитанных для применения в ФЭС с номинальным напряжением 12 В, количество СЭ равно 36. Значение напряжения ФЭМ, соответствующего точке максимальной мощности (P_m) при STC, имеет величину $U_m = 18\text{ В}$ ($\pm 1\%$). В случае нагрева СЭ на 10 °C величина этого напряжения уменьшается на $0,7\text{--}0,9\text{ В}$. Однако в отличие от омической нагрузки, когда изменение напряжения на нагрузке зависит от протекающего тока в цепи, в случае АБ при изменении разности потенциалов ток остаётся практически постоянным. Поэтому выходные характеристики ФЭМ автономных ФЭС необходимо сочетать с эксплуатационными характери-

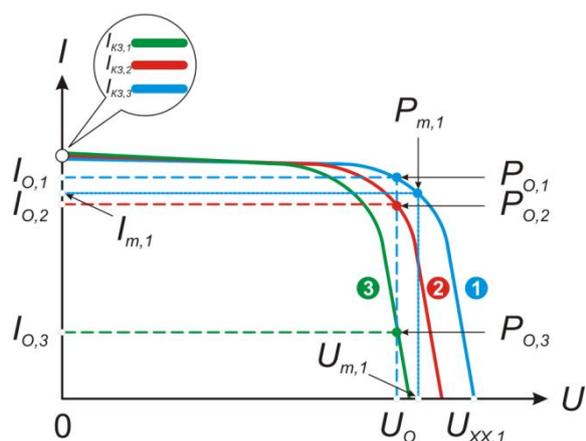


Рис. 4. Вольтамперные характеристики ФЭМ при разных температурах:
 1 – $T_1 = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ ($T_A = 15 \text{ }^\circ\text{C}$);
 2 – $T_2 = 54 \text{ }^\circ\text{C}$ ($T_A = 30 \text{ }^\circ\text{C}$);
 3 – $T_3 = 71 \text{ }^\circ\text{C}$ ($T_A = 45 \text{ }^\circ\text{C}$).

ками подсистемы аккумулирования электрической энергии, а именно с номинальным (стандартным) напряжением и током заряда, которые устанавливаются нормативно-технической документацией на АБ. В случае применения свинцово-кислотных АБ, произведённых по технологии AGM, и эксплуатации их в циклическом режиме или в режиме выравнивающего заряда для завершения полного цикла заряда требуется поддерживать напряжение в пределах 14,1–14,4 В. На рис. 4 верхнему пределу этого диапазона соответствует напряжение (U_o), оптимальное для полной зарядки АБ. При этом ток, генерируемый ФЭМ ($I_{o,1}$), в случае глубокого разряда АБ полностью расходуется на заряд, и мощность ФЭМ, отдаваемая АБ в процессе заряда, равна $P_{o,1} = I_{o,1}U_{o,1}$ (рис. 4). Как видно из рис. 4 с повышением температуры СЭ ($T_1 = 35 \text{ }^\circ\text{C}$) величина зарядного тока может увеличиваться ($I_{o,1} > I_{m,1}$). Дальнейшее увеличение температуры СЭ ($T_2 = 54 \text{ }^\circ\text{C}$) при неизменном напряжении U_o (рис. 4, 2) приводит к уменьшению зарядного тока ($I_{o,2} < I_{o,1}$). В случае, когда температура СЭ ещё выше ($T_3 = 71 \text{ }^\circ\text{C}$) номинальному значению U_o соответствует ток $I_{o,3}$ ($I_{o,3} < I_{o,2} < I_{o,1}$). Отсюда следует, что в случае неизменного значения напряжения заряда АБ (U_o) ток заряда зависит от температуры СЭ, находящихся в ФЭМ. При этом перегрев СЭ на 40–60 °С относительно температуры при STC ($T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$) приводит либо к медленному заряду, либо к отсутствию полного заряда АБ и в конечном итоге к её неисправности.

Измерения, проведенные в июле–августе при скорости ветра 1–3 м/с, показали, что разность температур по сравнению со значением в стандартных условиях испытаний доходит до 52 °С при температуре окружающей среды 47–48 °С, что приводит к уменьшению U_{xx} в среднем с 20,3 В до 16,4 В.

Таким образом, при высоких температурах, характерных для Узбекистана в летнее время года (особенно в случаях, когда скорость ветра менее 5 м/с), ФЭМ, изготовленные из 36 СЭ, не могут обеспечить необходимый ток заряда АБ, который с увеличением температуры уменьшается в несколько раз.

Описаны конструкции разработанных ФЭС уличного освещения и электропитания оборудования сейсмологических станций, предназначенных для работы в условиях жаркого климата. В разработанной ФЭС уличного

освещения использован ФЭМ из 36 кремниевых монокристаллических СЭ, который является основным. Чтобы компенсировать потери по напряжению холостого хода ФЭМ, связанные с негативным влиянием перегрева в условиях г. Намангана, к основному модулю дополнительно подключен ФЭМ, состоящий из 4 последовательно соединённых СЭ. СЭ в дополнительном ФЭМ идентичны по конструкции и электрическим параметрам СЭ, которые используются в основном модуле. Дополнительный ФЭМ расположен над основным. Оба ФЭМ закреплены на стальной конструкции, которая позволяет при монтаже разворачивать их в горизонтальной и вертикальной плоскости. Такая конструкция позволяет оптимально ориентировать ФЭМ относительно положения Солнца. ФЭМ установлены под углом наклона относительно линии горизонта, равным широте местности (для условий Намангана $40\text{--}41^\circ$). Для защиты фронтальной поверхности ФЭМ от помёта птиц использованы пластины с зубчатой кромкой. Стальная конструкция для ориентирования ФЭМ является частью несущей конструкции, удерживающей подсистему аккумулирования электрической энергии и подсистему освещения. Несущая конструкция ФЭС системы освещения закреплена на железобетонном столбе высотой 9 м.

Проведение исследований, основной задачей которых являлось совершенствование конструкций ФЭМ с целью повышения эффективности их работы в условиях жаркого климата, позволило создать новые автономные ФЭС мощностью 280 Вт, основным компонентом которой является ФЭМ (рис. 5), состоящие из СЭ на основе поликристаллического кремния с КПД 14,4%. Используемые СЭ произведены в Республике Корея. Размеры и толщина составляют соответственно $156 \times 156 \times 0,2$ мм. Поверхность элементов имеет просветляющее покрытие, нанесенное на текстурированный фронтальный слой.

Подсистема генерирования электрической энергии ФЭС состоит из двух ФЭМ, установленных на опорно-поворотном устройстве. Каждый ФЭМ состоит из соединенных последовательно 40 СЭ (рис. 5). Подсистема аккумулирования электрической энергии состоит из АБ номинальной ёмкостью 200 А·ч, контролера заряда АБ. Потребителем электрической

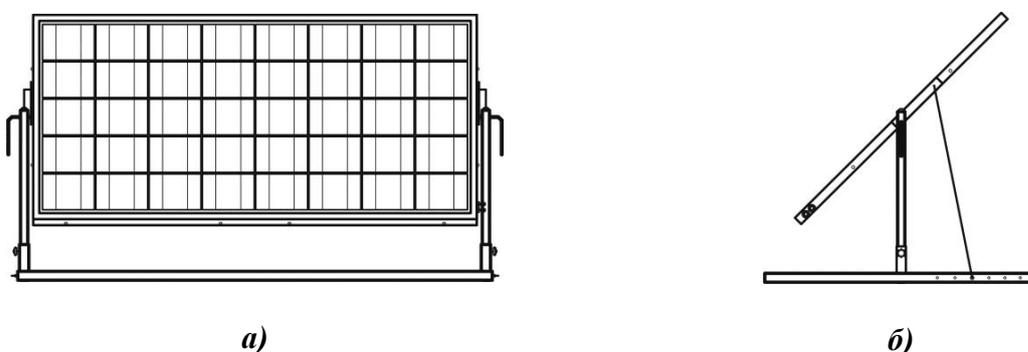


Рис. 5. Фотоэлектрический модуль на опорно-поворотном устройстве:
а) вид спереди; б) вид справа.

энергии является инвертор напряжения, нагруженный измерительным оборудованием сейсмологической станции.

Рассмотрена конструкция и принцип работы контроллера заряда (КЗ) свинцово-кислотных АБ, заряжаемых от ФЭМ. Разработанный контроллер заряда АБ (рис. 6) работает по принципу, аналогичному работе параллельного стабилизатора напряжения, а роль балластного сопротивления выполняет внутреннее сопротивление ФЭМ. Если напряжение разомкнутой цепи (НРЦ) заряжаемой АБ меньше величины соответствующей полному её заряду, то схема управления устанавливает транзистор Т в закрытое состояние. В этом случае ток, генерируемый ФЭМ, полностью используется для зарядки АБ. По мере заряда АБ и достижения величины НРЦ, соответствующей 100% заряженности, управляющая схема открывает транзистор Т, и ток ФЭМ ответвляется через транзистор, не доходя до АБ, предотвращая дальнейшее возрастание напряжения аккумулятора и его перезаряд.

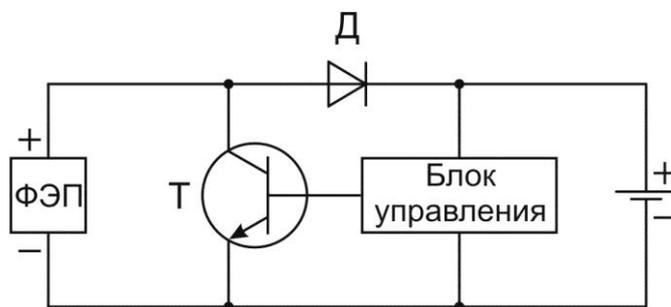


Рис. 6. Функциональная схема КЗ АБ.

Поскольку состояние полной заряженности АБ возникает не мгновенно, то и транзистор Т перейдет в открытое состояние не сразу, а постепенно, уменьшая зарядный ток до величины соответствующей току подпитки АБ, который компенсирует его саморазряд. Достоинством такого построения схемы является то, что в основной цепи тока заряда АБ от ФЭМ нет регулирующих и управляющих элементов, создающих потери энергии ФЭМ. Есть потери энергии только на защитном диоде Д, назначение которого предотвращать разряд АБ через ФЭМ в темное время суток и на схеме управления контроллера (не более 0,2 Вт).

Энергия описанных потерь превращается в контроллере в тепло и выводится через тыльную стенку корпуса, которая охлаждается естественной конвекцией окружающего воздуха. Схема также обеспечивает сохранение максимального значения заданного выходного напряжения, подаваемого потребителю в отсутствие АБ при напряжении холостого хода ФЭМ большим, чем на АБ. В этом случае схема работает как параллельный стабилизатор напряжения.

Четвертая глава «Плоские фототеплопреобразовательные системы жидкостного типа» посвящена разработанным конструкциям и описанию принципа работы плоских ФТП и ФТПС. ФТП состоит из ФЭМ, который выполняет двойную функцию, а именно поглощает солнечное излучение,

часть его преобразует в электричество, остальную часть энергии передаёт теплоносителю в виде теплоты (рис. 7). Если рассматривать ФЭМ как элемент плоского солнечного коллектора (СК), то СЭ, тыльный слой герметизирующего компаунда, защитная плёнка, окрашенная в чёрный цвет (телопоглощающий слой), образуют поглощающую поверхность СК. Прозрачные относительно основной части спектра поглощения СЭ покрытия (защитное стекло и фронтальный слой герметизирующего компаунда) расположены над поглощающей поверхностью. Они уменьшают конвективные и радиационные потери в атмосферу коллекторной части ФТП. Передача тепла теплоносителю происходит в теплоотводящем канале. Таким образом, ФЭМ используется одновременно как генератор электрической энергии и как абсорбер СК. В такой конструкции теплоноситель СК поступает через входной штуцер и затем по трубопроводу в теплоотводящий канал, где нагревается за счёт охлаждения тыльной поверхности ФЭМ посредством процессов передачи теплоты. При определённом угле наклона ФТП происходит перемещение тёплых слоёв теплоносителя относительно холодных в сторону выходного канала, перенося при таком движении теплоту.

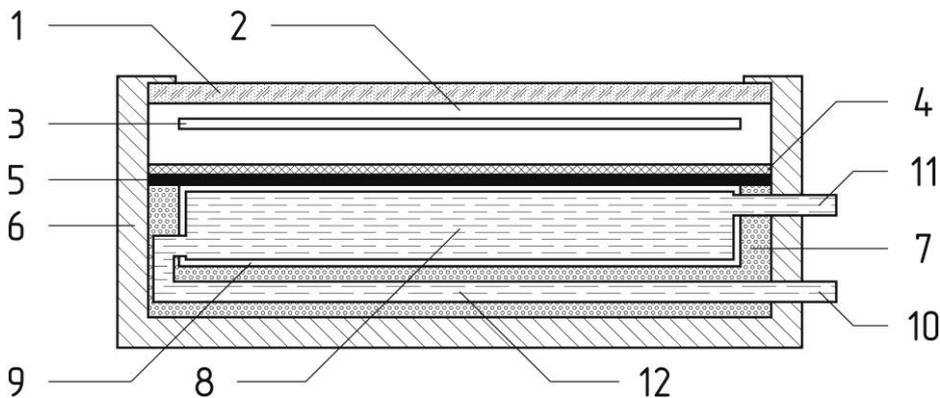


Рис. 7. Схема расположения элементов ФТП:

- 1 – защитное стекло; 2 – герметизирующий компаунд; 3 – СЭ; 4 – защитная плёнка;**
5 – теплопоглощающий слой; 6 – корпус; 7 – теплоизоляция;
8 – теплоотводящий канал; 9 – полимерная оболочка; 10 – входной штуцер;
11 – выходной канал; 12 – трубопровод.

Рассмотрены тепловые процессы в данном ФТП и описана методика вычисления параметров коллекторной части энергоустановки. Тепловые процессы, протекающие в рассматриваемом ФТП, аналогичны процессам, протекающим в плоских СК, поэтому для определения тепловых потерь и температур слоёв ФТП используется метод, в котором взаимосвязанные тепловые процессы представляются единой тепловой цепью (рис. 8).

Линейные размеры слоёв ФТП много больше их толщин, поэтому потери тепла с торцов ФТП не учитываются, а температура вдоль поверхности каждого слоя считается постоянной. Солнечное излучение с энергией G нагревает поглощающую поверхность с температурой T_p . Эта энергия затрачивается на нагревание теплоносителя (Q_U) и на потери через

фронтальную и тыльную стороны ФТП.

Потери энергии через тыльную сторону корпуса ФТП представлены тремя сопротивлениями R_1 , $R_{2,1}$ и $R_{2,2}$: R_1 — термическое сопротивление теплоизоляции, а $R_{2,1}$ и $R_{2,2}$ — сопротивления, обусловленные конвекцией и

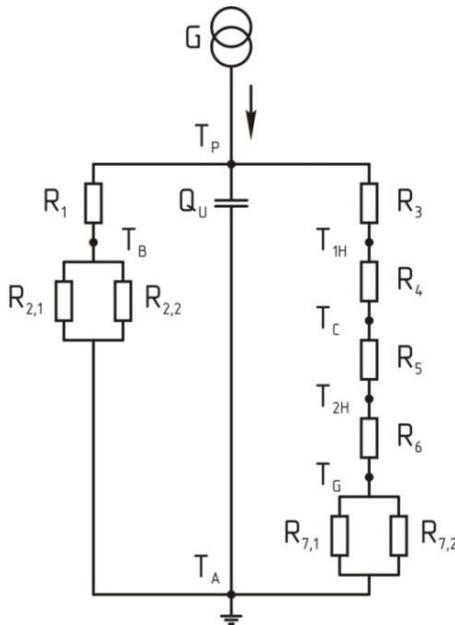


Рис. 8. Тепловая схема ФТП.

излучением в окружающую среду соответственно. Температура тыльной стороны корпуса равна T_B .

Потери энергии посредством излучения стеклянным защитным покрытием в окружающую среду равны количеству энергии, переносимому от теплопоглощающего слоя с температурой T_P к тыльному слою герметика с температурой $T_{ИН}$, далее к СЭ с температурой T_C и фронтальному слою герметика с температурой $T_{2Н}$. R_3 , R_4 , R_5 и R_6 — термические сопротивления теплопоглощающего слоя, тыльного слоя герметизирующего компаунда, СЭ и

фронтального слоя герметизирующего компаунда соответственно $R_{7,1}$ и $R_{7,2}$ — это сопротивления обусловленные конвекцией и излучением в окружающую среду с температурой T_A через стекло с температурой T_G .

Потери с фронтальной поверхности ФТП обусловлены излучением и конвекцией. Приближённые значения коэффициента конвективной теплоотдачи:

$$h_w = 5,7 + 3,8V, \quad (1)$$

где V — скорость ветра.

Коэффициент потерь посредством излучения через защитное стекло определяется из соотношения

$$h_{G \rightarrow S} = \varepsilon_G \sigma (T_G^2 + T_S^2) (T_G + T_S), \quad (2)$$

где ε_G — степень черноты стекла, σ — постоянная Стефана–Больцмана, T_S — температура небосвода. Потери энергии через стекло в окружающую среду с единицы площади в единицу времени равны

$$q_{G \rightarrow S} = (h_{G \rightarrow S} + h_w) (T_G - T_S). \quad (3)$$

Тогда выражение для сопротивлений переносу тепла от защитного стекла к окружающей среде $R_{7,1}$ и $R_{7,2}$ можно представить в виде R_7 , которое можно определить из

$$R_7 = \frac{1}{h_{G \rightarrow S} + h_w}. \quad (4)$$

Радиационное сопротивление защитного стекла учитывает теплообмен излучением с небосводом при температуре T_S . Для простоты будем относить это сопротивление к температуре воздуха T_A .

Потери полезной тепловой энергии, обусловленные излучением через

фронтальный слой герметика, характеризуются коэффициентом теплопередачи излучением

$$h_{2H \rightarrow G} = \frac{\sigma(T_{2H} + T_G)(T_{2H}^2 + T_G^2)}{\frac{1}{\varepsilon_H} + \frac{1}{\varepsilon_G} - 1}, \quad (5)$$

где ε_H — степень черноты герметика. Потери энергии связанные с передачей тепла защитному стеклу через фронтальный слой герметика равны

$$q_{2H \rightarrow G} = h_{2H \rightarrow G}(T_{2H} - T_G). \quad (6)$$

Выражение для термического сопротивления определяется только коэффициентом теплопередачи излучением, поскольку плотный слой герметизирующего компаунда исключает возможность теплообмена за счёт конвекции

$$R_6 = \frac{1}{h_{2H \rightarrow G}}. \quad (7)$$

Аналогичные выражения можно записать для коэффициента передачи излучением от поглощающей поверхности к фронтальному слою герметика $h_{P \rightarrow 2H}$, потери энергии $q_{P \rightarrow 2H}$ и сопротивления R_5 между ними.

Для ФТП полный коэффициент потерь через слои над поглощающей поверхностью в окружающую среду равен

$$U_T = \frac{1}{R_5 + R_6 + R_7}. \quad (8)$$

Отметим, что поток энергии от поглощающей поверхности к защитному стеклу равен потоку энергии от поглощающей поверхности к фронтальному слою герметика. В свою очередь, поток энергии направленный от фронтального слоя герметика к защитному стеклу равен потоку энергии от фронтального слоя герметика в окружающую среду, тогда выражение для температуры фронтального слоя герметика можно определить как

$$T_{2H} = T_P - \frac{U_T(T_P - T_G)}{h_{P \rightarrow 2H}}, \quad (9)$$

а для температуры защитного стекла

$$T_G = T_{2H} - \frac{U_T(T_{2H} - T_S)}{h_{2H \rightarrow G}}. \quad (10)$$

Применение метода итераций, позволяет получить коэффициент потерь U_T , который согласно (8) имеет вид

$$U_T = \left(\frac{1}{h_{P \rightarrow 2H}} + \frac{1}{h_{2H \rightarrow G}} + \frac{1}{h_{G \rightarrow S} + h_W} \right)^{-1}. \quad (11)$$

Методика итерирования состоит из последовательного расчёта коэффициентов $h_{P \rightarrow 2H}$, $h_{2H \rightarrow G}$, $h_{G \rightarrow S}$ и U_T при произвольно заданном значении T_G . Температуру фронтального слоя герметика T_{2H} определяется как средняя между температурой стекла и температурой поглощающей поверхности

$$T_{2H} = \frac{T_P + T_G}{2}. \quad (12)$$

Затем результаты этих расчётов используются для вычисления T_{2H} и T_G по выше приведённым формулам. Если полученные значения близки к начальным, произвольно выбранным, то расчёты завершаются. В противном случае, полученные значения вновь принимаются за исходные и процесс вычислений повторяется.

Описанная методика позволяет определить температуры фронтального слоя герметика T_{2H} и защитного стекла T_G в зависимости от средней температуры поглощающей поверхности ФТП T_P при разных значениях температуры воздуха T_A (рис. 9).

В данной конструкции ФТП преобладает конвективный перенос тепла с поверхности стекла в окружающую среду. При указанных условиях потери тепла больше в 1,5 раза, чем суммарные потери за счёт излучения.

Термическое сопротивление изоляции с тыльной стороны ФТП равно

$$U_B = \frac{k}{L}, \quad (13)$$

где k и L — соответственно коэффициент теплопроводности и толщина изоляции.

Толщина боковой изоляции равна толщине изоляции нижней поверхности L , тогда произведение коэффициента потерь тепла с боковых поверхностей U_S на их площадь A_S определяются по формуле

$$(UA)_S = \frac{2(a+b) \times D \times k}{L}, \quad (14)$$

где a и b — соответственно ширина и длина поглощающей поверхности, а D — высота теплоотводящего канала ФТП.

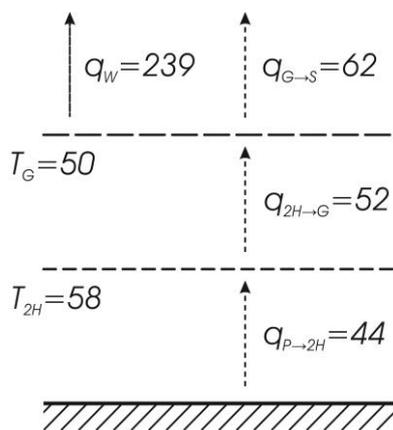


Рис. 9. Распределение температуры ($^{\circ}\text{C}$) и тепловых потерь ($\text{Вт}/\text{м}^2$) через верхнюю поверхность ФТП: $T_A = 40^{\circ}\text{C}$; $V = 5 \text{ м}/\text{с}$; $T_P = 65^{\circ}\text{C}$.

Отнесённые к единице фронтальной площади ФТП A_T потери с боковых поверхностей позволяют определить коэффициент тепловых потерь

$$U_S = \frac{(UA)_S}{A_T} \quad (15)$$

В рамках данной модели потери тепла с боковых поверхностей составляют более 11% потерь в общем объёме потерь ФТП (рис. 10, а).

Данный подход позволил также определить оптимальную толщину теплоизоляции в зависимости от коэффициентов тепловых потерь через тыльную U_B и боковые поверхности U_S (рис. 10, б).

Определение радиационных и конвективных потерь в теплоотводящем канале рассмотренного ФТП, его полезной энергии и термического коэффициента полезного действия осуществляется аналогично определению этих же параметров для плоских солнечных коллекторов. Проведён

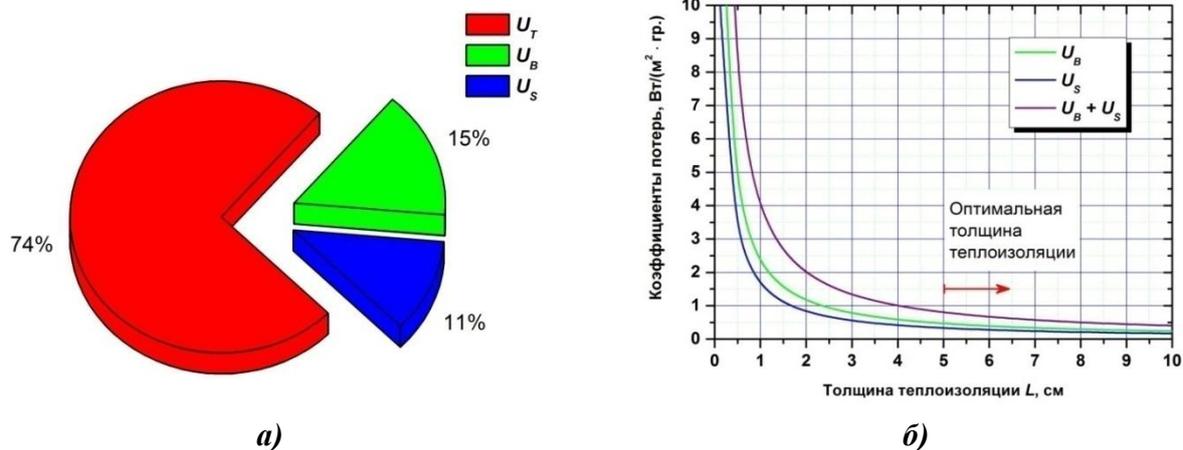


Рис. 10. Доли тепловых потерь (а) и зависимость коэффициентов потерь с тыльной и боковых поверхностей от толщины теплоизоляции (б) ФТП:
 $a = 0,31$ м, $b = 0,49$ м, $D = 7$ см, $L = 4$ см.

сравнительный анализ теоретических и экспериментальных данных в зависимости температуры защитного стекла от температуры воды на входе и выходе одномодульного ФТП (рис. 11).

Поскольку в большинстве конструкций ФТП прямое измерение температуры СЭ не представляется возможным из-за отсутствия непосредственного доступа к задней поверхности ФЭМ, то применение вышеизложенных представлений о процессах теплопереноса позволяет определить температуру СЭ посредством вычислений.

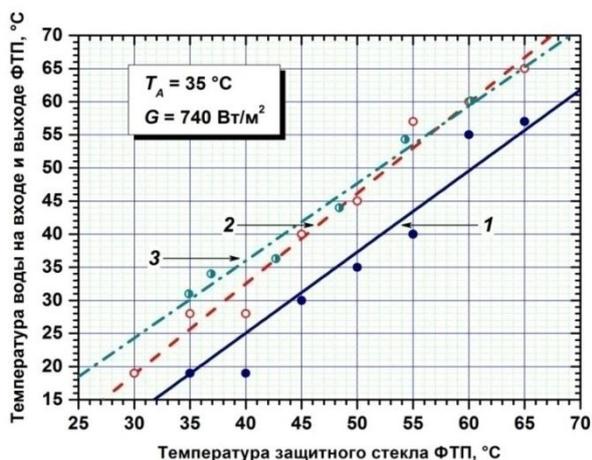


Рис. 11. Зависимость температуры защитного стекла ФТП от температуры воды на входе (1) и выходе (2) ФТП. Прямая (3) описывает результаты расчётов.

температуры защитного стекла ФТП (рис. 12) позволяет провести анализ температурной зависимости напряжения холостого хода в стационарных условиях для ФЭМ. На рис. 13 представлены измеренная зависимость напряжения холостого хода ФЭМ при нагреве его защитного стекла

На рис. 12 приведена зависимость температуры поглощающей поверхности рассмотренного ранее ФТП от температуры его защитного стекла при известной температуре окружающей среды ($T_A = 35$ °С) и интенсивности солнечного излучения ($G = 740$ Вт/м²). Чтобы определить температуру СЭ, достаточно предположить, что она равна температуре поглощающей поверхности ФТП.

Определены его электрические параметры и временные характеристики. Зависимость температуры поглощающей поверхности ФТП от

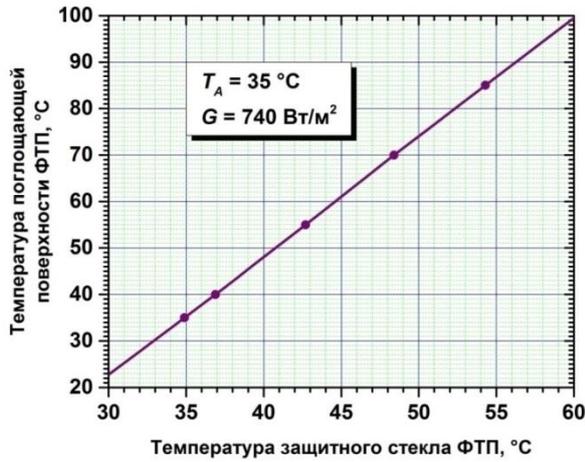


Рис. 12. Зависимость температуры поглощающей поверхности от температуры защитного стекла ФТП.

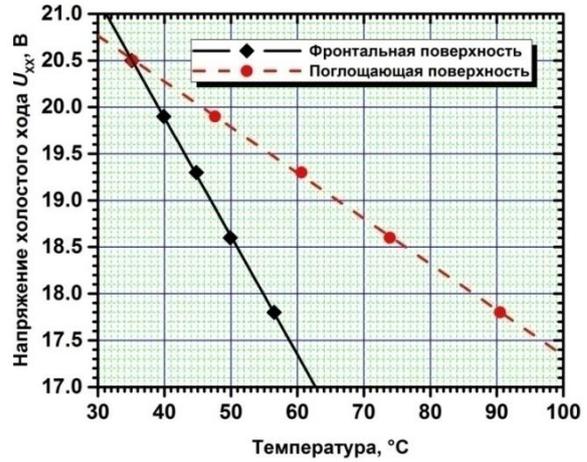


Рис. 13. Зависимость напряжения холостого хода (U_{XX}) от температуры защитного стекла (T_G) и температуры поглощающей поверхности (T_P) ФТП.

(фронтальной поверхности ФТП) и зависимость этого напряжения от температуры поглощающей поверхности, полученной из графика на рис. 12.

Анализ температурных зависимостей максимальной электрической мощности и КПД ФТП (рис. 14) показал, что при плотности солнечного излучения $G = 780 \text{ Вт/м}^2$ температурный коэффициент мощности ФЭМ имеет величину $\Delta P_{MPP}/\Delta T_{ФЭМ} = 0,129 \text{ Вт/}^\circ\text{C}$, а температурный коэффициент КПД ФЭМ — $\Delta \eta/\Delta T_{ФЭМ} = 0,095\%/^\circ\text{C}$. Следовательно, с ростом температуры ФЭМ с 25°C до 100°C максимальная генерируемая электрическая мощность и КПД уменьшается в 10 раз.

Рассмотрена работа ФТПС до перехода в стационарный режим. Изменения напряжения холостого хода (U_{XX}) и температуры (T_P) ФЭМ без

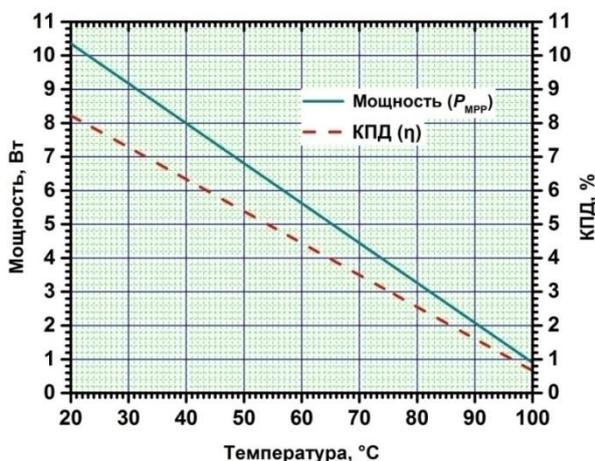


Рис. 14. Зависимость мощности (P_{MPP}) и КПД ($\eta_{ФЭМ}$) от температуры СЭ (T_P) ФТП.

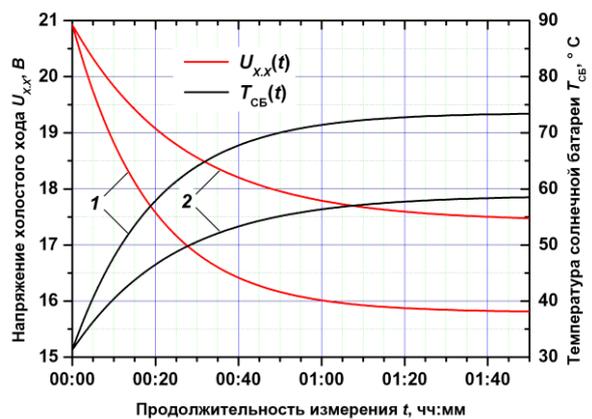


Рис. 15. Зависимость напряжения холостого хода (U_{XX}) и температуры СЭ (T_P) ФТПС без охлаждения (1) и с охлаждением (2) от времени измерения (t) при температуре окружающей среды $T_A = 35^\circ\text{C}$ и интенсивности излучения $G = 780 \text{ Вт/м}^2$.

охлаждения и с охлаждением с момента начала натуральных испытаний при температуре окружающей среды $T_A = 35\text{ }^\circ\text{C}$ и интенсивности потока излучения $G = 780\text{ Вт/м}^2$ представлены на рис. 15. Динамические характеристики ФТПС отражают корреляцию между напряжением холостого хода (U_{XX}) и температурой (T_P) ФЭМ. Изменение величин U_{XX} и $T_{ФЭМ}$ во времени (t) описывается экспоненциальной зависимостью. Видно, что характер поведения величин в случае без охлаждения и с охлаждением отражает одни и те же процессы, но с разными теплоносителями: в случае, когда в качестве теплоносителя выступает воздух (рис. 15, 1) и в случае, когда теплоносителем является вода (рис. 15, 2). Из рис. 15, 2 также следует, что эксплуатировать ФТП в жаркий период необходимо при использовании жидкого теплоносителя, поскольку в случае его отсутствия наблюдается перегрев СЭ.

Измерены электрические параметры и характеристики в зависимости от производительности ФТП, состоящего из четырёх фотоэлектрических модулей. Получены вольтамперные характеристики ФТП на основе кремниевых солнечных элементов с тонкой базой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследований, проведенных по теме диссертации представлены следующие выводы.

1. Разработаны фотоэлектрические модули из кремниевых монокристаллических солнечных элементов с тонкой базой ($\leq 200\text{ мкм}$), имеющие удельное сопротивление 2 и 10 Ом·см и мелкозалегающие p - n -переходы ($\leq 1\text{ мкм}$), полученные методом термодиффузии из твердотельных диффузантов.

2. Впервые экспериментально показано, что температурные коэффициенты напряжения холостого хода ($\Delta U_{XX}/\Delta T$) и тока короткого замыкания ($\Delta I_{КЗ}/\Delta T$) фотоэлектрических модулей, изготовленных из 36 монокристаллических кремниевых солнечных элементов с разными типами проводимости и удельными сопротивлениями ($\rho(n) = 2\text{ Ом}\cdot\text{см}$ и $\rho(p) = 10\text{ Ом}\cdot\text{см}$), при одинаковом нагреве солнечным излучением различаются в 1,5 раза, что обусловлено увеличением времени жизни и концентрации неосновных носителей заряда в материале с более высоким удельным сопротивлением.

3. Впервые установлено, что в связи с уменьшением напряжения в точке оптимальной мощности стандартных фотоэлектрических модулей из 36 кремниевых моно- и мульткристаллических солнечных элементов при температурах модулей ($T_{ФЭМ}$), превышающих в 2–3 раза температуру при стандартных условиях испытаний ($T_{ФЭМ} \geq T_{STC}$), заряд буферных свинцово-кислотных аккумуляторных батарей происходит током обратно пропорциональным температуре модуля ($I_{ФЭМ} \sim T_{ФЭМ}^{-1}$) и впервые разработаны кремниевые фотоэлектрические модули из 40 кремниевых солнечных элементов и системы на их основе, позволяющие компенсировать

дефицит напряжения, возникающий в результате нагрева.

4. Впервые в конструкции контроллера заряда параллельного типа для получения опорного напряжения использован стабилизатор тока на n -канальном полевом транзисторе с управляющим p - n -переходом, что позволило заряжать свинцово-кислотные аккумуляторные батареи от фотоэлектрических модулей, генерирующих напряжения в широком диапазоне значений ($U_{\text{ФЭП}} = 13,8 \div 25,2 \text{ В}$).

5. Разработана тепловая модель фототеплопреобразователя плоской конструкции жидкостного типа без принудительной циркуляции, позволившая впервые установить различия зависимости напряжения холостого хода от температуры поглощающей поверхности и от температуры защитного стекла и предложен способ определения температуры солнечных элементов в фототеплопреобразователе.

6. Впервые разработаны фототеплопреобразователи плоской конструкции жидкостного типа без принудительной циркуляции, в которых контакт теплоносителя с тыльной поверхностью фотоэлектрического модуля происходит через полиэтиленовый слой, что позволило сравнить его тепловые и механические параметры и характеристики, получаемые в результате применения тепловой модели.

**SCIENTIFIC COUNCIL AWARDING OF THE SCIENTIFIC DEGREES
PhD.30.08.2018.FM/T.01.12 AT THE SCIENTIFIC RESEARCH
INSTITUTE OF PHYSICS OF SEMICONDUCTORS AND
MICROELECTRONICS AT THE NATIONAL
UNIVERSITY OF UZBEKISTAN**

**THE PHYSICAL-TECHNICAL INSTITUTE OF
THE ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF UZBEKISTAN**

TUKFATULLIN OSKAR FARITOVICH

**DEVELOPMENT OF EFFICIENT SOLAR CELLS AND
PHOTOVOLTAIC/THERMAL SYSTEMS MADE OF CRYSTALLINE
SILICON OF *n*- AND *p*-TYPE CONDUCTIVITY FOR HOT CLIMATE
CONDITIONS**

01.04.10 – Physics of Semiconductors (Technical Sciences)

**ABSTRACT OF DISSERTATION OF DOCTOR OF PHILOSOPHY (PhD)
ON TECHNICAL SCIENCES**

Tashkent – 2019

The theme of the dissertation of doctor of philosophy (PhD) on technical sciences was registered at the Supreme Attestation Commission of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under № № B2019.2.PhD/T1045.

The dissertation of doctor of philosophy (PhD) has been carried out at the Physical-Technical Institute of SPA «Physics – Sun» named after S.A. Azimov of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (Uzbek, Russian, English (resume) on the website of Scientific Council (www.ispm.uz) and on the website of Information and Educational Portal «ZiyoNet» (www.ziyo.net).

Scientific supervisor:

Tursunov Mukhamad Nishanovich
Doctor of Technical Sciences

Official opponents:

Abdikadirov Mukhitdin Abdurashitovich
Doctor of Technical Sciences, Professor

Tachilin Stanislav Anatolevich
Candidate of Technical Sciences, Docent

Leading organization:

Fergana State University

Dissertation defense will take place « ___ » _____ 2019 at ___ at the meeting of Scientific Council number PhD.30.08.2018.FM/T.01.12 at Institute of Semiconductor Physics and Microelectronics of the National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek. (Address: 100057, Uzbekistan, Tashkent, Yangi Almazar Str., building 20. Phone: (+998) 71·248·79·94, fax (+998) 71·248·79·92, e-mail: info@ispm.uz).

The thesis can be found in the Department of Information Technology of the Institute of Semiconductor Physics and Microelectronics (registered No. ___). Address: 100057, Uzbekistan, Tashkent, Yangi Almazar Str., building 20. Phone: (+998) 71·248·79·94.

The abstract of dissertation was distributed on « ___ » _____ 2019.

(Mailing report № ___ on « ___ » _____ 2019).

Sh.B. Utamuradova

Chairman of Scientific Council on Award of Scientific Degrees,
Doctor of Sciences in Physics and Mathematics, Professor

S.S. Nasriddinov

Scientific Secretary of Scientific Council on Award of Scientific Degrees,
Doctor of Sciences in Technical Sciences, Docent

A.T. Mamadalimov

Chairman of Scientific Seminar of Scientific Council on Award of Scientific Degrees,
Doctor of Sciences in Physics and Mathematics, Academician

INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

The aim of the research work is the development of silicon solar cells, photovoltaic modules and combined liquid-type photovoltaic/thermal systems designed especially for generating electrical energy in hot climates conditions.

The object of the study is the creation of photovoltaic cells, modules and systems that work effectively in hot climates conditions.

Scientific novelty consists of the following:

Photovoltaic modules of silicon single-crystal solar cells with a thin base ($\leq 200 \mu\text{m}$), having a specific resistance of 2 and $10 \Omega\cdot\text{cm}$ and shallow p - n -junctions ($\leq 1 \mu\text{m}$) obtained by thermal diffusion from solid-state diffusants.

It has been experimentally shown for the first time that the temperature coefficients of open circuit voltage ($\Delta U_{XX}/\Delta T$) and short-circuit current ($\Delta I_{K3}/\Delta T$) of standard photovoltaic modules made from 36 monocrystalline silicon solar cells with different types of conductivity and specific resistances ($\rho(n) = 2 \Omega\cdot\text{cm}$ and $\rho(p) = 10 \Omega\cdot\text{cm}$) with the same heating by solar radiation exceeding 2–3 the temperature under standard test conditions ($T_{\Phi\Theta M} > [2\div 3] \times T_{STC}$) differ by 1.5 times.

For the first time it was determined that the decrease in voltage at the optimal power point of standard photovoltaic modules of 36 silicon mono- and multicrystalline solar cells at module temperatures ($T_{\Phi\Theta M}$) exceeding 2–3 times the temperature from standard test conditions ($T_{\Phi\Theta M} \geq T_{STC}$), the charge of the buffer of lead-acid batteries are inversely proportional to the temperature of the module ($T_{\Phi\Theta M} \sim T_{\Phi\Theta M}^{-1}$).

For the first time silicon photovoltaic modules of 40 silicon solar cells and systems based on them were developed, allowing to compensate for the voltage deficit that results from heating.

A thermal model of a photovoltaic/thermal converter of a flat liquid-type design without active circulation was developed, which made it possible for the first time to establish differences in the dependence of the open-circuit voltage on the temperature of the absorbing surface and the temperature of the protective glass, and a method was proposed for determining the temperature of solar cells in the photovoltaic/thermal converter.

For the first time, photovoltaic/thermal systems of a flat liquid-type construction without active circulation were developed, in which the heat carrier contact with the rear surface of the photovoltaic module occurs through a polyethylene layer.

Implementation of the research results:

Based on the solar cells and photovoltaic/thermal converters those are efficient in hot climates:

A module for a photovoltaic installation of silicon single-crystal solar cells obtained by thermal diffusion was developed and which received a patent for industrial design by the State Patent Office of the Republic of Uzbekistan (“Photovoltaic Installation Module”, No. SAP 00859, 2010). An advanced photovoltaic module allows for increased efficiency.

The design of a flat photovoltaic/thermal system with free convection and a method for determining the temperature of solar cells by the no-load voltage made it possible to develop the “Solar combined photovoltaic/thermal conversion installation”, which won the “Best Innovative Project of a Young Scientists or Students” at the III Republican Fair of Innovative Ideas, Technologies and Projects in 2010. Advanced photovoltaic installation saves energy.

Structure and scope of the thesis: The dissertation work consists of a table of contents, introduction, main part, which consisting of four chapters, conclusion, list of references, and two appendixes. The main volume of the thesis (introduction, four chapters and conclusion) presented on 126 pages of typewritten text, including 38 figures and 2 tables. The reference list consists of 125 items.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I часть (I часть; I part)

1. Т.Т. Рискиев, М.Н. Турсунов, М.Г. Хакимов, А.Х. Мамедов, О.Ф. Тукфатуллин, И.А. Юлдошев. **Патент на промышленный образец «Модуль фотоэлектрической установки» № SAP 00859 // ОФИЦИАЛЬНЫЙ БЮЛЛЕТЕНЬ Государственного патентного ведомства РУз. — 2011. — № 4(120). — С. 84.**
2. М. Мирзабаев, С.Л. Лутпуллаев, Р.Р. Авезов, М.Н. Турсунов, А.М. Мирзабаев, В.П. Кононеров, О.Ф. Тукфатуллин. **Патент на полезную модель «Фототеплопреобразователь» № FAP 00496 // ОФИЦИАЛЬНЫЙ БЮЛЛЕТЕНЬ Государственного патентного ведомства РУз. — 2009. — № 10(102). — СС. 54–55.**
3. O.F. Tukfatullin, R.A. Muminov, M.N. Tursunov. **Thermal Circuit Model to Calculate the Heat Losses from the Frontal Surface of a Photovoltaic-Thermal System // Applied Solar Energy. — 2018. — V. 54. — No. 5. — PP. 354–357. (05.00.00, № 1)**
4. T.T. Riskiev, M.N. Tursunov, S. Dadamukhamedov, O.F. Tukfatullin, I.A. Yuldoshev. **Photoelectrical Setup for Electrical Power Supply of Seismological Objects // Applied Solar Energy. — 2010. — V. 46. — No. 3. — PP. 179–181. (05.00.00, № 1)**
5. M.N. Tursunov, A.M. Mirzabaev, S. Dadamukhamedov, V.P. Kanonero, E. Abdullaev, O.F. Tukfatullin. **Photoelectric Device for Street Lighting Based on Silicon Solar Cells // Applied Solar Energy. — 2009. — V. 45. — No. 1. — PP. 17–20. (05.00.00, № 1)**
6. О.Ф. Тукфатуллин, И.А. Юлдошев, Н.А. Солиева. **Особенности маломощного контроллера заряда свинцово-кислотных источников тока, заряжаемых от солнечных батарей // Узбекский физический журнал. — 2008. — Т. 10. — № 4–5. — СС. 339–342. (01.00.00, № 5)**
7. M.N. Tursunov, S. Dadamukhamedov, V.P. Kononero, A.M. Mirzabaev, O.F. Tukfatullin. **Investigation of Parameters of Photothermoconverter Based on Si Solar Cells // Applied Solar Energy. — 2008. — V. 44. — No. 1. — PP. 17–19. (05.00.00, № 1)**
8. С.Е. Максимов, Н.Х. Джемилев, Л.Ф. Лифанова, О.Ф. Тукфатуллин, Ш.Т. Хожиев. **Масс-распределения и константы скорости распада распыленных кластеров $Si_nO_m^+$ // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейронные исследования. — 2008. — № 5. — СС. 54–58. (01.00.00, № 39)**
9. R.A. Muminov, M.N. Tursunov, O.F. Tukfatullin. **Temperature Effect on the Current-Voltage Characteristics of Single-Crystalline Si Photovoltaic Arrays // Applied Solar Energy. — 2007. — V. 43. — No. 4. — PP. 211–213. (05.00.00, № 1)**

10. M. Mirzabaev, A.M. Mirzabaev, V.P. Kononov, M.N. Tursunov, O.F. Tukfatullin. **Photothermal Converters With Silicon Solar Cells** // Applied Solar Energy. — 2007. — V. 43. — No. 2. — PP. 75–77. (05.00.00, № 1)

11. М.Н. Турсунов, М.М. Мирзабаев, А.М. Мирзабаев, В.П. Канонеров, О.Ф. Тукфатуллин. **Научные и технологические аспекты разработки фототеплопреобразователя для эффективной работы в условиях жаркого климата** // Гелиотехника. — 2006. — № 4. — СС. 7–12. (05.00.00, № 1)

12. М.Н. Турсунов, Р.А. Муминов, У.Х. Газиев, З.С. Сеттарова, О.Ф. Тукфатуллин. **Разработка фотоэлектрической установки для работы в условиях жаркого климата** // Гелиотехника. — 2006. — № 3. — СС. 13–17. (05.00.00, № 1)

13. М.Н. Турсунов, М.М. Мухаммадиев, С. Дадамухамедов, В.П. Канонеров, О.Ф. Тукфатуллин, О.М. Турсункулов, Б.У. Уришев. **Фотоэлектрическая установка для питания маломощных потребителей электрической энергии** // Проблемы энерго- и ресурсосбережения. — 2005. — № 1. — СС. 53–58. (05.00.00, № 21)

II бўлим(II часть;II part)

1. О.Ф. Тукфатуллин, Р.А. Муминов. **Радиационные и конвективные потери в теплоотводящем канале фототеплопреобразователя** // В кн.: «Материалы республиканской научной конференции «Современные проблемы физики полупроводников» (Ташкент, Узбекистан, 26–27 октября 2018 г.)». — Ташкент. — 2018 — СС. 230–232.

2. О.Ф. Тукфатуллин, Р.А. Муминов, Б.С. Раджапов. **Тепловые потери через тыльную и боковые поверхности плоского фототеплопреобразователя** // В кн.: «Материалы научно-практической конференции «Использование возобновляемых источников энергии: новые исследования, технологии и инновационные подходы» (Ташкент – Паркент, Узбекистан, 25–26 сентября 2018 г.)». — Ташкент. — 2018 — СС. 359–362.

3. О.Ф. Тукфатуллин, Р.А. Муминов. **Модель тепловой цепи для расчета потерь тепла с фронтальной поверхности фототеплопреобразователя** // В кн.: «Сборник материалов Международной конференции «The optical and Photoelectric Phenomena in Semiconductive Micro- and Nanostructures» (Фергана, Узбекистан, 25–26 мая 2018 г.)». — Фергана. — 2018. — СС. 239–243.

4. О.Ф. Тукфатуллин, Р.А. Муминов. **Двухканальная система мониторинга напряжений источников тока фотоэлектрической системы** // В кн.: «Сборник тезисов докладов «Седьмой Международной конференции по физической электронике IPES-7» (Ташкент, Узбекистан, 18–19 мая 2018 г.)». — Ташкент. — 2018. — С. 169.

5. Р.А. Муминов, О.Ф. Тукфатуллин, И.М. Комолов. **Портативная фотоэлектрическая система для питания маломощных потребителей электрической энергии** // В кн.: «Труды Международной конференции

«Фундаментальные и прикладные вопросы физики. Секция III. Возобновляемые источники энергии и гелиоматериаловедение, их прикладные аспекты» (Ташкент, Узбекистан, 13–14 июня 2017 г.)». — Ташкент. — 2017. — СС. 134–139.

6. Н.Х. Джемилев, С.Ф. Коваленко, С.Е. Максимов, О.Ф. Тукфатуллин, Ш.Т. Хожиев. **Исследование образования и мономолекулярной фрагментации кластеров $Si_nO_m^+$ при ионной бомбардировке** // В кн.: «Тезисы докладов XLV Международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (Москва, Россия, 26–28 мая 2015 г.)». — Москва. — 2015. — С. 138.

7. О.Ф. Тукфатуллин, М.Н. Турсунов, Х. Сабиров, Э.Т. Абдуллаев. **Фотоэлектрическая система подъездного освещения жилого многоквартирного дома** // В кн.: «Республиканский научно-практический семинар, посвящённый 90-летию профессора А.Т. Тешабаева «Актуальные проблемы физики полупроводников» (Ташкент, Узбекистан, 22 ноября 2014 г.)». — Ташкент. — 2014. — СС. 199–202.

8. О.Ф. Тукфатуллин, И.А. Юлдошев. **Особенности конструкции и монтажа фотоэлектрических панелей, учитывающие нагрев в период эксплуатации** // В кн. «Республиканская научно-практическая конференция «Взгляд молодых учёных на актуальные проблемы науки» (Ташкент, Узбекистан, 29 октября 2010 г.)». — Ташкент. — 2010. — С. 22.

9. О.Ф. Тукфатуллин, И.А. Юлдошев, А.В. Халикова. **Фотоэлектрическая установка мощностью 140 Вт** // В кн. «Республиканская научно-практическая конференция молодых ученых и талантливых студентов «Взгляд молодёжи на инновационное развитие Узбекистана» (Ташкент, Узбекистан, 8–9 апреля 2010 г.)». — Ташкент. — 2010. — СС. 191–193.

10. М.Н. Турсунов, С. Дадамухамедов, О.Ф. Тукфатуллин, М.С. Якубова. **Исследование возможности изготовления кремниевых солнечных элементов для работы в условиях высоких температур Центральной Азии** // В кн. «Материалы третьей международной конференции, посвящённой 15-летию независимости Узбекистана «Фундаментальные и прикладные вопросы физики» (Ташкент, Узбекистан, 26–27 октября 2006 г.)». — Ташкент. — 2006. — СС. 128–130.

11. М.Н. Турсунов, В.П. Канонеров, О.Ф. Тукфатуллин. **Переносная установка фотоэлектрического освещения на основе светодиодов высокой яркости** // В кн. «Материалы третьей международной конференции, посвящённой 15-летию независимости Узбекистана «Фундаментальные и прикладные вопросы физики» (Ташкент, Узбекистан, 26–27 октября 2006 г.)». — Ташкент. — 2006. — СС. 133–134.

12. М.Н. Турсунов, О.Ф. Тукфатуллин. **Особенности поведения основных параметров фотоэлектрических батарей в условиях жаркого климата** // В кн. «Сборник трудов международной научно-технической конференции «Современное состояние и перспективы развития гелиоэнергетики» (Ташкент, Узбекистан, 2006 г.)». — Ташкент. — 2006. — СС. 292–295.

Автореферат “Тил ва адабиёт таълими” журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилди ва ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги матнларини мослиги текширилди.

Бичими 60×841/16. Рақамли босма усули. Times гарнитураси.
Шартли босма табоғи: 3,75. Адади 100. Буюртма № 79.

Гувоҳнома реестр № 10-3719
"Тошкент кимё технология институти" босмахонасида чоп этилган.
Босмахона манзили: 100011, Тошкент ш., Навоий кўчаси, 32-уй.