

На правах рукописи

ЮРЧЕНКО АЛЕКСЕЙ ВАСИЛЬЕВИЧ

**ПЛАНАРНАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ
ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ КРЕМНИЕВЫХ
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

Специальность 01.04.10 – физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Томск 2001 г.

Работа выполнена в Томском государственном университете на кафедре радиоэлектроники радиофизического факультета и в Федеральном государственном унитарном предприятии «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов» г. Томска.

Научный руководитель:

Кандидат физико-математических наук

Ушеренко А.А.

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук, профессор

Лисицын В.М.

Кандидат физико-математических наук, доцент

Троян П.Е.

Ведущая организация:

Институт оптического мониторинга СО РАН, г. Томска

Защита состоится 6 июня 2001 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д212.269.02 при Томском политехническом университете по адресу: 634034, г.Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета.

Ученый секретарь диссертационного совета

доктор физико-математических наук

Коровкин М.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность темы. Полное количество солнечной энергии, поступающей на поверхность Земли за неделю, превышает энергию всех мировых запасов нефти, газа, угля и урана. В России наибольший теоретически обоснованный потенциал (более 200 миллиардов тонн условного топлива) имеет солнечная энергия. Вместе с тем, в энергетической программе России вклад всех возобновляемых источников на 2000 год находится на уровне 1%.

Согласно решению Международного конгресса "Бизнес и инвестиции в области возобновляемых источников энергии (ВИЗ) в России", проходившего 31.05.99-4.06.99 в г. Москве, приоритетными направлениями развития научно-технического и коммерческого сотрудничества в области солнечной энергетики являются:

- создание конструкций и технологии производства солнечных фотоэлектрических модулей, обеспечивающих снижение их стоимости до 2 долларов за ватт;
- реализация совместных демонстрационных зон и проектов в различных регионах страны;
- строительство предприятий по производству кремния солнечного качества на основе новейших технологий;
- мониторинговые исследования комбинированных систем ВИЭ.

Разрабатываются долгосрочные программы исследования взаимодействия солнечного излучения со структурой различных материалов, основной задачей которых является создание адекватных физических и математических моделей активной фоточувствительной среды в различных спектральных диапазонах солнечного излучения.

В настоящее время анализ фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) достаточно развит в предположении однородности их характеристик по площади. Однако, реальные ФЭП (а технология развивается в сторону увеличения их площади, что диктует экономика) имеют большую площадь и, как следствие, имеют неоднородное распределение электрофизических и конструкционных параметров, что сказывается на характеристиках ФЭП.

В ряде лабораторий проводятся исследования ФЭП на основе сложных полупроводниковых соединений, в том числе и органических. Такие образцы существенно неоднородны по площади и величина КПД, достигнутая на таких ФЭП, приводится совместно с их площадью, причем КПД ФЭП уменьшается с увеличением его площади. Поэтому для выявления принципиально достижимого КПД необходимо использовать локальные методы измерения электрофизических параметров ФЭП.

Цель работы. Исследование влияния пленарной неоднородности спектральной фоточувствительности ФЭП на эффективность и работоспособность в натурных условиях при многопараметровых измерениях характеристик окружающей среды. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Разработать методику измерения распределения спектрального фотоотклика планарно-неоднородных ФЭП.
2. Разработать автоматизированные установки измерения: интегральных характеристик ФЭП и распределения фотоотклика ФЭП по его поверхности и установить пределы их применимости.
3. Выявить закономерности, связывающие КПД с распределением локальных неоднородностей фотоотклика ФЭП.
4. Провести долговременные натурные испытания солнечных батарей (СБ) с одновременным мониторингом параметров атмосферы, влияющих на прозрачность атмосферы в различных диапазонах длин волн, и выявить климатические факторы, определяющие работу СБ в условиях г. Томска.

Научная новизна:

При решении поставленных задач получены следующие новые результаты:

1. Впервые проведены измерения планарной фоточувствительности ФЭП с использованием метода локальных спектральных характеристик.
2. Выявлена закономерность влияния удельного разброса фотоотклика ФЭП по площади пластины на его эффективность и показано, что основной вклад в пленарную неоднородность фотоотклика ФЭП вносит неоднородное распределение времени жизни неосновных носителей заряда в подложке.
3. Показано, что неоднородности коэффициента отражения оптического излучения и просветления вносят существенно меньший вклад в неоднородность распределения фотоотклика (КПД) по сравнению с неоднородным распределением параметров подложки (прежде всего времени жизни неосновных носителей заряда).
4. Впервые в условиях Сибири проведены долговременные испытания кремниевых солнечных батарей с многофакторным контролем параметров атмосферы и выявлены климатические параметры с высоким коэффициентом корреляция.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Методика исследования планарной неоднородности фото чувствительности ФЭП и автоматизированная установка измерения распределения фотоотклика по поверхности ФЭП, обеспечивающая технологический контроль воспроизводимости ФЭП по удельному разбросу фотоотклика, с локальностью 0.1мм.

2. Выявленная закономерность, показывающая, что КПД ФЭП обратно пропорционален удельному разбросу фотоотклика по пластине ФЭП.
3. Закономерность, показывающая, что тангенс угла наклона зависимости удельного разброса фотоотклика от КПД ФЭП увеличивается с увеличением длины оптического излучения.
4. Неоднородности коэффициента отражения и просветления вносят существенно меньший вклад (удельный разброс до 0.03) в неоднородность распределения фотоотклика (КПД) по сравнению с неоднородностью распределения параметров подложки (удельный разброс до 0.4), прежде всего времени жизни неосновных носителей заряда.
5. Результаты натурных испытаний солнечной батареи, проведенные с сентября 1996 г. по сентябрь 1999 г. в климатических условиях г.Томска.

Научно-практическая значимость работы.

Разработаны методики и автоматизированные установки для измерения интегральных и локальных характеристик ФЭП с высокой воспроизводимостью и объемом измерения не менее 15 пластин в час при локальности 0.1мм, которые обеспечивают технологический контроль изготовления ФЭП.

Результаты мониторинговых исследований используются при проектировании солнечных энергетических установок. Реализован ряд устройств с использованием питания от ФЭП.

Оптимизация конструкции ФЭП, а также выбор технологических параметров его изготовления позволили увеличить КПД ФЭП лучших промышленных образцов с 12.5% до 15.4%. (рис.1.)

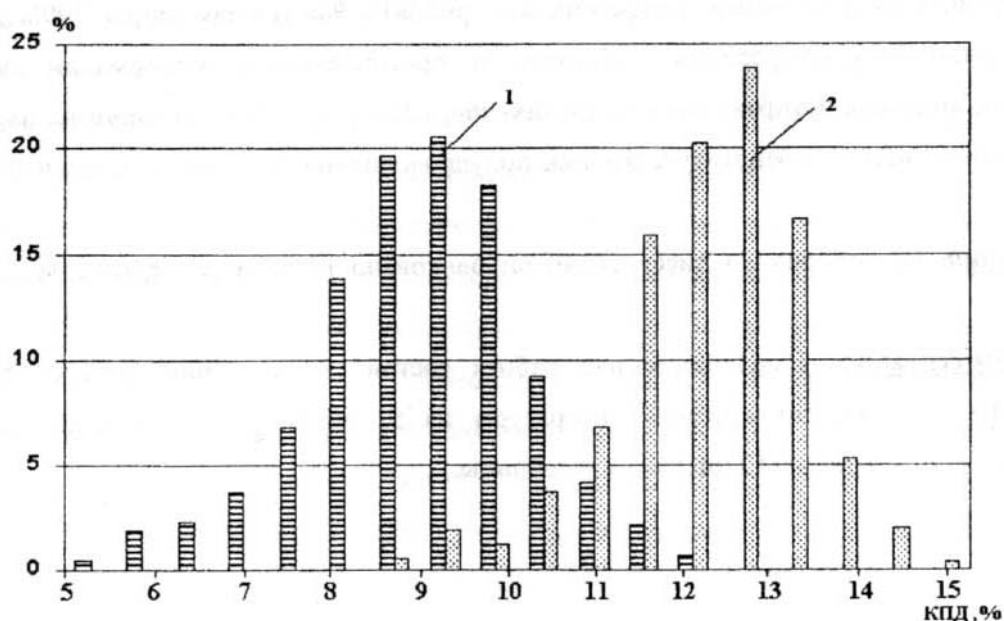


Рис.1. Распределение ФЭП по КПД: 1 на начало исследований 1996 г. (общее кол-во пластин 1876) и 2 по результатам исследований 1999 г. (общее кол-во пластин 2294).

Личный вклад автора.

Результаты, изложенные в диссертации, получены лично автором, а также в сотрудничестве с научными работниками ИОА СО РАН, СФТИ и ТГУ. Участие в работе каждого сотрудника отражено в совместных публикациях. Данная диссертационная работа планировалась как часть комплексных исследований по материаловедению для солнечной энергетики. Они проводились отделом материаловедения ФГУП «НИИПП» в 1996 -2000 годах под руководством инициаторов этих исследований к.т.н. Бакина Н.Н. и к.ф.-м.н. Ушеренко А.А. Все основные выводы в результаты диссертационной работы получены лично автором. Совместно с научным руководителем к.ф.-м.н. Ушеренко А.А. был определен план работы и обсуждались результаты исследований. Личный вклад автора включает разработку экспериментальных установок и методов измерений, проведения измерений, обработку экспериментальных результатов и их обобщение. Большая часть публикаций по теме диссертации написана автором после обсуждения результатов с соавторами работ.

Апробация работы.

Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: IV Международная светотехническая конференция «Светотехника на рубеже веков: достижения и перспективы» (г.Вологда, 2000г.), XIII Российская конференции по использованию синхротронного излучения «Синхротронное излучение-2000» (г. Новосибирск, 2000г.), Седьмая Российская конференции «GaAs-99» (г.Томск, 1999 г.). Техническая конференция «Техника и технология очистки и контроля качества воды» (Томск. 1999г.), III-я Всероссийская научно-техническая конференция «Методы и средства измерений физических величин» (г.Н.Новгород 1998г.), VIII-я Крымская международная микроволновая конференция «КрыМиКо'98» (г.Севастополь 1998г.), VII Научно-техническая конференция «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления» («Датчик-96», г.Москва, 1996г.), а также на научно-техническом семинаре в Институте физики полупроводников СО РАН, г. Новосибирск в 2000г.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 14 печатных работ: из них 3 статьи.

Объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы из 91 наименования. Общий объем диссертации 101 страница, 52 рисунка и 4 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, которые необходимо решать для достижения поставленной цели, обоснованы научная новизна и практическая значимость работы.

Глава 1. Электрофизические и оптические свойства ФЭП (обзор литературы)

Посвящена современному состоянию исследований в области кремниевых ФЭП, возможным путям повышения их эффективности, описанию моделей планарно-неоднородных ФЭП.

На основе представленного литературного обзора:

1. Выбрана модель неоднородного ФЭП и обосновано её применение для исследования эффективности планарно-неоднородных кремниевых ФЭП.
2. Показана необходимость разработки методики и проведения экспериментального исследования влияния планарно-неоднородного распределения спектральной фоточувствительности на эффективность ФЭП.
3. Показана важность влияния спектральных характеристик солнечного излучения и климатических факторов на работу ФЭП в натурных условиях.

С учетом проведенного анализа теоретических и экспериментальных исследований и описанных в литературе моделей, уточнены цели и задачи исследования.

Глава 2. Методологические основы получения и исследования ФЭП

Посвящена описанию технологии изготовления ФЭП и солнечных батарей (СБ), представлению разработанных методик и установки исследования интегральных параметров ФЭП.

Технология изготовления СБ подразделяется на следующие основные этапы: изготовление активного элемента (ФЭП), выходной контроль качества ФЭП, монтаж активного элемента на панель, сборка солнечной батареи и измерение параметров СБ.

Для обеспечения выходного контроля ФЭП согласно ГОСТ 28976-91 (МЭК 891-87) и ГОСТ 28977 -91 (МЭК 904-1-87) разработана методика, основанная на измерении его ВАХ и расчете из нее интегральных характеристик ФЭП. На базе этой методики разработана установка измерения интегральных характеристик, позволяющая за короткий промежуток времени (<1-2 сек.) определять основные интегральные характеристики ФЭП: напряжение холостого хода, ток короткого замыкания, КПД, величину последовательного сопротивления. Уменьшение времени измерений необходимо для исключения влияния тепловых зависимостей характеристик ФЭП на результаты измерений и обеспечения технологического контроля качества ФЭП. Оптический излучатель измерителя

характеристик ФЭП выполнен на галогенной лампе КГМ 24-250, системе фокусировки пучка света излучателя и системе светофильтров. Для проверки правильности измерения КПД проведены сопоставительные натурные измерения при отсутствии облачности с учетом склонения Солнца.

Глава 3. Исследования реальных ФЭП

Посвящена экспериментальным исследованиям планарно-неоднородных ФЭП, оптимизации их конструкции, разработке методики и установки измерения распределения фоточувствительности по площади ФЭП.

В эксперименте использовались более 8000 ФЭП, изготовленных во ФГУП "НИИПП" в периоде 1996 по 1999 год.

Величина последовательного сопротивления определяется удельным сопротивлением материала ФЭП, его конструкцией (расстоянием между токосборниками, глубиной залегания р-п перехода, толщиной подложки и т.д.), а также качеством и геометрией омических контактов.

С использованием разработанной методики и установки измерения интегральных характеристик были проведены экспериментальные исследования влияния последовательного сопротивления и расстояния между токосборниками на КПД ФЭП.

Измерения КПД и последовательного сопротивления проводились при одинаковой мощности имитатора солнечного излучения $P_{из}=1000\text{Вт/м}^2$. Калибровка мощности имитатора проводилась относительно вторичных эталонов - ФЭП, изготовленных и измеренных в АОЗТ "Силикон" на установке СП «Интертехника».

В результате статистической обработки полученного массива данных получили экспериментальную зависимость КПД от R_n (рис 2), которая аппроксимируется эмпирическим выражением:

$$КПД = 0,98 + 11,9 \cdot \exp\left(-\frac{R_n - 0,1}{0,35}\right).$$

На рисунке также отображена теоретическая зависимость КПД от R_n , рассчитанная в главе 1 при электрофизических и конструктивно-геометрических параметрах ФЭП, аналогичных экспериментальным. Обе зависимости монотонно убывают с ростом величины R_n .

Соответствие теоретической зависимости и экспериментальных данных свидетельствует о правильности выбранной модели и корректности используемых граничных условий и принятых упрощений.

Показано, что некоторое расхождение между теоретической и экспериментальной зависимостями в области больших значений $R_n > 0,3\text{Ом}$ обусловлено тем, что при таких

значениях R_n на КПД ФЭП существенное влияние оказывают локальные неоднородности электрофизических характеристик по площади.

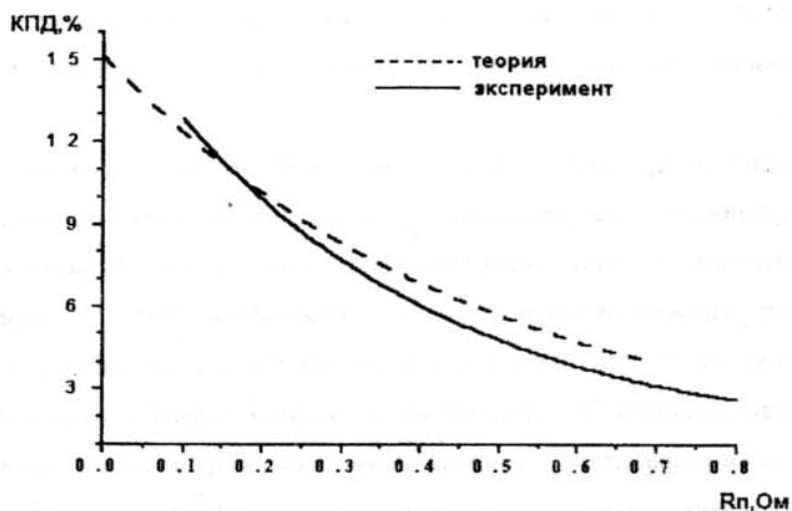


Рис.2. Зависимость КПД ФЭП от последовательного сопротивления R_n .

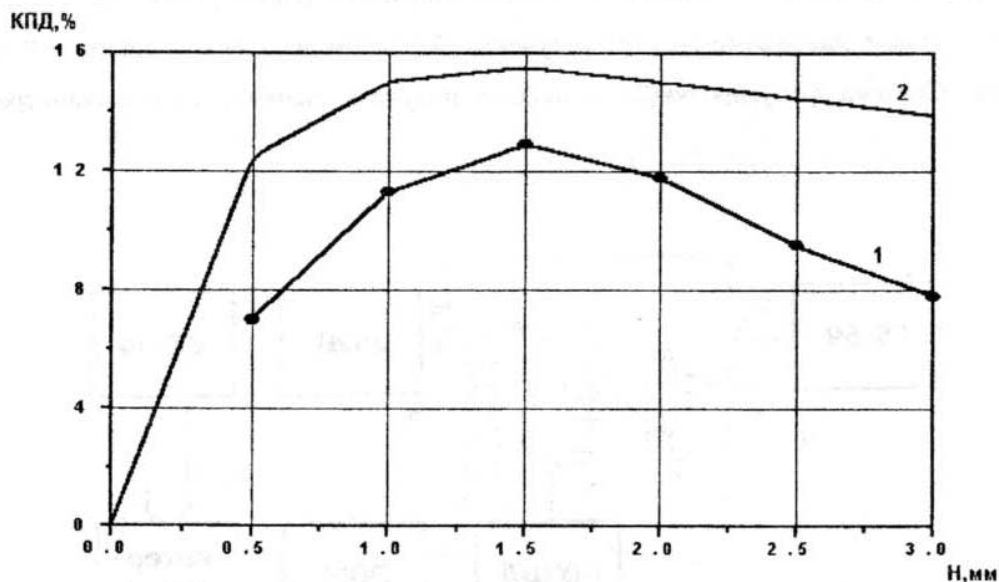


Рис.3. Зависимость КПД ФЭП от расстояния между токосборниками $2H$.
1,2 -экспериментальная и теоретическая зависимости.

Для исследования влияния расстояния между токосборниками $2H$ на КПД ФЭП были изготовлены партии ФЭП с различными H - от 3 до 0.5мм с шагом 0.5мм.

На рис 3 изображены полученная экспериментальная и рассчитанная теоретическая зависимости КПД от H . На рисунке экспериментальные точки обозначены символом (•) и получены путем усреднения КПД ФЭП при данной H . Полученные экспериментальные данные качественно соответствуют теоретически рассчитанным.

Кривые имеют максимум при $H=1.5\text{мм}$, резкий спад при $H<1\text{мм}$ вследствие увеличения коэффициента затенения и монотонный спад при $H>2\text{мм}$ вследствие увеличения последовательного сопротивления.

По сравнению с теоретической зависимостью более быстрый спад величины КПД экспериментальных образцов ФЭП при $H > 2\text{мм}$ обусловлен существенным возрастанием R_n .

Для измерения распределения фотоотклика ФЭП по его поверхности разработана методика измерения его дифференциальных параметров. Методика основана на измерении изменения фототока в цепи смещения ФЭП при локальной засветке оптическим излучением его лицевой поверхности при перемещении ФЭП по двум координатам относительно светового пятна. Методика позволяет экспериментально разделить вклад в пленарную неоднородность ФЭП на технологическую и подложечную составляющие. На базе этой методики разработана установка, позволяющая проводить измерения локальных спектральных характеристик с локальностью до 0.1 мм. Блок-схема установки представлена на рис.4. В качестве источника излучения используются светодиоды (1) с длиной волны в максимуме спектра излучения: $\lambda = 0.475\text{мкм}$, 0.59мкм, 0.66мкм, 0.86мкм, 0.94мкм. Система фокусировки (2) позволяет получить световое пятно диаметром до 0.1мм.

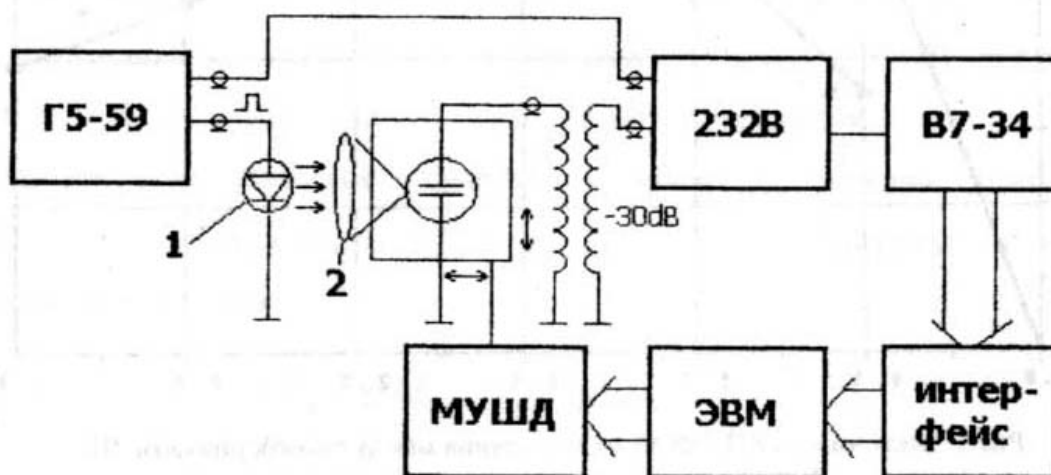
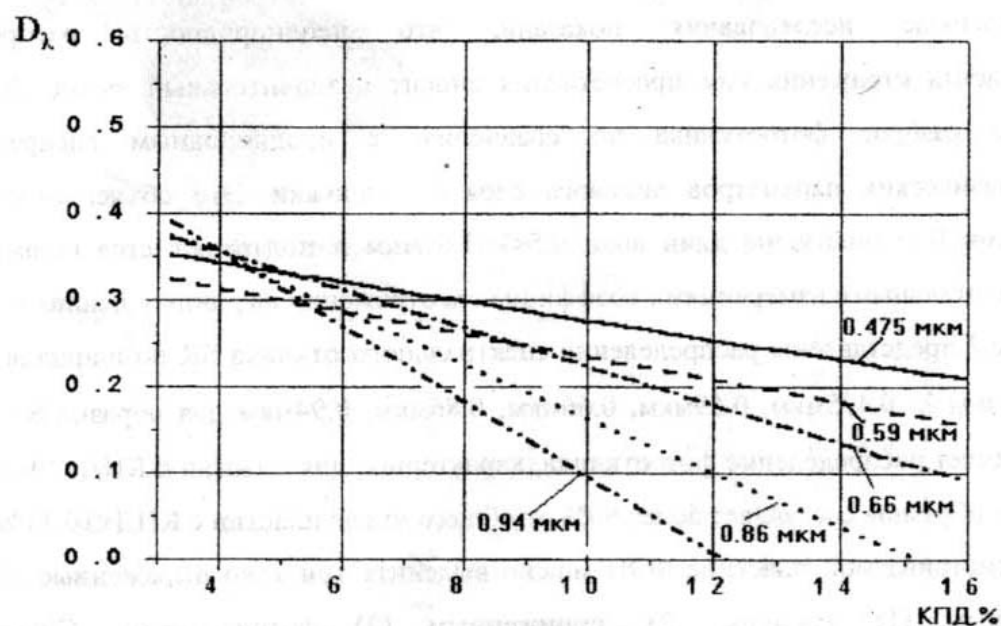


Рис.2.5. Блок-схема измерения распределения фототока по пластине ФЭП.

Для проведения исследования влияния неоднородного распределения фотоотклика на КПД выбраны 100 ФЭП площадью 29см^2 с КПД от 4% до 15.4%, а также ФЭП, изготовленные на подложках из поликристаллического кремния. Интегральные характеристики ряда ФЭП представлены в таблице 1: КПД, последовательное сопротивление R_n . В таблице 1 приведен удельный разброс фотоотклика (D_λ) для длин волн: $\lambda = 0.475\text{мкм}$, 0.59мкм, 0.66мкм, 0.86мкм, 0.94мкм.

Таблица 1

| Образец | КПД % | $R_{\text{н}}$, Ом | D_{λ} отн. ед. для λ | | | | |
|---------|----------|------------------------|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | | | 435нм | 590нм | 660нм | 860нм | 940нм |
| S6 | 10.1 | 0.17 | 0.09 | 0.17 | 0.18 | 0.13 | 0.025 |
| S9 | 9.4 | 0.21 | 0.16 | 0.21 | 0.12 | 0.16 | 0.17 |
| S5 | 11.9 | 0.15 | 0.21 | 0.2 | 0.19 | 0.09 | 0.14 |
| S7 | 7.4 | 0.38 | 0.27 | 0.27 | 0.2 | 0.24 | 0.29 |
| C1 | 11.8 | 0.2 | 0.2 | 0.22 | 0.18 | 0.12 | 0.15 |
| C2 | 9.5 | 0.23 | 0.29 | 0.23 | 0.19 | 0.22 | 0.28 |
| C3 | 8.5 | 0.16 | 0.26 | 0.19 | 0.08 | 0.18 | 0.24 |
| C4 | 11.9 | 0.12 | 0.39 | 0.18 | 0.21 | 0.12 | 0.06 |
| C5 | 9.4 | 0.23 | 0.36 | 0.2 | 0.12 | 0.14 | 0.14 |
| C6 | 9.0 | 0.19 | 0.21 | 0.24 | 0.19 | 0.24 | 0.18 |
| C7 | 14.9 | 0.09 | 0.3 | 0.21 | 0.09 | 0.14 | 0.03 |
| C8 | 12.0 | 0.11 | 0.17 | 0.23 | 0.19 | 0.12 | 0.09 |
| C9 | 10.9 | 0.19 | 0.29 | 0.22 | 0.13 | 0.27 | 0.07 |
| C10 | 9.9 | 0.23 | 0.43 | 0.27 | 0.14 | 0.23 | 0.1 |
| C11 | 8.0 | 0.3 | 0.33 | 0.2 | 0.23 | 0.21 | 0.21 |
| C12 | 9.6 | 0.29 | 0.31 | 0.26 | 0.18 | 0.23 | 0.36 |
| C13 | 8.5 | 0.24 | 0.38 | 0.17 | 0.22 | 0.26 | 0.15 |
| C14 | 4.3 | 0.5 | 0.36 | 0.15 | 0.33 | 0.39 | 0.55 |
| C15 | 6.0 | 0.46 | 0.38 | 0.36 | 0.31 | 0.31 | 0.36 |
| C16 | 7.6 | 0.35 | 0.43 | 0.43 | 0.29 | 0.31 | 0.37 |
| C17 | 3.8 | 0.7 | 0.43 | 0.26 | 0.15 | 0.25 | 0.15 |
| C18 | 15.4 | 0.09 | 0.25 | 0.19 | 0.11 | 0.09 | 0.05 |



Как показали исследования, существует явная зависимость удельного разброса D_{λ} от КПД исследуемого ФЭП. Эта зависимость представлена на рис.5 для различных длин волн. Как видно из рисунка, КПД ФЭП уменьшается с увеличением D_{λ} . На рис.6 представлена зависимость модуля тангенса угла наклона (K_{λ}) кривой D_{λ} (КПД) от длины волны.

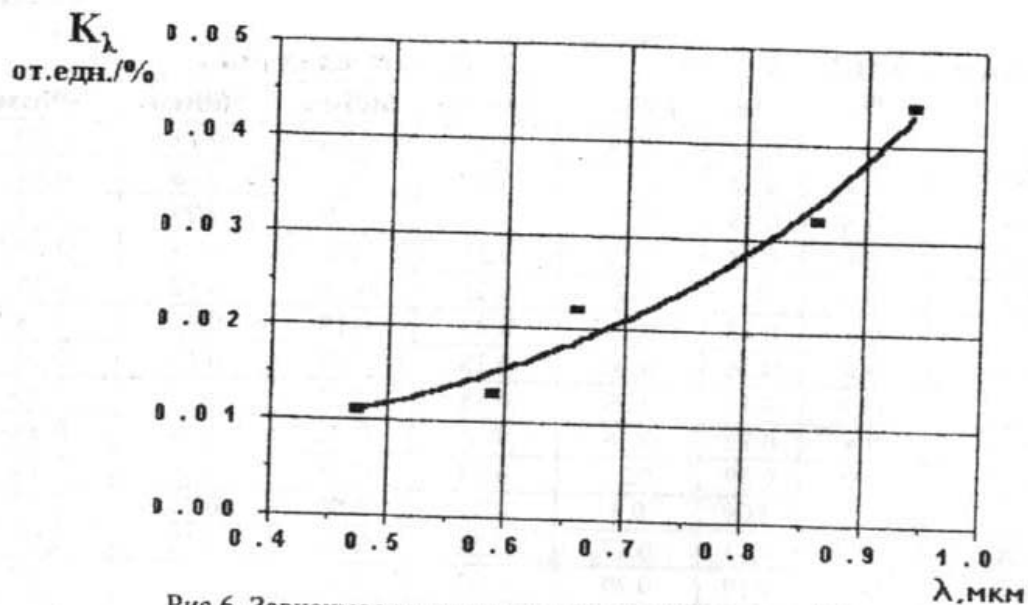


Рис.6. Зависимость модуля тангенса угла наклона K_λ кривой D_λ от длины волны.

Как видно из рис.6, с увеличением длины волны оптического излучения увеличивается K_λ . Установлено, что основной вклад в удельный разброс фотоотклика вносят параметры базовой области ФЭП, прежде всего диффузионная длина электронов L_n или, что то же самое, их время жизни τ_n .

Проведенные исследования показали, что неоднородность распределения коэффициента отражения или просветления вносит незначительный вклад (до 0.03) в удельный разброс фотоотклика по сравнению с неоднородным распределением электрофизических параметров лицевого слоя и подложки. Это объясняется малыми величинами R в диапазоне длин волн $0.5 < \lambda < 1.05 \text{ мкм}$ и подтверждается проведенными экспериментальными измерениями коэффициента отражения на данных длинах волн.

На рис.7 представлены распределения спектрального отклика SR по площади ФЭП на длине волны λ : 0.475 мкм, 0.59 мкм, 0.66 мкм, 0.86 мкм, 0.94 мкм для образца S7. Данный образец имеет распределение фотоотклика, характерное для пластин с КПД $< 10-11\%$, доля подобных образцов составляет более 90% от общего числа пластин с КПД $< 10-11\%$.

В рассматриваемой пластине ФЭП можно выделить три ярко выраженные области: с повышенным (1), средним (2), пониженным (3) фотооткликом. Спектральные характеристики данных областей представлены на рис 8. На рисунке также отображен спектральный отклик образца C18 (КПД 15.4%). Образец имеет практически однородное распределение фотоотклика ($D_\lambda = 0.05$ для $\lambda = 0.94 \text{ мкм}$), что характерно для образцов с КПД $> 12-13\%$ (см. таблицу 1).

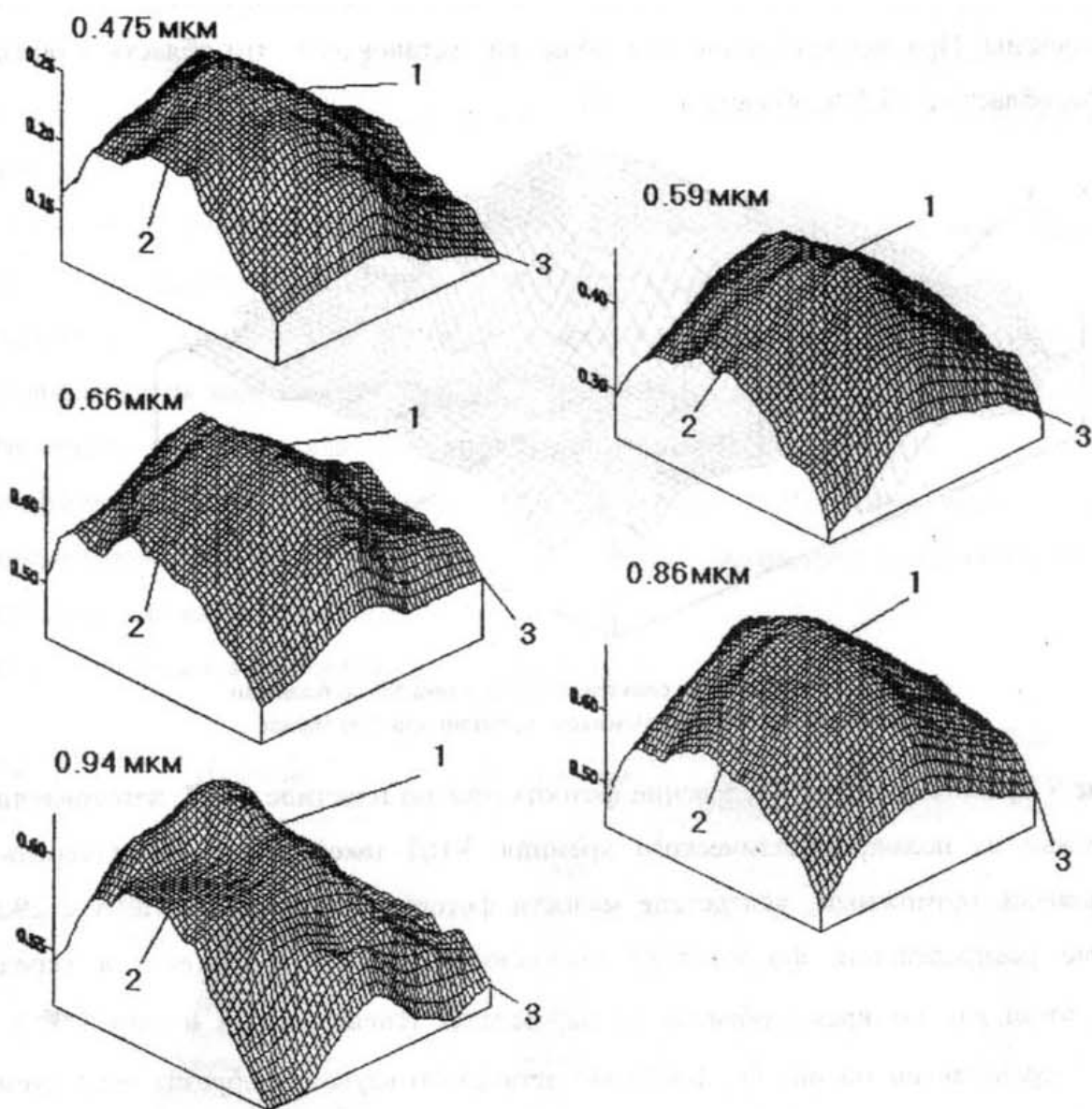


Рис.7. Распределение спектрального отклика SR по площади ФЭП для образца S7.

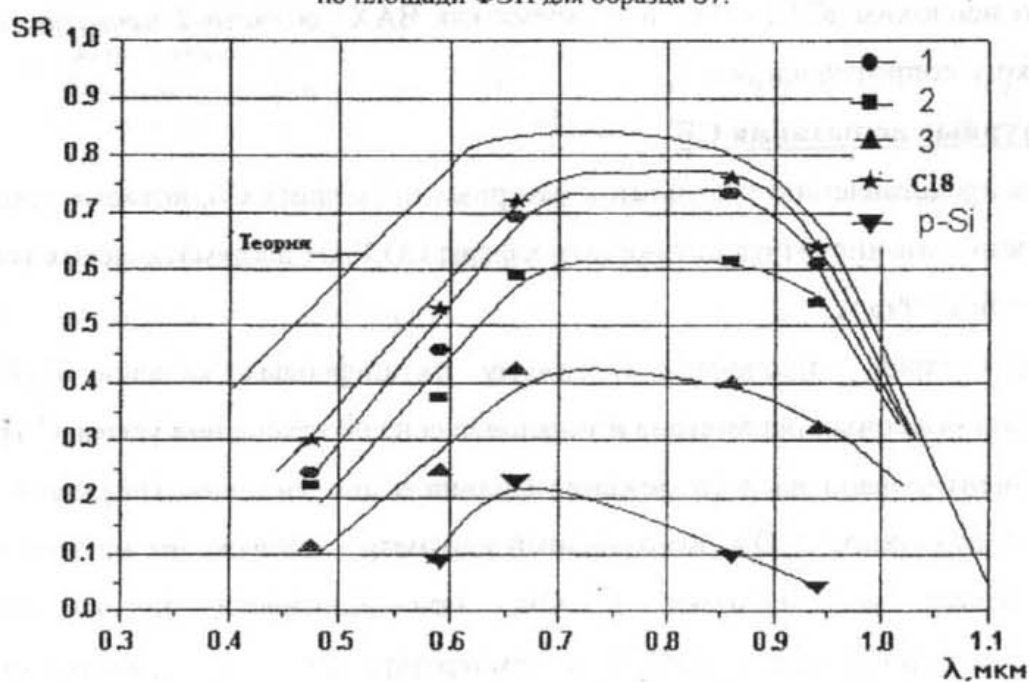


Рис.8. Спектральные отклики для областей 1,2,3 образца S7; образца C18 и теоретически рассчитанный спектральный отклик.

Для более детального изучения областей 1,2,3 из исследуемого ФЭП S7 эти области были вырезаны. При исследовании этих областей установлено, что область 1 обладает КПД 15%, область 2 - 9.5%, область 3 - 6.5%.

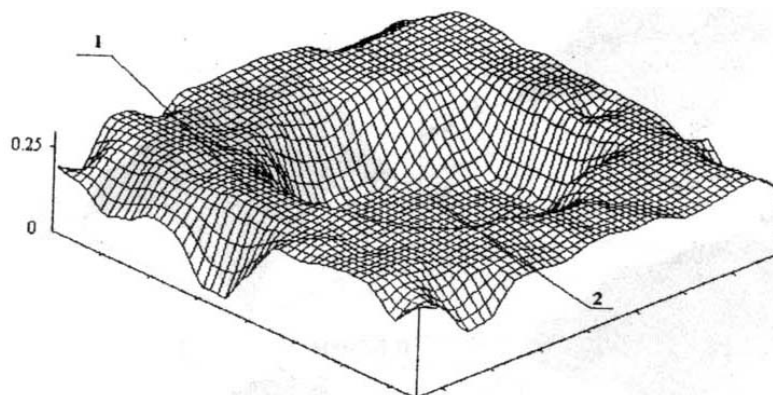


Рис.9. Распределение спектрального отклика SR по площади ФЭП на поликристаллическом кремнии при $\lambda=0.66\text{мкм}$.

На рис.9 представлено распределение фотоотклика по пластине ФЭП, изготовленного на подложке из поликристаллического кремния. КПД такой структуры измерить не представлялось возможным, вследствие малости фотоотклика (порядка $10\text{мА с } 29\text{см}^2$). Измерение распределения фотоотклика показало отсутствие фототовета в середине образца, тогда как по краям образца он наблюдался (спектральный отклик (∇) для области 1 представлен на рис.7). Для более детального изучения образца исследуемого ФЭП были вырезаны области 1 и середина области 2. Установлено: область 1 обладает относительно неплохим КПД - 5%, в то время как ВАХ области 2 представляет собой ВАХ омического сопротивления.

Глава 4. Натурные испытания СБ

Посвящена представлению результатов натурных испытаний СБ, которые проводились на базе метеостанции института оптики атмосферы СО РАН в климатических условиях г. Томска с сентября 1996 г.

Солнечная батарея подключена к одному из цифровых каналов TOR-станции мониторинга атмосферных параметров и установлена на её крыше под углом 45 градусов к горизонту, ориентирована на расположение Солнца в два часа дня. Нагрузкой является сопротивление величиной 5 Ом. Контрольный параметр - напряжение на этой нагрузке. Ток СБ создает на нагрузке 5 Ом, при плотности потока освещения 1000Вт/м^2 (Атмосферная масса АМ 1.5) и температуре 25°C , напряжение около 4В. Напряжение холостого хода исследуемой батареи при этих же условиях составляет 21В. Исходя из ВАХ СБ, измеряемый ток близок к току короткого замыкания (КЗ) с точностью 95%.

TOR-станция обеспечивает мониторинг по 40 параметрам. Проведены исследования влияния на работу СБ: температуры, давления, влажности, солнечной радиации, концентрации различных аэрозолей, а также зависимости тока КЗ от времени суток и времени года.

В таблице 2 приведен ряд параметров атмосферы (которые оказывают влияние на работу СБ) и коэффициенты их корреляции с напряжением на нагрузке СБ.

Можно выделить по величине коэффициента корреляции две группы параметров:

1. Коэффициенты корреляции больше 0,2: солнечная радиация, влажность, температура. Эта группа в основном влияет на интегральные характеристики ФЭП.
2. Коэффициенты корреляции меньше 0.2 и больше 0.05: сумма всех аэрозолей и концентрации CO, CO₂, O₃, NO, NO₂. Эта группа параметров в основном влияет на спектральные характеристики ФЭП.

Анализ проводился по первой группе параметров.

Таблица 2.

| № | Описание | Обозначение | Единица измерения | Коэффициент корреляции с SUN |
|----|------------------------------|-------------|-----------------------|------------------------------|
| 1 | дата | DATE | - | - |
| 2 | время | TIME | час | 0.212 |
| 3 | Напряжение на нагрузке СБ | SUN | В | 1 |
| 4 | Солнечная радиация | SR | ватт/м ² | 0.907 |
| 5 | Давление | PRESS | мм.рт.ст | 0.0215 |
| 6 | Температура | TEMP | С ⁰ | 0.3057 |
| 7 | Влажность | HUMID | % | -0.4427 |
| 8 | Скорость ветра | WINDS | м/с | -0.0047 |
| 11 | Концентрация CO | CO | мг/м ³ | 0.081 |
| 12 | Концентрация CO ₂ | CO2 | мг/м ³ | 0.093 |
| 13 | Концентрация O ₃ | O3 | мг/м ³ | 0.0574 |
| 14 | Концентрация NO ₂ | NO2 | мг/м ³ | 0.0519 |
| 15 | Концентрация NO | NO | мг/м ³ | 0.0704 |
| 16 | Радиационный фон | RF | микрорентген | -0.01 |
| 17 | Сумма всех аэрозолей | AEROS | частиц/м ³ | -0.1416 |

На рис.10 приведена усредненная за 3 года зависимость солнечной радиации от времени суток. Из графика видно, что максимум солнечной активности приходится на 14 часов. Можно отметить, что благоприятным временем для использования СБ является промежуток с 10 до 19 часов. Этот диапазон времени соответствует полуширине приведенной зависимости и не остается постоянным. На рис. 11 показан график зависимости продолжительности полного светового дня по месяцам, а также светового дня, определяемого по полуширине распределения интенсивности солнечного излучения за сутки. Видно, что в декабре и январе оптимальное время для работы СБ всего 4 часа, а в июле -10 часов.

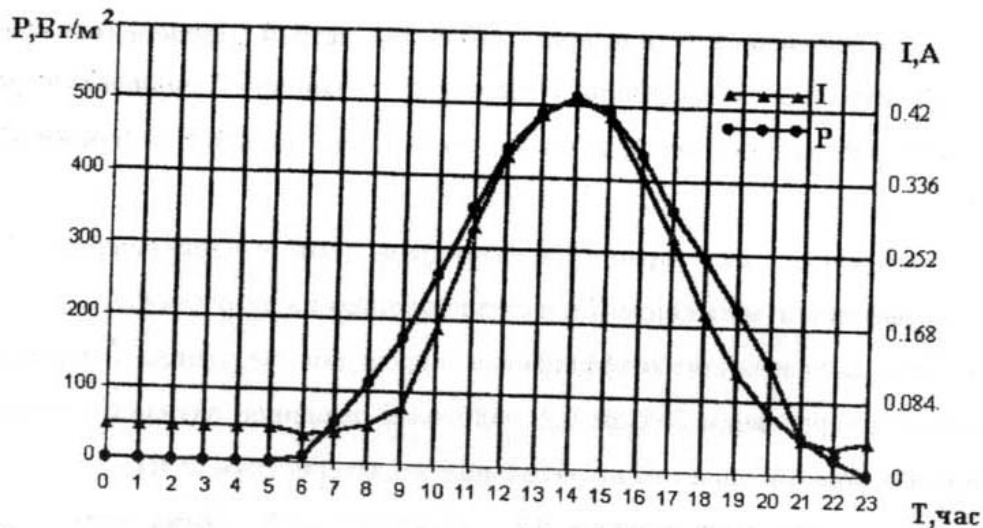


Рис.10. Среднегодовая зависимость тока короткого замыкания и мощности падающего солнечного излучения от времени суток.

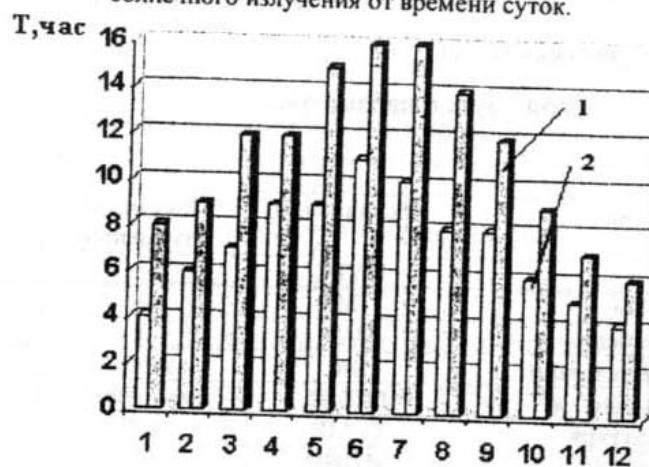


Рис.11. Продолжительность светового дня в зависимости от месяца. 1-полный световой день, 2- световой день, определяемый по полуширине распределения интенсивности излучения за сутки.

Количество солнечной энергии, фиксируемой пиранометром утром и вечером, больше, чем регистрирует СБ (см. рис.10). Это объясняется тем, что СБ установлена неподвижно и имеет худшую диаграмму направленности, чем пиранометр. Диаграмма направленности СБ такова, что ток в нагрузке, при фиксированном положении СБ, изменяется не более чем на 5-10% при изменении положения солнца на 40° . Применение системы ориентирования СБ на солнце позволит повысить сбор мощности в течение дня на 10-20%, а в отдельные месяцы (май, июнь, июль) до 30%.

Чтобы оценить КПД солнечной батареи в натуральных условиях, построена зависимость тока КЗ от интенсивности солнечного излучения и по ВАХ для данной батареи оценен её КГД и натуральных условиях. Рассчитанный КПД-13% совпадает с КПД СБ, измеренным в лабораторных условиях ($P_{\text{сод. изл}} = 1000 \text{ Вт/м}^2, T = 25^\circ \text{C}$).

В Заключение к диссертационной работе сформулированы основные результаты и выводы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основании модели неоднородного ФЭП разработана неразрушающая методика измерения пленарной фоточувствительности ФЭП с локальностью 0.1мм, в диапазоне длин волн от 0,475 до 0,94 мкм и проведены исследования влияния удельного разброса фотоотклика ФЭП на его КПД.
2. Физически обоснованы режимы локальной засветки ФЭП, обеспечивающие оценку КПД в локальных областях.
3. Теоретически и экспериментально показано, что основной вклад в снижение эффективности ФЭП вносит базовая область ФЭП, прежде всего удельный разброс диффузионной длины неосновных носителей заряда, а не удельный разброс коэффициента отражения от лицевой поверхности ФЭП, удельного сопротивления базового слоя и электрофизических параметров лицевого слоя.
4. Оптимизация конструкции ФЭП, а также выбор технологических параметров его изготовления, позволили увеличить КПД ФЭП лучших промышленных образцов с 12.5% (до начала исследований в 1996г) до 15.4%.
5. Проведены долговременные (1996г. - 1999г.) натурные испытания СБ в климатических условиях г. Томска, которые позволили:
 - подтвердить правильность определения КПД в лабораторных условиях,
 - выявить факторы, влияющие на работу ФЭП: солнечная радиация (коэффициент корреляции 0.9), температура(0.3), влажность(-0.44),
 - прогнозировать работу ФЭП в различных климатических условиях.
6. Разработаны и внедрены:
 - установка измерения интегральных параметров ФЭП в производственный контроль ФЭП;
 - автоматизированная оптическая зондовая установка измерения планарной неоднородности фоточувствительности ФЭП в технологический контроль изготовления ФЭП.
7. На основании проведенных натурных испытаний разработаны рекомендации для учета влияния суточной и годовой освещенности на эффективность работы энергетических комплексов и устройств с питанием от солнечных батарей.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Ушеренко А.А., Юрченко А.В. Планарная неоднородность фоточувствительности фотоэлектрических преобразователей. //Электронная промышленность.-1998,-№1-2.- С.108-111.

2. Миносков А.Л. Юрченко В.И. Юрченко А.В. Автономная малогабаритная станция приготовления питьевой воды с солнечной батареей./ Труды международной научно-технической конференции «Техника и технология очистки и контроля качества воды».- Томск, 1999.-С.164-165.
3. Бакин Н.Н., Ковалевский В.К., Плотников А.П., Ушеренко А.А., Юрченко А.В. Результаты климатических испытаний солнечной батареи в натурных условиях г.Томска.//Оптика атмосферы и океана.-1998.-Т. 11, №12.-С. 1337-1340.
4. Юрченко А.В. Исследование дефектности сложных поликристаллических слоев GaAs для фотопреобразователей./ Материалы Седьмой Российской конференции «GaAs-99», г.Томск. 21-23 октября, 1999.- Томск, 1999.-С.30-31.
5. Юрченко А.В., Юрченко В.И. Физические основы метрологии дефектов в полупроводниковых фотоматериалах и тестирование сложных соединений на основе GaAs./ Материалы Седьмой Российской конференции «GaAs-99», г.Томск. 21-23 октября, 1999.- Томск, 1999.-С.60-61.
6. Юрченко А.В., Ушеренко А.А. Модель неоднородного фотоэлектрического преобразователя./ Материалы Седьмой Российской конференции «GaAs-99», г.Томск. 21-23 октября, 1999.-Томск, 1999.-С.162-163.
7. Мочалов И.Г., Ушеренко А.А., Юрченко А.В. Автоматизированная система измерения характеристик фотоэлектрических преобразователей./Тезисы докладов VII Научно-технической конференции «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления»(Датчик-96)/под ред. Азарова В.Н.- М.:МГИЭМ, 1996.-Т.2,-С.404-405.
8. Юрченко А.В. Исследование пленарной неоднородности фотоэлектрических преобразователей. Материалы XXXVII международной студенческой конференции «Студент и научный прогресс». Физика ч.2,- Новосибирск, 1999.-С.104.
9. Крылов С. В., Юрченко А. В., Воторопин С. Д., Юрченко В. И. Установка визуализации и определения мест дефектов в плоских материалах на основе КВЧ автодинных датчиков 5-и мм диапазона / III-я Всероссийская НТК "Методы и средства измерений физических величин". Сборник докладов. - Н. Новгород, 1998. - Т. V.- С.4-5.
10. Юрченко А. В., Воторопин С. Д., Юрченко В. И. Установка для визуализации и определения мест расположений дефектов в солнечных элементах на основе автодинных датчиков 5- мм диапазона длин волн / Труды VIII Крымской Международной Микроволновой Конференций "КрыМиКо'98".- Севастополь, 1998.-С.134.
11. Чихман А.В., Мызгин В.С., Юрченко А.В., Воторопин С.Д., Юрченко В.И., Крылов С.В. Автоматизированная установка на основе автодинных датчиков КВЧ-диапазона для

контроля материалов.// Электронная промышленность,-1998.-№1 -2.-С. 136-137.

12. Юрченко А.В. Влияние суточной и годовой динамики освещенности на эффективности работы светотехнических устройств с питанием от солнечных элементов./ Тезисы докладов IV Международной светотехнической конференции: «Светотехника на рубеже веков: достижения и перспективы», г.Вологда. 19-22 июня, 2000.- Вологда, 2000.- С.110.

13. Юрченко А.В., Юрченко В.И.. Анализ возможности использования LIGA технологий на основе синхротронного излучения для изготовления солнечных элементов./ Материалы XIII Российской конференции по использованию синхротронного излучения, г.Новосибирск, 17-21 июля, 2000,-Новосибирск, 2000. –С. 79-80.

14. Юрченко А.В., Ушеренко А.А. Измерение фоточувствительности в локальных областях фотоэлектрических преобразователей.// Тезисы докладов 5-го всероссийского с международным участием совещания по материалам для источников света, электронных приборов и светотехнических изделий (МИСЭПСИ-5), г.Саранск 16-18 ноября 2000.- Саранск 2000.-С.77.