

На правах рукописи

Юрченко Алексей Васильевич

**НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ
В ПРОИЗВОДСТВЕ И ИСПЫТАНИЯХ КРЕМНИЕВЫХ
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ**

Специальность 05.11.13. – Приборы и методы контроля
природной среды, веществ, материалов и изделий

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Томск - 2009

Работа выполнена в Томском политехническом университете

Научный консультант: доктор технических наук,
профессор ТПУ, г. Томск,
Гольдштейн Александр Ефремович

Официальные
оппоненты: доктор технических наук, профессор
Тюльков Геннадий Иванович,
доктор технических наук, профессор
Поллер Борис Викторович,
доктор технических наук, профессор
Осипов Юрий Мирзоевич

Ведущая организация: ОАО «НПО Квант», г. Москва

Защита состоится 27 октября 2009 г. в 15:00 на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.09 при Томском политехническом университете по адресу: Россия, 634028, г. Томск, пр. Ленина, д.2, 10 корп. ауд. 213.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета по адресу: г. Томск, ул. Белинского, 53.

Автореферат разослан « » _____ 2009 г.

Ученый секретарь совета по защите
докторских и кандидатских диссертаций
Д 212.269.09 кандидат технических наук,
доцент



Б.Б. Винокуров

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ

Актуальность представленной тематики обусловлена высокими темпами развития солнечной энергетики и расширением географии использования фотоэлектрических систем (ФЭС). Изменение рыночных цен на энергию с учетом возмещения скрытых издержек, связанных с ее производством и использованием, станет одной из крупнейших проблем ближайших десятилетий. Это объясняет повышенный спрос на системы неразрушающего технологического и эксплуатационного контроля в производстве кремниевых фотоэлектрических преобразователей, моделей и систем. В министерстве энергетики США предсказывают, что уже в 2015 г. электроэнергия, производимая ФЭС, станет дешевле, чем электроэнергия, полученная из невозобновляемых источников, и главное – цена на нее не будет расти. Бурное развитие производства подобных систем обуславливает необходимость развития неразрушающего контроля на всех стадиях производства и эксплуатации ФЭС.

В системах преобразования энергии ФЭС (солнечных электростанций) в принципе могут быть использованы любые созданные и разрабатываемые в настоящее время типы ФЭП различной структуры на базе разнообразных материалов, однако не все они удовлетворяют комплексу требований к этим системам. Отдельные методы улучшения энергетических и эксплуатационных характеристик ФЭП, например за счёт создания сложных структур, плохо совместимы с возможностями организации их массового производства при низкой стоимости и т. д. Наиболее используемым материалом для фотоэлектрических систем преобразования солнечной энергии в настоящее время является кремний. Сейчас возобновляемые источники дороги, но по мере их развития и совершенствования будет неизбежно снижена их себестоимость. Тенденция развития материалов для солнечной энергетики показывает, что основным материалом для производства ФЭС на ближайшее будущее становится структурно-неоднородный кремний (поликристаллический, аморфный и мультикремний). Цикл производства ФЭС начинается с очистки кварцитов, изготовления кремния «солнечного качества», где необходимы методики технологического контроля параметров кремния. В дальнейшем при производстве солнечных элементов потребуется проводить контроль электрофизических характеристик пластин кремния и фотоэлектрических преобразователей (ФЭП), контроль выходных характеристик ФЭП и фотоэлектрических модулей (ФМ), а также эксплуатационный контроль ФЭС и ФМ.

Модернизация производства кремния в России обуславливает необходимость создания отечественных приборов технологического и эксплуатационного контроля и в частности систем измерения его электрофизических параметров и изделий солнечной энергетики на его основе. Определяющими характеристиками кремния с точки зрения эффективности ФЭП являются время жизни неосновных носителей заряда и удельное сопротивление. Наи-

более перспективным неразрушающим способом измерения данных параметров кремния с точки зрения точности и локальности являются СВЧ-методы. Однако для их успешного использования необходимо провести обоснование применения данных методик на структурно-неоднородном материале и модернизировать существующие технические решения, позволяющие достичь требуемой точности, локальности и производительности измерений.

В связи с тем, что стоимость традиционных источников энергии стремительно растет, в настоящее время в регионах без стационарной сети электропитания вместо дизельных электрогенераторов все чаще применяют ФЭС. Это не только позволяет снизить экологическую нагрузку на экосферу, но и экономически выгодно. При расчете конструкции ФЭС для потребителей недостаточно учитываются климатические особенности региона и аппаратные факторы, что приводит к погрешности до 40% между прогнозируемой и вырабатываемой мощностью ФЭС.

В связи с расширением географии использования анализ многолетней работы ФЭС в реальных условиях и разработка методики прогнозирования использования ФЭС в регионах Сибири и Дальнего Востока являются актуальной научной задачей.

Работа ФЭС зависит от таких факторов, как:

- аппаратных, обусловленных конструкцией и технологией изготовления СБ, углом размещения по отношению с горизонту;
- климатических, обусловленных воздействием различных климатических параметров на выходные энергетические характеристики ФМ.

Для построения адекватной методики прогнозирования необходимо создать модель работы ФМ с учетом воздействия доминирующих климатических и аппаратных факторов, а также провести натурные испытания ФЭС и ФМ при одновременном мониторинге параметров атмосферы и характеристик ФМ.

Из разработанных в ОАО «Научно-исследовательском институте полупроводниковых приборов (ОАО «НИИПП»)» методов в основу предлагаемой методологии положены зондовые методы:

- а) на стадии отработки технологии материала – электронно-зондовые;
- б) на стадии контроля материала с неоднородной структурой СВЧ-зондовые на различных длинах волн с воздействием на фотопроводимость;
- в) на стадии технологии формирования солнечного элемента со световым зондом с различной длиной волны.

Такая методология с измерением интегрированных параметров по площади пластины позволяет наиболее оптимально определить корреляционные зависимости и корректировать технологический процесс изготовления и оптимизировать условия эксплуатации.

Цель

Целью работы является решение научных и практических задач диагностики качества кремния, ФЭП и разработка систем многопараметрового мониторинга работы ФМ в натуральных условиях.

Задачи

1. Разработка методов и технических решений по измерению времени жизни неосновных носителей заряда и удельного сопротивления в структурно неоднородном кремнии «солнечного качества» с повышенной производительностью и локальностью.
2. Разработка автоматизированной установки неразрушающего измерения распределения удельного сопротивления и времени жизни неосновных носителей заряда в структурно неоднородном кремнии на основе автодинных СВЧ и КВЧ гибридно-интегральных модулей.
3. Разработка экспресс-методик неразрушающего контроля электрофизических характеристик ФЭП в локальных областях.
4. Разработка стационарных и мобильных программно-аппаратных средств мониторинга работы кремниевых ФМ в натуральных условиях.
5. Применение разработанного комплекса неразрушающего технологического и эксплуатационного контроля для отработки технологии изготовления с целью повышения эффективности ФЭП, а также повышения эксплуатационной надежности.
6. Проведение многолетних и многофакторных натуральных испытаний кремниевых ФМ и ФЭС малой мощности в Сибири и на Дальнем Востоке и обоснование комплекса климатических и аппаратных факторов, определяющих их работу в натуральных условиях.
7. Разработка физико-математической модели кремниевых ФМ, находящихся под воздействием климатических и аппаратных факторов, и на ее основе методики прогнозирования вырабатываемой электрической мощности кремниевой ФМ малой мощности для регионов Сибири и Дальнего Востока.

Научная новизна

1. Предложена методика и технические решения для измерения удельного сопротивления монокристаллического и мультикремния на основе использования КВЧ гибридно-интегральных автодинных датчиков, позволяющие измерять распределение удельного сопротивления с разрешением не хуже 1 мм в диапазоне удельных сопротивлений от 1 до 10 Ом·см с точностью измерения до 3%.
2. Обоснована методика измерения и разработан новый тип автодинного фотомодуляционного СВЧ-датчика и измерительная установка, позво-

- ляющая измерять время жизни неравновесных носителей заряда (как объемное, так и эффективное) в кремниевых пластинах в диапазоне от 100 нс до 5 мс.
3. Разработана методика оценки интегральных параметров ФЭП по результатам измерения локальных спектральных характеристик, что позволило теоретически рассчитать и экспериментально определить оптимальные параметры ФЭП для увеличения эффективности лучших образцов от 12.5 до 15.4% и уменьшения среднеквадратичного отклонения в партии ФЭП.
 4. На основе впервые проведенных в Сибири и на Дальнем Востоке долговременных и многофакторных испытаний кремниевых ФМ и ФЭС малой мощности получен комплекс доминирующих параметров, оказывающих влияние на работу ФМ в климатических условиях.
 5. Установлена математическая совокупность соотношений, определяющих зависимость вырабатываемой мощности ФМ от комплекса климатических и аппаратных факторов с погрешностью не более 5%, на основании которой усовершенствован метод прогнозирования вырабатываемой мощности кремниевого ФМ с учетом климатических особенностей местности, в которой он будет использоваться.
 6. Разработана мобильная станция мониторинга, позволяющая одновременно измерять метеорологические параметры атмосферы, вольтамперную характеристику и температуру поверхности ФМ.

Достоверность результатов

Достоверность результатов работы подтверждается данными многолетних экспериментальных исследований, а также опубликованными научными работами, патентом РФ. Достоверность и обоснованность полученных в работе научно-технических результатов и выводов обеспечиваются применением апробированного математического аппарата и математически обоснованных численных методов при решении поставленных задач, основанных на данных натурных испытаний, использовании аттестованных измерительных средств, согласованности расчетных и экспериментальных данных.

Методы исследования

В диссертации использован комплексный метод, включающий в себя теоретические исследования и экспериментальную проверку полученных результатов. Работа выполнялась с использованием математического и физического моделирования.

Для расчетов коэффициентов в математической модели применялся множественный корреляционный и линейный регрессионный анализ. Результаты измерений обрабатывались с помощью методов математической статистики.

Экспериментальные данные, полученные в диссертации, сопоставлялись с результатами, полученными другими авторами.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы докладывались на 20 Всероссийских и международных конференциях, в частности:

- 21st European PV Solar Energy Conference and Exhibition. Dresden, 4-8 September 2006.
- 22st European PV Solar Energy Conference and Exhibition. Milan, 3-7 September 2007.
- 23st European Photovoltaic Solar Energy Conference. Valencia, Spain, 4-8 September 2008.
- Modern Techniques and Technologies. 9th International Scientific and Practical Conference of students, Post-graduates and Young Scientists. 7-11 April, 2003, Tomsk, Russia.
- Возобновляемая энергетика. Состояние проблемы перспективы Международная конференция. СПб, 4-6 ноября. 2003.
- Кремний 2004, Иркутск, 5-9 июля 2004; Кремний 2006, Красноярск, 4-6 июля 2006 г; Кремний 2009, г. Новосибирск;
- 3-й и 4-й международные технологические конгрессы «Военная техника, вооружение и технологии двойного применения». Омск, 7-10 июня 2005 г.;
- Международный семинар «Альтернативные источники энергии и проблемы энергосбережения. 30 мая – 1 июня. СПб., 2005.
- Российская конференция «Демидовские чтения». Томск, 2006.
- Российская конференция «Арсенид галлия и полупроводниковые соединения группы III-V» GaAs-2002, GaAs-1999.

По теме диссертации опубликовано 72 работы, из них 13 – в изданиях, рекомендуемых ВАК, и зарубежных изданиях, зарегистрированных в базе научного цитирования «Web of Science». Получен патент на полезную модель №75516 «Мобильная станция мониторинга работы солнечной батареи». Издана монография «Автодинные датчики в измерительной технике».

Практическая значимость

Разработаны методики и приборы входного и технологического контроля производства кремния и ФЭП. С использованием данных приборов отработана технология производства ФЭП и ФМ в ОАО «НИИПП», ООО «Диагностика+» (Акты внедрения).

На основе анализа одиннадцатилетних натурных испытаний ФМ в Сибири и на Дальнем Востоке разработаны рекомендации по использованию ФМ в этих регионах и предложена методика прогнозирования вырабатываемой

мощности ФМ. Рекомендации и методика используются при проектировании СЭУ для конечных пользователей в ОАО «НИИПП» (Акт внедрения).

Мобильная станция мониторинга работы ФМ апробирована и использована для проведения испытаний ФЭС в ИПМТ ДВО РАН, г. Владивосток.

Результаты долговременных испытаний ФМ в Томске отражены в отчете по энергетическим ресурсам Томской области, выполненный по заказу Администрации Томской области в 2004 г.

Результаты работы использованы при выполнении ряда грантов, хозяйственных и бюджетных работ:

1. НИР «Луч»: «Исследование и разработка технологии создания высокоэффективных каскадных солнечных элементов» (ОАО «НИИПП»). Заказчик – Миноборонпром, 1998 г.
2. НИР: «Разработка методики и изготовление макетов устройств для бесконтактного локального измерения удельного сопротивления, времени жизни неравновесных носителей заряда и определения типа проводимости в поликристаллическом кремнии» (ОАО «НИИПП»). Заказчик – ОАО «НИИПП», 2006 г.
3. Грант по программе Министерства образования РФ «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники». (Томский политехнический университет (ТПУ)) НИР: «Моделирование и наземная отработка ФЭП на основе арсенида галлия на воздействие факторов космического пространства», 2001-2002 гг.
4. НИР: «Разработка научно-производственной базы получения кремния солнечного качества и изготовления энергетических комплексов на основе кремния» (ОАО «НИИПП»). Заказчик – Томская областная администрация, 1999 г.
5. НИР: «Исследование технологии очистки кварцитов для разработки энергетических комплексов на основе кремниевых солнечных элементов» (ОАО «НИИПП»). Заказчик – ОАО «Антоновское рудоправление», 1999 г.
6. ОКР «Стекло»: «Разработка технологии получения кварцитового сырья для производства стекла из отходов обогащения кварцитов» (ОАО «НИИПП»). Заказчик – ОАО «Антоновское рудоправление», 2000 г.
7. НИР "Тандем": «Исследование электрофизических параметров эпитаксиальных структур GaAs, солнечных элементов на их основе и поставка опытных образцов солнечных элементов для натуральных испытаний в составе изделия 14Ф33 №12» (ОАО «НИИПП»). Заказчик – ОАО «Сатурн», Краснодар, 2001-2002 гг.
8. Грант Министерства образования РФ для молодых кандидатов наук НИР: «Климатические испытания кремниевых солнечных батарей в

- натурных условиях г. Томска» (ТПУ). 2002-2004 гг. Номер госрегистрации: 01220216047.
9. Грант по программе «Развитие научного потенциала высшей школы» НИР: «Анализ работы солнечных энергетических установок в условиях Сибири и разработка методики прогнозирования их работы в натуральных условиях» (ТПУ), 2005 г. Номер госрегистрации: 01200502210.
 10. Грант Президента РФ для молодых кандидатов наук. НИР: «Разработка мобильной станции мониторинга работы солнечных батарей в различных климатических условиях» (ТПУ), 2003-2004 гг. Номер госрегистрации: 01200313537.
 11. Грант Президента РФ для молодых кандидатов наук. НИР: «Природные и техногенные факторы в деградации энергетической характеристик солнечных элементов» (ТПУ), 2005-2006 гг.
 12. Грант Президента РФ для молодых кандидатов наук. НИР «Системы мониторинга солнечных энергетических установок работающих при воздействии природных и техногенных факторов» (ТПУ), 2008-2009 гг. Номер госрегистрации: 0120080917.
 13. ОКР «Меганом-Б»: «Разработка автономного источника электропитания мощностью до 1000Вт на основе фотоэлектрических преобразователей» (ОАО «НИИПП»). Заказчик – Министерство обороны. 2007-2009 гг.
 14. ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2012 годы». НИР: «Автоматизированная система контроля состояния капельниц» ГК № 02.512.11.2306 (ООО «Диагностика+»), 2008-2009 гг.
 15. НИР «Проведение натуральных испытаний кремниевой солнечной батареи (СБ10-12), с получением экспериментальных данных по эффективности использования солнечной батареи СБ10-12 в климатических условиях г.Владивостока» (Институт проблем морских технологий ДВО РАН, г Владивосток), 2007 г.

Личный вклад автора

Самостоятельно автором разработаны методики и установки локального контроля параметров солнечных батарей. Автором проведены исследования факторов, снижающих эффективность ФЭП и ФМ. По рекомендациям автора проведена модернизация технологии их изготовления.

Под научным руководством автора разработана мобильная станция мониторинга работы ФМ, проведены натурные испытания в Сибири и Дальнем Востоке, проведен статистический анализ полученных данных.

Автором самостоятельно получены уравнения регрессии, показывающие зависимость параметров батареи от различных климатических факторов. Разработана методика прогнозирования вырабатываемой мощности ФМ.

При содействии сотрудников ОАО «НИИПП» Л.Г. Лапатина и С.Д. Воторопина созданы установки измерения времени жизни неосновных носителей заряда и удельного сопротивления и проведена оценка их применимости для структурно неоднородных материалов. В составе коллектива в ОАО «НИИПП» создан промышленный образец установки измерения распределения удельного сопротивления по пластине полупроводника.

Самостоятельно автором разработана методология сквозного неразрушающего контроля производства и испытаний ФЭП, ФМ и ФЭС.

При содействии директора межвузовского центра «Технологический менеджмент» ТГУ, профессора Сырякина В.И. создан метрологический комплекс неразрушающего контроля на всех этапах производства ФЭС.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Комплекс неразрушающих методов контроля производства и испытания ФМ от получения кремния до использования ФЭС в реальных условиях Сибири и Дальнего Востока.

2. Методика измерения удельного сопротивления, объемного и эффективного времени жизни неравновесных носителей заряда в структурно-неоднородном кремнии «солнечного качества».

3. Аппаратно-программный комплекс на основе автодинных датчиков для бесконтактного измерения распределения удельного сопротивления и времени жизни по поверхности полупроводниковых пластин диаметром до 250 мм.

4. Результаты исследования влияния климатических и аппаратных факторов на работу кремниевых ФМ и построенный на основе их анализа комплекс доминирующих факторов, оказывающих влияние на их работу в условиях различных климатических зон.

5. Комплекс аппаратуры и результаты многолетних исследований в производстве и испытаниях, позволяющие создать статистическую модель ФМ, работающего при воздействии климатических природных факторов, и построить на ее основе методику прогнозирования вырабатываемой мощности ФМ.

6. Мобильный аппаратно-программный комплекс мониторинга работы ФМ совместно с метеорологическими параметрами окружающей среды и результаты использования в условиях Сибири и Дальнего Востока.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, основных выводов, списка используемых источников из 153 наименований. Диссертаци-

онная работа содержит 225 страниц машинописного текста, включает 15 таблиц, 67 иллюстраций.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности темы, формулировку цели и задач работы, основные положения, выносимые на защиту, и определяет содержание и методы работы.

Глава 1. Обзор неразрушающих методов и средств определения основных электрофизических параметров полупроводников

В главе дан обзор методов неразрушающего контроля полупроводниковых материалов и структур в производстве кремния солнечного качества и ФЭП на его основе. Представляет большой прикладной интерес использование автодинных датчиков для контроля параметров кремния солнечного качества и арсенид-галлиевых структур для фотоэнергетики. В главе приведены результаты анализа работы автодинных датчиков в гибридно-интегральном исполнении. В качестве активных элементов использован многофункциональный кристалл с мезапланарными структурами. Рассмотрен непрерывный режим работы автодина и режимы с различными видами модуляции, позволяющие расширить области решаемых задач систем контроля материалов с неоднородной структурой.

На основе проведенного анализа существующих методов обосновано применение СВЧ-методов измерения времени жизни неосновных носителей заряда и удельного сопротивления. Проведено обоснование их использования для структурно-неоднородного материала, в частности для мультикремния.

Для исследования ФЭП в локальных областях выбран спектральный метод с модулированием воздействующего сигнала на частоте 5 кГц.

Глава 2. Физико-математические модели солнечных батарей

В главе описываются электрофизические и оптические свойства кремниевых ФЭП. Проведена классификация методов прогнозирования вырабатываемой электрической мощности ФМ.

Все способы расчета вырабатываемой мощности ФМ выполняются по следующим моделям: модель КПД; модель поправочных коэффициентов; модель физическая; модель статистическая.

В первой модели вырабатываемая мощность считается путем умножения КПД ФМ на мощность солнечного излучения, которая соответствует тому региону, где будет располагаться ФМ. Этот способ расчета имеет наибольшую погрешность и носит оценочный характер.

Вторая модель – модель, в которой вводится ряд поправочных коэффициентов для учета влияния некоторых внешних факторов на КПД ФМ:

$$\eta_{\text{CDE}} = r_{\text{SP}} \cdot r_{\text{T}} \cdot r_{\text{G}} \cdot r_{\text{IA}} \cdot r_{\text{X}} \cdot \eta_{\text{STC}}, \quad (1)$$

где η_{STC} – КПД СБ, измеренный при стандартных условиях ($t = 25^\circ\text{C}$, АМ 1.5, мощность излучения 1000 Вт/м^2); r_{SP} – коэффициент, учитывающий отличие спектра солнечного излучения от спектра АМ 1.5; r_{T} – коэффициент, учитывающий отличие температуры, при которой работает ФМ, от стандартной; r_{G} – коэффициент, учитывающий различия между мощностью солнечного излучения и стандартной мощностью; r_{IA} – коэффициент, учитывающий угол наклона ФМ.

К недостаткам такой модели можно отнести то, что эти коэффициенты применимы только для небольшой территории. В этом случае погрешность оценки составляет 20%.

Третья модель – физическая, в которой расчет мощности ФМ проводится на основе решения уравнений переноса для p-n перехода полупроводникового материала с учетом разогрева ФМ. Недостатком физической модели является то, что для расчета мощности ФМ необходимо знать спектр солнечного излучения в каждый конкретный момент. Замена реального спектра на функцию Планка, описывающую излучение абсолютно черного тела при температуре 5800 К, приводит к ошибке порядка 10%. Так же, для физической модели необходимо знать время жизни носителей заряда, коэффициенты диффузии, концентрации примесей и т. д., что не всегда представляется возможным.

Четвертая модель – статистическая. Проводится анализ долговременных испытаний ФМ при воздействии различных. Методы обработки данных наблюдений базируются на положении теории вероятности и математической статистики. Для статистических методов построения эмпирических зависимостей очень важно, чтобы результаты наблюдений подчинялись нормальному закону распределения, поэтому проверка нормальности распределения – основное содержание предварительной обработки результатов наблюдений. Именно эта модель используется в данной работе для создания методики прогнозирования работы ФМ в регионах Сибири и Дальнего Востока.

В данной главе оценено влияние планарной неоднородности ФЭП на его эффективность. Разделен вклад в планарную неоднородность ФЭП на две составляющие:

1. Подложечная составляющая. Обусловлена неравномерным распределением удельного сопротивления и диффузионной длины неосновных носителей заряда в подложке.

2. Технологическая составляющая. Неравномерное распределение электрофизических и конструкционных параметров в лицевом слое и ОПЗ (диф-

фузионная длина неосновных носителей заряда, скорость поверхностной рекомбинации, удельное сопротивление лицевого слоя, глубина залегания р-п перехода) обусловленное технологическими операциями изготовления ФЭП (диффузия, пассивация, создание омических контактов и др.).

Для изучения влияния неравномерного распределения электрофизических и конструктивных параметров ФЭП на его эффективность был использован метод, предложенный W.Shockley для изучения неоднородного р-п перехода. Суть метода заключается в представлении исходной структуры неоднородного р-п перехода в виде двух параллельно соединенных однородных р-п перехода. Причем одна из структур является идеальной, другая имеет различные отклонения от идеальной структуры.

С использованием данного метода проведен анализ влияния неравномерного распределения сопротивления и диффузионной длины неосновных носителей заряда на эффективность ФЭП.

Показано, что снижение диффузионной длины в подложке в 10 раз приводит к снижению КПД ФЭП до 32%. Следует заметить, что при малой площади дефектной области (10%) с диффузионной длиной в 100 раз меньшей, чем в идеальной области, происходит снижение КПД ФЭП до 20%.

Показано, что наиболее существенный вклад в уменьшение эффективности ФЭП дает уменьшение диффузионной длины в подложке, увеличение скорости поверхностной рекомбинации на лицевой поверхности и увеличение темнового тока р-п перехода.

Для экспериментального исследования планарной неоднородности ФЭП применен метод сканирования световым зондом с измерением фотоответа. Для обоснования данной методики измерения была использована распределенная модель Gerald Lucovsky, описывающая фотоэффект при локальном освещении р-п перехода.

Оптическое излучение в случае локальной засветки пластины ФЭП, падает на п-слой р-п перехода световым пятном с радиусом, равным R . В стационарных условиях фотоэдс ϕ есть изменение потенциального барьера перехода, обусловленное генерацией носителей заряда:

$$\phi = \Delta\phi = \phi_{A0} - \phi_A = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{qf}{kT} - 1 \right), \quad (2)$$

где f – функция, описывающая разделение электронно-дырочных пар на р-п переходе;

ϕ_B, ϕ_{B0} – величина потенциального барьера при освещении и без него.

При построении модели выполняются следующие условия:

– радиус светового пятна больше диффузионной длины неосновных носителей заряда в п- и р-слое $R \gg L_n, L_p$. Это позволяет пренебречь растеканием неосновных носителей заряда из освещенной области;

- рассматриваем стационарный случай – это позволяет пренебречь переходными процессами и тем самым упростить модель;
 - считаем, что р-п переход бесконечный по площади;
 - функция разделения носителей заряда однородна в пятне.
- Допустим, что обратное смещение, подаваемое на лицевой контакт р-п перехода, существенно больше $\phi_{K \min}$.

$$\phi_{K \min} = \left(\frac{kT}{q} \right) \cdot \left(4 + \frac{1}{2} \alpha^2 a^2 \right). \quad (3)$$

где a – ширина контакт р-п перехода.

Видно, что чем больше длина спада α , тем большее обратное смещение необходимо приложить для обеспечения режима насыщения по всей площади перехода.

Дифференциальное уравнение, описывающее фотоэффект в обратном смещенном переходе, имеет вид:

$$\frac{d^2 \phi}{dx^2} = - \left(\frac{\rho_n}{X_{pn}} \right) \cdot qf(x), \quad (4)$$

где $f(x)$ – функция, описывающая разделение электронно-дырочных пар барьером р-п перехода. ГУ, при которых выполняется равенство (2), имеют вид

$$\frac{d\phi}{dx} = \begin{cases} \left(\frac{\rho_n}{X_{pn}} \right) \cdot \Delta I_L & x = 0, \\ 0 & x = a, \end{cases} \quad (5)$$

где ΔI_L – добавочный ток, вызванный поглощением оптического излучения переходом.

Решение уравнения (3) при ГУ (4) имеет вид

$$\Delta I_L = q \int_0^a f(x) dx. \quad (6)$$

Таким образом, изменение тока равно числу электронно-дырочных пар, разделенных барьером перехода и не являющихся функцией от места, где электронно-дырочные пары были разделены.

Для исследования генерационных процессов в локальных областях ФЭП необходимо приложить к исследуемой структуре ФЭП обратное смещение, выбранное из условия (3), и согласно уравнению (6), измеряемое изменение тока во внешней цепи является фототоком локально освещенной области

ФЭП. Тем самым, измерив распределение фототока по площади структуры ФЭП можно судить о равномерности генерационных процессов в локальных областях ФЭП.

Глава 3. Методы неразрушающего контроля параметров структурно неоднородного материала.

В главе представлены разработанные методы неразрушающего контроля параметров структурно-неоднородных материалов, а также представлены установки, реализующие данные методы, и проведен анализ результатов измерения СВЧ-методами параметров образцов кремния различного качества.

Принцип локального измерения удельного сопротивления основан изменении сигнала с датчика при взаимодействии СВЧ-поля со свободными носителями в малой области полупроводника. В большинстве известных методов потери, вносимые полупроводниковым образцом, регистрируются как изменения прошедшей через локальную область СВЧ-мощности. В случае, когда выполняется условие $\rho\omega\epsilon_0\epsilon > 1$, электрическое поле в образце не экранируется свободными носителями и исследуемый образец можно рассматривать как диэлектрик с потерями, где ρ – удельное сопротивление полупроводника; ω – угловая частота СВЧ поля; ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника. Прошедшая через локальную область СВЧ-датчика мощность P_{np}

записывается $P_{i\delta} = \frac{P_{\infty}}{\left(1 + \frac{\alpha}{\rho}\right)^2}$, где P_{∞} – мощность, прошедшая через датчик в

отсутствии образца, α – коэффициент, определяется экспериментально по калибровочной кривой датчика. Следовательно, имея значение коэффициента α и измерения P_{np} можно определить удельное сопротивление по формуле

$$\rho = \frac{\alpha}{\left(\left(\frac{P_{\infty}}{P_{i\delta}}\right)^{\frac{1}{2}} - 1\right)}, \quad (7)$$

В случае образцов ($\rho\omega\epsilon_0\epsilon < 1$) СВЧ поле проникает в полупроводник лишь на глубину скин-слоя и потери вносимые удельным сопротивлением образца зависят от толщины скин - слоя и параметров геометрии отверстия.

В области удельных сопротивлений (10^{-1} – 10 Ом·см) не удается получить простые аналитические выражения, связывающие параметры датчика с удельным сопротивлением образца, как было показано М.А. Детинко. В этой области с помощью эталонных образцов сопротивлений осуществляется калибровка датчика для измерения удельного сопротивления.

В структурно-неоднородном материале, состоящем из большого числа кристаллов, между которыми существуют межкристалльные границы, необходимо рассмотреть влияние этих границ на измерение удельного сопротивления СВЧ-методом. Учет неоднородности удельного сопротивления по глубине проводится при разбивке образца на несколько слоев с удельным сопротивлением каждого слоя. Расчеты показывают, что при диаметре измерительного отверстия менее 5 мм ошибка сравнима с погрешностью СВЧ-метода. Показано, что с помощью данной методики можно измерять распределение удельного сопротивления структурно-неоднородного кремния (поли- и мульти-) с разрешением 2 мм и точностью 5% в диапазоне 0.1-10 Ом·см.

Использование СВЧ-метода для определения времени жизни неравновесных носителей заряда в полупроводниках известно давно. Процессы релаксации фотоносителей в полупроводниковых материалах, определяемые шириной запрещенной зоны, температурой, концентрацией центров рекомбинации и т.д., зависят также от уровня оптического возбуждения. Длительность оптических импульсов выбрана большей времени жизни ННЗ. Считаем, что возбуждение ННЗ происходит под действием излучения, имеющего высокий коэффициент поглощения, и за время равное длительности импульса, устанавливается стационарное распределение ННЗ. Возбужденные световым импульсом ННЗ, попав в СВЧ поле датчика, приведут к дополнительным потерям СВЧ мощности. Соответствующее этому изменение сигнала на выходе датчика $P_{\text{вых}}$ записывается в виде $P_{\text{вых}} = \hat{E} P_0 \frac{\Delta N}{N_0}$, где P_0 – СВЧ-мощность

на входе датчика; K – коэффициент преобразования изменения проводимости полупроводника в СВЧ выходной сигнал; ΔN – полное число ННЗ в СВЧ поле датчика; N_0 – полное число темновых носителей заряда в этой же области.

Полное число ННЗ в области измерения определяется уровнем оптического возбуждения и зависит от соотношения размеров области проникновения СВЧ-поля в полупроводник и диффузионной длины носителей заряда. Очевидно, что выходной сигнал возрастает с уменьшением глубины проникновения СВЧ-поля в полупроводник до тех пор, пока не станет меньше диффузионной длины носителей заряда. Это связано с уменьшением общего числа темновых носителей в области СВЧ-поля N_0 и, соответственно, с ростом

отношения $\Delta N/N_0$. Следует отметить, что при использовании источника оптического излучения, обеспечивающего равномерную генерацию ННЗ в объеме полупроводника, выходной сигнал не будет возрастать с уменьшением глубины проникновения поля. Минимальный размер освещаемого участка полупроводника не должен быть менее $3L_0$, так как в противном случае начнут сказываться эффекты, связанные с диффузией носителей заряда из области СВЧ поля в глубь образца.

При однородной генерации ННЗ по всей толщине образца время установления равновесия связано со следующими процессами: рекомбинация ННЗ на поверхности; рекомбинация ННЗ в объеме; диффузия ННЗ в глубь образца. Измеряемой является рекомбинация неравновесных носителей в объеме, таким образом, необходимо создать условия, при которых остальными вкладками в рекомбинацию можно пренебречь. При малых временах жизни ННЗ рекомбинацию на поверхности полупроводника можем не учитывать. Следовательно, для получения точных результатов необходимо лишь учесть диффузию носителей заряда.

Проведенный анализ и результаты, полученные другими авторами, показывают, что измерение времени жизни возможно на частотах от несколько до десятков гигагерц. Дальнейшее увеличение частоты приводит к уменьшению глубины проникновения и, соответственно, повышению локальности, но ухудшению чувствительности метода измерения.

Для реализации поставленной задачи выбран автодинный СВЧ-датчик с концевым измерительным отверстием. Это датчик квазистатического типа, где электрическое поле локализовано в области свободного, например, конца копланарной линии (рис.1).

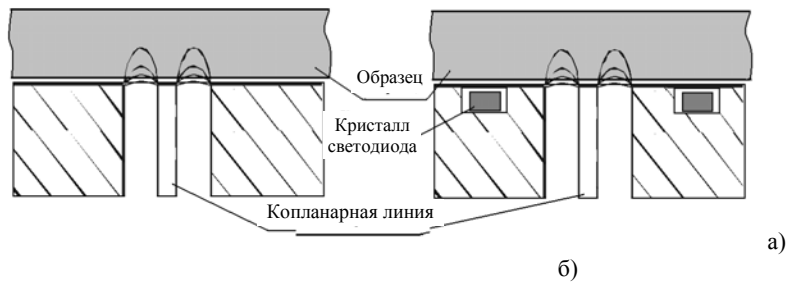


Рис. 1. Электрическое поле СВЧ датчика в локальной области копланарной линии:

а – датчик без светодиода; б – датчик со светодиодом

Исследуемые образцы включаются в краевое электрическое поле СВЧ-датчика между концом линии и экраном копланарной линии, изменяя тем

самым его сигнал (частоту и потери). Пространственное расширение при измерении вдоль поверхности образца определяется степенью локализации электрического поля вблизи конца линии и равно диаметру отверстия. Глубина проникновения электрического поля в образец близка к размеру отверстия.

При создании прибора на его основе были оптимизированы все его блоки под углом повышения уровня сигнала фотопроводимости: канал оптического возбуждения (ток накачки, время нарастания зондирующего импульса), диод Ганна (его частота и мощность), длина волны и мощность излучения светодиодов. Технические характеристики прибора следующие: диапазон удельного сопротивления от 0,5 Ом·см до 10 Ом·см, диапазон измеряемых значений времени жизни от 100 нс до 5 мс.

Эксперименты показали, что собранная установка позволяет измерять время жизни ННЗ структурно-неоднородного материала по площади пластин с удельным сопротивлением от 0.5 Ом·см и выше и определять неоднородность времени жизни.

По этой методике сконструирован измерительно-вычислительный комплекс для дефектоскопии структурных неоднородностей по поверхности материалов диаметром до 200 мм

В разработанной дефектоскопической установке был применен автодинный датчик М-55314 5-миллиметрового диапазона длин волн ($f \approx 60$ ГГц). Установка (рис. 2.) позволяет осуществлять бесконтактный автоматизированный контроль плоских объектов и получение распределения отраженного сигнала по поверхности.

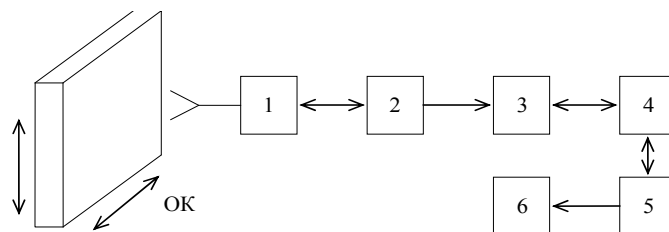


Рис. 2. Структурная схема установки:

1 – датчик М-55314 с антенной; 2 – блок выделения сигнала автодетектирования; 3 – блок АЦП; 4 – ЭВМ; 5 – блок управления сканирующим устройством; 6 – сканирующее устройство; ОК – объект контроля

Объект контроля сканируется датчиком 1. Изменения тока в цепи питания датчика, вызванные воздействием отраженного сигнала, регистрируются блоком 2, поступая после оцифровки в блоке АЦП 3 на ЭВМ 4. Данные хранятся в виде двумерного массива чисел, который может быть представлен в

цветном изображении (рис.3). Совместно с датчиком использовалась СВЧ-антенна, состоящая из двух металлических пластин уменьшающейся ширины, предназначение которой состоит в согласовании волновых сопротивлений высокочастотного выхода датчика и свободного пространства (зазор между концами пластин 0.3 мм).

Были получены изображения структур, моделирующих дефекты в различных объектах. Результат сканирования пластины, на поверхности которой были вытравлены 4 полоски меди шириной 3, 2, 1 и 0.5 мм (рис. 3).

Результаты измерений показали принципиальную возможность использования автодинных датчиков М-55314 в системах визуализации поверхностных структурных дефектов в объектах контроля. Предложенная система обеспечивает разрешение по размерам дефектов ≈ 0.5 мм и локальность 0.35 мм. Повышение разрешающей способности установки может быть достигнуто оптимизацией конструкции антенны, уменьшением шага сканирования установки, использованием более высокочастотных датчиков.

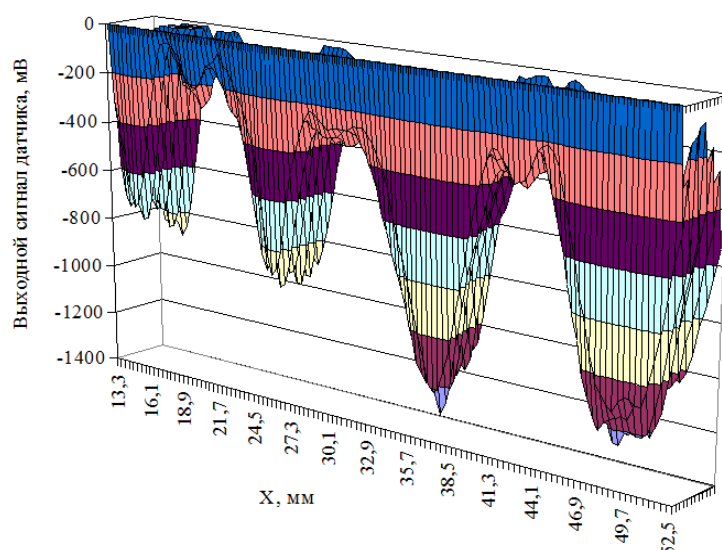


Рис. 3. Распределение отраженного сигнала от поверхности

Для анализа возможности выявления структурных дефектов по глубине пластин были исследованы многослойные структуры арсенида галлия и фосфида индия, имеющие высокоомный слой под проводящими слоями. Анализ взаимосвязи между величиной СВЧ-сигнала на выходе датчика со слоенной структурой показывает, что величина СВЧ-сигнала растет с уменьшением удельного сопротивления скрытого слоя вследствие меньшей величины вносимых потерь. Причем для выделения вклада, вносимого подложкой, был

проведен эксперимент по измерению СВЧ-сигнала 6 подложек, на которых затем были выращены эпитаксиальные слои с различной концентрацией и измерен СВЧ-сигнал. Получено, что с ростом концентрации величина вносимых потерь уменьшается. Проведенные исследования показывают возможность измерения удельного сопротивления скрытых слоев в многослойных пленках фосфида индия СВЧ-методом, причем общие закономерности имеют тот же характер, что и для пленок арсенида галлия.

Таким образом, показано, что предложенные методы и разработанные установки позволяют измерять параметры материалов (в том числе мультислойных), имеющие структурную неоднородность как по поверхности, так и по глубине.

Глава 4. Методологические основы получения и исследования ФЭП

В главе описаны методологические основы получения и исследования ФМ и представлены разработанные методики и установки для исследования интегральных и дифференциальных параметров кремния и ФЭП.

Технология изготовления ФМ подразделяется на следующие основные этапы: очистка кварцитов, получение кремния «солнечного качества», изготовление ФЭП, монтаж активного элемента на панель, сборка солнечной батареи. На всех этапах требуется технологический контроль, а также выходной контроль качества и измерение параметров кварцита, кремния, ФЭП и ФМ.

В главе представлен анализ изготовления и использования ФМ с оценкой роли метрики в материальных потоках на входе и выходе используемых технологий для их нормального функционирования. Следует добавить и то, что требуется большое число стадий, через которые должен пройти кремний прежде, чем он станет пригодным для целей солнечной энергетики. Поэтому, несмотря на то, что хлоридная технология является самой распространенной в производстве кремния, ее нельзя рассматривать в качестве экологически чистой и экономически выгодной.

Некоторые перспективные материалы трудно получить в необходимых для создания ФЭС количествах из-за ограниченности природных запасов исходного сырья и сложности его переработки. Отдельные методы улучшения энергетических и эксплуатационных характеристик ФЭП, например за счет создания сложных структур, плохо совместимы с возможностями организации их массового производства при низкой стоимости и т. д.

Для обеспечения выходного контроля ФЭП разработана методика и на базе ее установка измерения интегральных характеристик ФЭП, основанная на измерении его ВАХ и расчета из нее интегральных характеристик ФЭП. Установка позволяет за короткий промежуток времени (<1-2 с) определить напряжение холостого хода, ток короткого замыкания, КПД, последовательное сопротивление ФЭП. Уменьшение времени измерений необходимо для ис-

ключения 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.

Для измерения распределения фотоотклика ФЭП по его поверхности разработана методика и на ее основе установка измерения дифференциальных параметров ФЭП. Методика основана на измерении изменения фототока в цепи смещения ФЭП при локальной засветке оптическим излучением ($\lambda = 0.475$ мкм, 0.59 мкм, 0.66 мкм, 0.86 мкм, 0.94 мкм.) его лицевой поверхности при перемещении ФЭП по двум координатам относительно засветки. Разработанная установка дает возможность проводить измерения локальных спектральных характеристик с локальностью до 0.1 мм, что позволяет экспериментально разделить вклад в планарную неоднородность ФЭП на технологическую и подложечную составляющие.

Глава 5. Неразрушающий контроль технологических и конструкционных факторов ФЭП

В главе проводится исследования технологических и конструкционных факторов на эффективность ФЭП.

Последовательное сопротивление ФЭП является фактором, в значительной степени определяющим его качество. Величина последовательного сопротивления 0.1 Ом снижает отдаваемую в нагрузку мощность на ~18%, а сопротивление 0.6 Ом снижает отдаваемую в нагрузку мощность по сравнению со случаем нулевого последовательного сопротивления почти на 70%.

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

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

В эксперименте использовались более 8000 ФЭП, изготовленных в ФГУП «НИИПП» в период с 1996 по 2000 гг.

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».

Получена экспериментальная и рассчитана теоретическая зависимость КПД от расстояния между токосборниками на лицевой поверхности H . Полученные экспериментальные данные качественно соответствуют теоретически рассчитанным.

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

По сравнению с теоретической зависимостью более быстрый спад величины КПД экспериментальных образцов ФЭП при $H > 2$ мм обусловлен существенным возрастанием $R_{\text{п}}$ и увеличением влияния неоднородных процессов.

Для исследования влияния расстояния между токосборниками $2H$ на КПД ФЭП были изготовлены партии ФЭП с различными H от 3 до 0.5 мм с шагом 0.5 мм. По результатам проведенных исследований было выбрано оптимальное расстояние между токосборниками $2H = 3$ мм. Оптимизация конструкции ФЭП, а также выбор технологических параметров его изготовления (времени и температуры диффузии фосфора, времени и температуры вжигания проводящих паст) позволили увеличить КПД ФЭП лучших образцов с 12.5% до 15.4%.

Для проведения исследования влияния неоднородного распределения фотоотклика ФЭП на его КПД выбраны 100 ФЭП площадью 29 см^2 с КПД от 4% до 15.4%, а также ФЭП, изготовленные на подложках из поликристаллического кремния.

Как показали исследования, существует обратно пропорциональная зависимость КПД исследуемого ФЭП от удельного разброса D_{λ} . Установлено, что основной вклад в удельный разброс фотоотклика D_{λ} вносит базовая область ФЭП, прежде всего диффузионная длина электронов $L_{\text{п}}$.

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 $0.5 < \lambda < 1.05$ мкм и подтверждается проведенными экспериментальными измерениями коэффициента отражения на данных длинах волн.

Проведены измерения распределения спектрального отклика SR по площади ФЭПа на $\lambda = 0.475$ мкм, 0.59 мкм, 0.66 мкм, 0.86 мкм, 0.94 мкм для образца S7. Данный образец имеет характерное распределение фотоотклика 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, средним, пониженным фотооткликом. Спектраль-

ные характеристики данных областей представлены на рис. 4. На рис.4 также отображен спектральный отклик образца С18 (КПД 15.4%). Образец имеет практически однородное распределение фотоотклика в длинноволновой области, что характерно для образцов с КПД >12-13%.

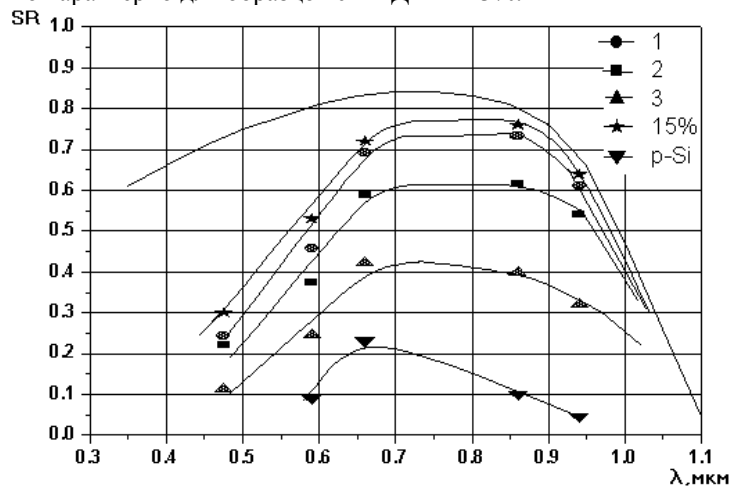


Рис. 4. Спектральные отклики для областей 1, 2, 3 образца S7; образца С18 и теоретически рассчитанный спектральный отклик

Распределение фотоотклика по пластине ФЭП, изготовленного на подложке из поликристаллического кремния представлено на рис. 5. КПД такой структуры измерить не представлялось возможным, вследствие малости фотоотклика (порядка 10 мА с 29 см²). Измерение распределения фотоотклика показало отсутствие фотоответа в середине образца, тогда как по краям образца он наблюдался (спектральный отклик для области 1 представлен на рис 4). Для более детального изучения образца исследуемого ФЭП были вырезаны области 1 и середина область 2. Установлено: 1 область обладает относительно неплохим КПД 1- 5%, в то время как ВАХ 2 области представляет собой ВАХ омического сопротивления.

На рис. 6 представлены зависимости распределения диффузионной длины носителей заряда по координате, измеренные СВЧ-методом в пластине кремния и оптическим методом в ФЭП, изготовленной из этой пластины. С помощью СВЧ-метода определялось время жизни ННЗ и затем производился его перерасчет в диффузионную длину. Сопоставление результатов измерений говорит о применимости СВЧ-метода для контроля параметров материала для изготовления ФЭП до процесса их изготовления.

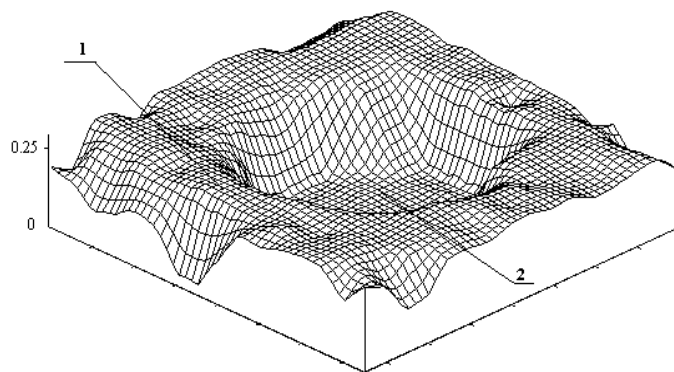


Рис. 5. Распределение спектрального отклика SR по площади ФЭП на поликристаллическом кремнии при $\lambda = 0.66\text{мкм}$

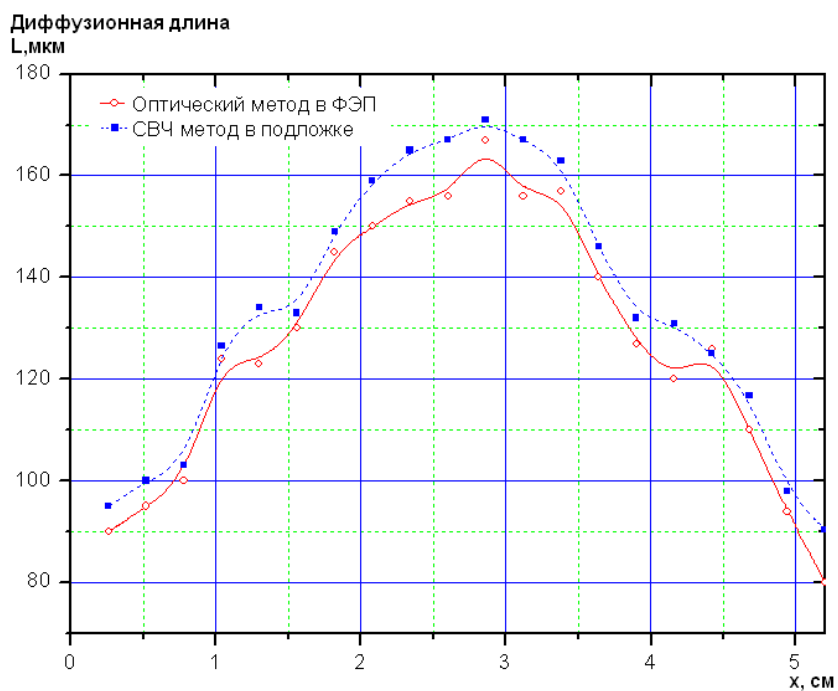


Рис. 6. Профиль диффузионной длины L для образца S7, измеренный СВЧ-методом до изготовления ФЭП и оптическим методом после его изготовления

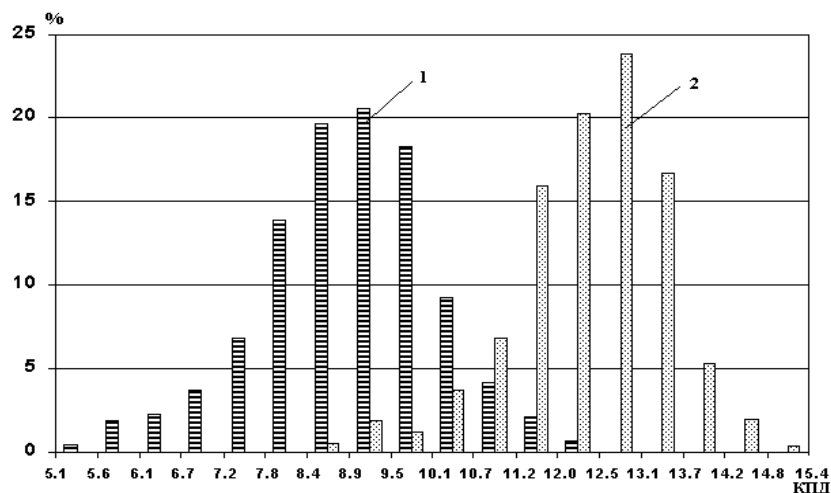


Рис. 7. Распределение ФЭП по КПД: 1 – на начало исследований 1996 г. (общее кол-во пластин 1876) и 2 – по результатам исследований 2000 г. (общее кол-во пластин 2294)

По результатам комплекса исследований было выбрано оптимальное расстояние между токосборниками $2H = 3$ мм. Оптимизация конструкции ФЭП, выбор технологических параметров его изготовления: времени и температуры диффузии фосфора, времени и температуры вжигания проводящих паст, а также разбраковка исходного материала по неоднородности, позволили увеличить КПД ФЭП лучших образцов с 12.5% до 15.4%. (рис. 7).

Сравнение распределения ФЭП по КПД изготовленных в ОАО «НИИПП» на начало исследований 1996 г. (общее кол-во пластин 1876) и по результатам исследований 2000 г. (общее кол-во пластин 2294) (рис. 7).

Глава 6. Анализ натуральных испытаний ФМ и статистической модели прогнозирования.

В главе приводится анализ натуральных испытаний ФМ в период с 1996-2003 гг. В этот период ФМ была подключена к одному из цифровых каналов ТОР-станции мониторинга атмосферных параметров и установлена на её крыше под углом 45 градусов к горизонту, ориентирована на расположение солнца в два часа дня. Контрольный параметр – напряжение на этой нагрузке. Ток солнечной батареи создал на нагрузке 5 Ом, при освещении 1000 Вт/м^2 (AM1.5) и температуре 25°C , напряжение около 4 В. Напряжение холостого хода исследуемой батареи при этих же условиях составляло 21 В. В результате проведенного мониторинга была собрана база данных, состоящая из следующих параметров: метеопараметры, газовый и аэрозольный состав атмосферы, ток КЗ ФМ.

Из 38 параметров, измеряемых TOR станцией и характеризующих состояние атмосферы по величине коэффициента корреляции $K_s \geq 0.3$, те, которые влияют на работу СБ в натуральных условиях. Это солнечная радиация ($K_s = 0.9$), влажность (-0.44), температура (0.3). В этом эксперименте ВАХ не измерялась.

Солнечная радиация. Преобразование энергии в ФМ основано на фото-вольтаическом эффекте в неоднородных полупроводниковых структурах при воздействии на них солнечного излучения. В отличие от других источников тока характеристики солнечного элемента зависят от количества падающего на его поверхность света. Например, набежавшее облако может снизить выходную мощность более чем на 50%. На выходные параметры ФМ будет влиять не только суммарная солнечная радиация, но и положение солнца на небосводе. Чем ближе положение солнца к зенитному положению, тем больший ток будет вырабатывать ФМ, но при этом произойдет и более сильный разогрев рабочей поверхности СБ.

Температура воздуха и скорость ветра. При работе ФМ без охлаждения в ней выделяется большое количество тепловой энергии и рабочая температура возрастает. Значительное повышение температуры влияет на концентрацию носителей заряда, а также на процесс поглощения света, в результате чего изменяются выходные параметры ФМ. Понятно, что рабочая температура ФМ будет зависеть от температуры окружающего воздуха. Следует отметить влияние скорости ветра, который может служить естественной конвекцией. Поэтому при разработке модели необходимо учитывать этот параметр.

Влажность и давление воздуха. Также на параметры ФМ влияет влажность воздуха, во-первых, потому, что одна из полос поглощения водяного пара лежит в спектральной области работы ФМ; во-вторых, влажность может влиять на процессы теплообмена между ФМ и окружающей средой.

Вольтамперная характеристика ФМ. Напряжение холостого хода, генерируемое одной ФМ, слегка изменяется при переходе от одной СБ к другой в одной партии, от одной фирмы изготовителя к другой. Эта величина не зависит от размеров ФМ. Иначе обстоит дело с током. Он зависит от интенсивности света и размера ФМ, под которым подразумевается площадь его поверхности.

Так как условия предыдущего эксперимента не позволили оценить влияния температуры, влажности, давления воздуха, а также скорости ветра на ВАХ ФМ, а именно на такие важные характеристики, как напряжение холостого хода, максимальная мощность, то для дальнейшего проведения исследований была разработана мобильная станция мониторинга работы ФМ. Она позволяет измерять вольтамперную характеристику ФМ, температуру рабочей поверхности ФМ, температуру, влажность и давление воздуха.

Мобильная станция мониторинга работы ФМ содержит эквивалент нагрузки, блок управления, средства для измерения параметров учитывающих

климатические факторы, а также, датчик температуры рабочей поверхности солнечной батареи, средства для измерения суммарной солнечной радиации. При этом эквивалент нагрузки и все упомянутые измерительные средства соединены с блоком управления, а эквивалент нагрузки имеет вход для соединения его с исследуемой солнечной батареей.

Были проведены испытания различных типов ФМ в различных регионах Сибири и Дальнего востока (табл. 1).

Таблица 1. Места проведения испытаний ФМ.

Тип ФМ	Объем выборки	Мощность, Вт	Время испытаний	Место	Контролируемые параметры	Тип конструкции
СБ-14-10	18408	10	1996-2003 г.г.	Томск (ИОА СО РАН)	Ток КЗ, 38 параметров атмосферы	Триплекс
СБ-200 «ОЛЬХОН»	253	200	Зима 2002 г.	Томск (НИИПП)	ВАХ, основные параметры атмосферы	Триплекс
ФСМ 1.5-3 «Арктика»	511	1.5	2006 г.	Томск, Новосибирск, Абакан	ВАХ, солнечная радиация, температура воздуха и СБ	Текстолит
ФСМ 50/14	2628	25	2005-2006 г.г.	Томск (ИОА СО РАН, НИИПП)	ВАХ, основные параметры атмосферы	Стекло/Пленка
ФСМ 25/14	1276	25	2005-2007 г.г.	Томск, Новосибирск, о. Байкал	ВАХ, основные параметры атмосферы	Стекло/Пленка
ФСМ 25/14	373	25	2007 г.	Владивосток	ВАХ, основные параметры атмосферы	Стекло/Пленка

В результате проведенных исследований с использованием мобильной станции была собрана база данных, состоящая из даты, времени, метеопараметров, температуры ФМ и вольтамперной характеристики. С учетом данных, собранных с 1996 г., объем базы данных составил более чем 20000 записей. База данных состоит из данных, полученных в разное время года и в различных географических местах. Такое количество данных достаточно для проведения статистического анализа и построения уравнений регрессии.

Первым этапом регрессионного анализа является определение вероятностного взаимного влияния параметров друг на друга. Для этого, используя множественный корреляционный анализ, были рассчитаны парные коэффи-

циенты корреляции, характеризующие тесноту связи между факторами, влияющими на работу ФМ. Затем, используя парные коэффициенты корреляции, был построен граф (рис. 8), где прямыми линиями обозначены значимые парные коэффициенты корреляции.

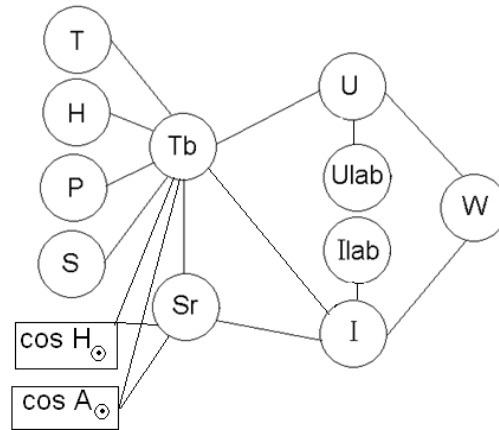


Рис. 8. Граф работы фотоэлектрических модулей:

T – температура воздуха; H – влажность воздуха; P – давление воздуха; S – скорость ветра; $\cos H_{\odot}$ – косинус угла наклона солнца над горизонтом, $\cos A_{\odot}$ – азимут солнца, Tb – температура фотоэлектрических модулей; Sr – солнечная радиация; Ulab, Ilab – напряжение и ток фотоэлектрических модулей, измеренные в лабораторных условиях; W – мощность, вырабатываемая фотоэлектрическими модулями

Известно, что максимальная вырабатываемая мощность ФМ равна

$$P_{\text{work}} = U_{\text{work}} \times I_{\text{work}}, \quad (8)$$

где U_{work} – рабочее напряжение; I_{work} – рабочий ток.

Обычно, при производстве и последующих лабораторных испытаниях ФМ в основном определяют ток короткого замыкания ($I_{\text{кз}}$) и напряжения холостого хода ($U_{\text{хх}}$). Известна формула, определяющая зависимость максимальной вырабатываемой мощности ФМ от тока короткого замыкания (КЗ) и напряжения холостого хода (ХХ).

$$P_{\text{work}} = K \times U_{\text{хх}} \times I_{\text{кз}}, \quad (9)$$

где K – коэффициент заполнения ВАХ.

Тогда можно записать:

$$U_{\text{work}} \sim K_{\text{хх}} \times U_{\text{хх}}, \quad (10)$$

$$I_{\text{work}} \sim K_{\text{кз}} \times I_{\text{кз}}, \quad (11)$$

где K_{xx} и $K_{кз}$ – коэффициенты, учитывающие влияние климатических, аппаратных и технологических факторов.

В свою очередь, напряжение холостого хода и ток короткого замыкания, измеренные в лабораторных условиях, будут отличаться от реальных в силу воздействия климатических особенностей того или иного региона.

Используя базу данных, собранную в период с 1996 по 2007 г., можно применить статистические и вероятностные методы анализа для построения уравнений регрессий.

Для того чтобы рассчитать максимальную вырабатываемую мощность ФМ, необходимо учесть климатические факторы, которые будут влиять на напряжение и ток ФМ. Такую задачу можно решить, используя многофакторный анализ, принцип которого заключается в построении такого уравнения плоскости в $(p+1)$ -мерном (p – число факторов) пространстве, отклонение результатов наблюдений y_i от которой были бы минимальны. Или другими словами, следует вычислить значения коэффициентов b_0, b_j в линейном полиноме:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n x_i \cdot b_i, \quad (12)$$

где y – функция отклика; x – факторы, влияющие на функция отклика.

Для статистических методов построения эмпирических зависимостей очень важно, чтобы результаты наблюдений подчинялись нормальному закону распределения. Поэтому необходимо было проверить на нормальность распределения следующие величины:

- напряжение холостого хода;
- ток короткого замыкания;
- разницу между температурой воздуха и температурой ФМ.

В ходе анализа данных было показано, что эти величины имеют нормальный закон распределения.

Многофакторного регрессионный анализ позволил получить нижеследующие уравнения.

Температура рабочей поверхности:

$$T_{\delta i} = T_{\epsilon \delta i} + 0.81 \cdot (T_{\alpha \delta i} - T_{\epsilon \delta i}) - 0.06 \text{HUM} - 0.01 \cdot \text{Press} - 0.24 \cdot \text{SPD} + 0.06 (SR_{\delta i} - SR_{\epsilon \delta i}), \quad (13)$$

где $T_{\text{лаб фм}}$ – температура ФМ, измеренная в лабораторных условиях; $T_{\text{возд}}$ – температура воздуха; $T_{\text{лаб возд}}$ – температура воздуха измеренная в лабораторных условиях; HUM – влажность воздуха, %; Press – давление воздуха, мм рт ст; SPD – скорость ветра, м/с; $SR_{\text{лаб}}$ – суммарная солнечная радиация, установленная на имитаторе в лабораторных условиях (обычно 1000 Вт/м²).

Напряжение холостого хода ФМ:

$$U_{xx} = U_{xx \text{ лаб}} - 0.1 \cdot (T_{\text{ФМ}} - T_{\text{лаб ФМ}}), \quad (14)$$

где $U_{xx \text{ лаб}}$ – напряжение холостого хода ФМ, измеренное в лабораторных условиях.

Рабочее напряжение ФМ:

$$U_{\text{раб}} = 0.728 \cdot U_{xx}. \quad (15)$$

Ток короткого замыкания ФМ:

$$I_{\text{кз}} = I_{\text{кз лаб}} + 0.01 \cdot (T_{\text{СБ}} - T_{\text{лаб ФМ}}) - 0.004 \cdot \text{HUM} + 0.005 \cdot (SR_{\text{ФМ}} - SR_{\text{лаб}}), \quad (16)$$

где $I_{\text{кз лаб}}$ – ток короткого замыкания, измеренный в лабораторных условиях.

Рабочий ток ФМ:

$$I_{\text{раб}} = 0.763 \cdot I_{\text{кз}}. \quad (17)$$

Расчет максимальной мощности, отдаваемой в нагрузку, производится по формуле (9) Результаты расчета мощности по эмпирической модели представлены на рис. 9 в виде хода расчетной и измеренной мощности ФМ.

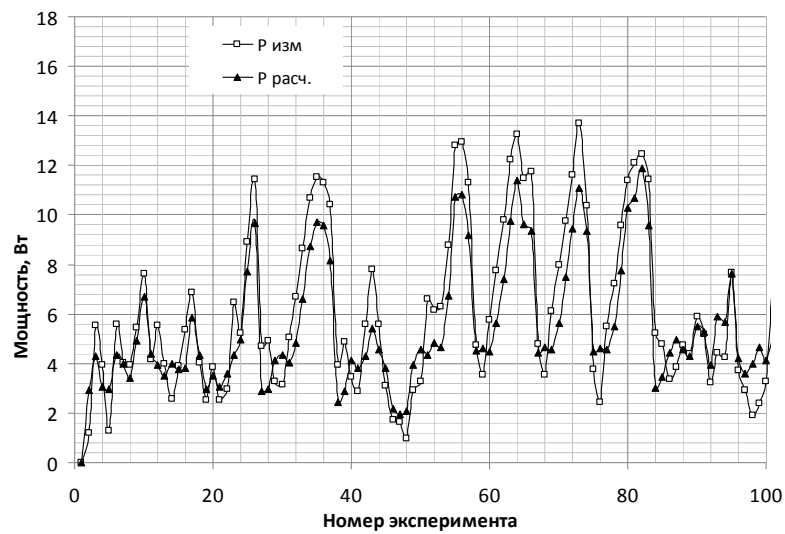


Рис. 9. Ход максимальной мощности

Для сравнения регрессионных уравнений с другими моделями были выбраны результаты измерений одного произвольно определенного дня. В этот день отсутствовала облачность, средняя температура составляла +11 °С. Были

проведены расчеты выработанной энергии ФМ по различным моделям, включая предлагаемую. Также на график нанесена произведенная энергия ФМ, которая измерялась мобильной станцией. Результаты представлены на рис. 10.

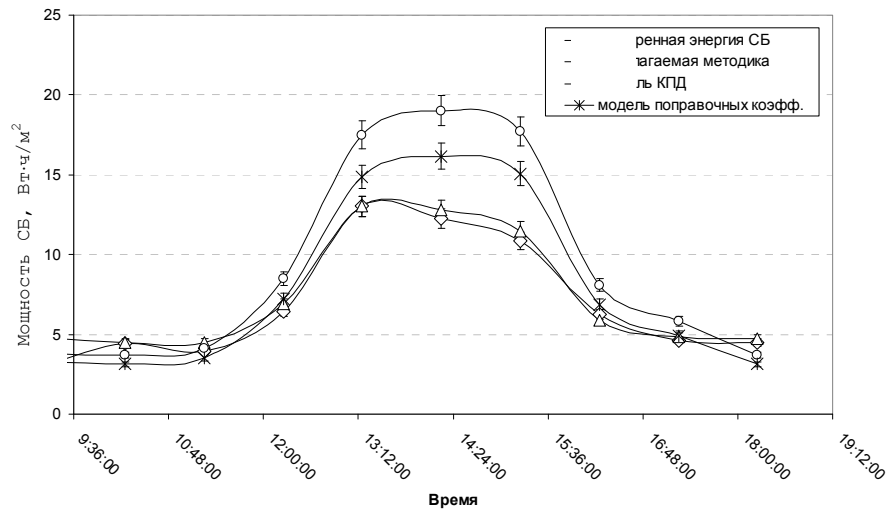


Рис. 10. Проверка моделей расчета вырабатываемой мощности

Видно, что расчетная кривая хорошо совпадает с измеренной. Разработанные уравнения регрессии обеспечивают погрешность расчета суммарной выработанной энергии не хуже 5%. Другие модели показали неудовлетворительные результаты.

Так, ошибка оценки суммарной мощности для модели КПД составила 32%, а для модели поправочных коэффициентов 15%.

Таким образом, задача построения статистической модели вырабатываемой энергии ФМ выполнена. Для использования этой модели при проектировании ФЭС необходимо усовершенствовать методику определения параметров ФМ в лабораторных условиях. Обычно измерения напряжения ХХ и тока КЗ производятся за небольшой отрезок времени – освещают ФМ, измеряют напряжение ХХ и ток КЗ, после чего испытания прекращаются. Предлагается измерять ВАХ СВ до тех пор, пока температура ФМ не примет максимальное значение. Это позволяет определить температуру ФМ, измеренную в лабораторных условиях, которая используется в уравнении регрессии (13). Кроме того, такой метод измерения позволяет уточнить температурные коэффициенты ФМ. Исходя из вышесказанного, предлагается усовершенствованная методика прогнозирования:

1. В лабораторных условиях при стандартных значениях температуры воздуха (+25 °С) и суммарной солнечной радиации (1000 Вт/м²) производятся измерения напряжения холостого хода, тока короткого замыкания, температуры ФМ, коэффициента полезного действия. Испытания продолжаются до тех пор, пока температура ФМ не примет максимальное значение.

2. Производится анализ метеоусловий, в которых будет работать ФМ. Для этого из метеорологических справочников выбирают среднемесячные, среднесуточные значения температуры, влажности, давления воздуха, суммарную солнечную радиацию, количество солнечных дней.

3. Рассчитывается приходящая на ФМ суммарная солнечная радиация из условий местоположения ФМ, её угла наклона относительно горизонта, а также положения солнца на небосводе.

4. Используя полученные регрессионные уравнения, рассчитывается температура поверхности ФМ, напряжение холостого хода, ток короткого замыкания, рабочий ток и рабочее напряжение, а затем максимальная мощность, отдаваемая в нагрузку.

5. По полученным значениям делается вывод о порядке использования ФМ в данном регионе.

Используя данные суммарной солнечной радиации и метеопараметров для г. Томска, по разным моделям было рассчитано количество энергии, которое выработала ФМ в 2005 г. рис. 11 и представлены реально измеренные данные.

Из рис. 11 видно, что предлагаемая в этой работе модель наилучшим образом прогнозирует вырабатываемую энергию ФМ в различные месяцы года. Погрешность прогноза не превысила 5 %. Суммарная мощность в период с марта по октябрь составила 160 кВт ч/м².

По результатам диссертационной работы решена крупная научно-хозяйственная задача в рамках которой создан метрологический комплекс позволяющий проводить сквозной неразрушающий контроль на всех этапах производства и эксплуатации ФЭС. На рис. 12 представлены этапы производства ФЭС и отмечены основные результаты проведенной работы. Метрологический комплекс удостоен диплома I степени на первом открытом конкурсе инновационных проектов Сибири и Дальнего Востока в номинации «Энергетика и энергосбережение» (направление: «Перспективный коммерческий проект»).

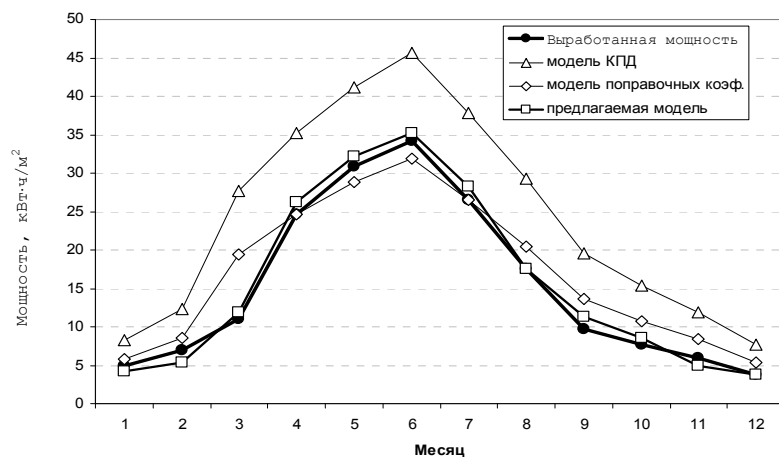


Рис. 11. Сравнение моделей



Рис. 12. Метрологический комплекс сквозного неразрушающего контроля на всех этапах производства и эксплуатации ФЭС

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработан комплекс методов и аппаратуры неразрушающего технологического и эксплуатационного контроля при производстве и испытаниях фотоэлектрических преобразователей, модулей и систем. Комплекс охватывает все этапы производства: от входного контроля сырья (кремния «солнечного качества») до выходного контроля ФЭП и ФМ и эксплуатационного контроля ФМ.

2. Разработан автодинный датчик для измерения времени жизни неравновесных носителей заряда СВЧ-методом. Результаты измерений показали, что с помощью предлагаемой установки возможно измерять время жизни неравновесных носителей заряда в мультикремнии в диапазоне удельных сопротивлений: 1 до 10 Ом-см.

3. Проведено обоснование применимости СВЧ-метода измерения удельного сопротивления и времени жизни в структурно неоднородном кремнии и разработаны технические решения, позволяющие проводить их измерения.

4. На основе разработанных датчиков в ОАО «НИИПП» сконструирован измерительно-вычислительный комплекс для бесконтактного измерения распределения удельного сопротивления по поверхности полупроводниковых пластин.

5. Разработаны автоматизированные комплексы измерения интегральных и локальных характеристик ФЭП, которые включены в технологический процесс изготовления ФЭП в ОАО «НИИПП».

6. С использованием комплекса неразрушающего входного, технологического и эксплуатационного контроля проведены исследования по оптимизации конструкции ФЭП, выбор технологических параметров его изготовления, а также разбраковка исходного материала по неоднородности, что позволило увеличить КПД ФЭП лучших образцов с 12.5% до 15.4%.

7. Проведен анализ долговременных испытаний ФМ, в результате которых были определены комплекс доминирующих факторов, влияющих на работу ФМ в реальных условиях, на основе которого спроектирована и изготовлена мобильная станция мониторинга работы ФМ. Мобильная станция измеряет основные характеристики ФМ совместно с температурой, влажностью, давлением воздуха, скоростью ветра, суммарной солнечной радиацией. Патент №75516.

8. С использованием мобильной станции проведены испытания кремниевых ФМ в различных регионах Сибири и Дальнего Востока. Собрана база данных, состоящая из метеопараметров и параметров ФМ.

9. Предложена методика прогнозирования вырабатываемой мощности ФМ.

10. Разработана статистическая модель работы ФМ, с помощью которой по измеренным в лабораторных условиях характеристикам ФМ и справоч-

ным метеоданным можно оценить вырабатываемую мощность с погрешностью не более 5%.

11. На примере г. Томска спрогнозированы и определены наиболее оптимальные режимы работы ФМ. Показано, что ФМ в течение года способен собрать $160 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$. Эти данные позволяют проектировать различные автономные устройства с питанием от ФМ.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Юрченко А.В., Юрченко В.И., Воторопин С.Д. Автодинные датчики в измерительной технике. – Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2009. – 128 с. (ISBN 5-98298-517-0).
2. Юрченко А.В., Лапатин Л.Г., Новиков А.Н. Исследование влияния неоднородности характеристик исходного материала кремния на параметры фотоэлектрических преобразователей //Известия Томского политехнического университета, 2009. Т. 314, № 2. – С. 145–149.
3. Юрченко А.В., Волгин А.В., Козлов А.В. Статистическая модель кремниевых солнечных батарей, работающих под воздействием природных и аппаратных //Известия Томского политехнического университета, 2009. – Т. 314, № 4. С. 142-148.
4. Юрченко А.В., Козлов А.В., Ковалевский В.К. Результаты климатических испытаний солнечной батареи в натуральных условиях г. Томска// Светотехника. 2005. – №1. – С. 37-41.
5. Юрченко А.В., Белан Б.Д., Козлов А.В., Пестунов Д.А. Влияние параметров атмосферы на энергетические характеристики кремниевой солнечной батареи// Оптика атмосферы и океана. 2005. – Т.18.- №8. – С. 731-734.
6. Юрченко А.В., Козлов А.В., Мобильная станция мониторинга работы солнечных батарей в натуральных условиях.// Датчик и системы , 2006. – №9. – С. 64-67.
7. Юрченко А.В. Результаты натуральных испытаний кремниевой солнечной батареи в климатических условиях г.Томск //Известия международной академии наук, 2004. – Т.28. №2. – С1 45-150.
8. Юрченко А.В., Бакин Н.Н., Ковалевский В.К., Плотников А.П., Ушеренко А.А. Результаты климатических испытаний солнечной батареи в натуральных условиях г.Томска// Оптика атмосферы и океана,1998. – Т.11. №12. – С. 1337-1340.
9. Юрченко А.В., Саврасов Ф.В., Юрченко В.И.. Реальная стоимость энергии – от ресурсов до потребителя. //Известия Том. политехн. ун-та, 2009. – Т. 314, № 3. – С. 43–46.

10. Yurchenko A.V. G.E. Lapatin High-express microwave frequencies-methods of measuring the distribution of specific resistance and existence of multisilicon Proceedings of 23st European PV Solar Energy Conference and Exhibition. Valencia, 1-5 September 2008. p. 1840-1843 (ISBN 3-936338-24-8).
11. Юрченко А.В. Эффективность планарно-неоднородных фотоэлектрических преобразователей// Электронная промышленность. 2002. - №2-3. - С. 183-185.
12. Юрченко А.В., Лапатин Л.Г. Бесконтактный локальный метод измерения удельного сопротивления, времени жизни неравновесных носителей заряда и определения типа проводимости в поликристаллическом кремнии. Том. политехн. ун-т. – Томск, 2007. – 59 с.: ил.-32 Библиогр.: 29 назв.- Рус.- Деп. в ВИНТИ 13.12.2007 № 1169-В2007.- 59 с.
13. Юрченко А.В., Козлов А.В., Пестунов Д.А. Мобильная станция мониторинга работы солнечной батареи. Патент на полезную модель №75516. Оpubл. 10.08.2008. Бюл. № 22.
14. Yurchenko A.V., Kozlov A.V. The results of the long-term environmental tests of silicon solar batteries in Siberia.// Proceedings of 21st European PV Solar Energy Conference and Exhibition, Dresden 4-8 September 2006. – P.2436-2439 (ISBN 3-936338-20-5).
15. Yurchenko A.V., Kozlov A.V. The long-term prediction of silicon solar batteries functioning for any geographical region // Proceedings of 22st European PV Solar Energy Conference and Exhibition, Milan 3-7 September 2007. P. 3019–3022 (ISBN 3-936338-22-1).
16. Yurchenko A.V., Kozlov A.V. The results of the long-term environmental tests of silicon solar batteries in Siberia Modern Techniques and Technologies // Proceedings of 13th International Scientific and Practical Conference of students, Post-graduates and Young Scientists. Proceedings 26-30 March, 2007, Tomsk, Russia. P. 20-22.
17. Yurchenko A., Kozlov A, Volkov A. Climatic and hardware factors influencing the output performances of silicon modules in Siberia and the far east conditions // Proceedings of 23st European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia, Spain, 4-8 September 2008. P. 2989–2991. (ISBN 3-936338-24-8).
18. Yurchenko A.V., Kozlov A.V. The forecasting marketing capability of the solar batteries in the Siberian market// Proceedings of 21st European PV Solar Energy Conference and Exhibition, Dresden 4-8 September 2006. P. 3238-3239 (ISBN 3-936338-20-5).
19. Юрченко А.В., Козлов А.В., Белан Б.Д. Результаты пятилетних климатических испытаний солнечной батареи в натуральных условиях г.Томска // 2003 Материалы 2 Всероссийской конференции молодых ученых «Материаловедение, технологии и экология в третьем тысячелетии». С. 284-286.

20. Юрченко А.В., Козлов А.В., Ковалевский В.К. Результаты климатических испытаний солнечной батареи в натуральных условиях г.Томска // Возобновляемая энергетика. Состояние проблемы перспективы Международная конференция. СПб., 4-6 ноября 2003 г. СПб., 2003. – С. 275-281.
21. Козлов А.В, Юрченко А.В., Юрченко В.И. Солнечные батареи как объект инновационного развития изделий двойного назначения.// Материалы III Международного технологического конгресса «Военная техника, вооружение и технологии двойного применения». Омск, 7-10 июня 2005 г. Омск, 2005. – С. 331-332.
22. Козлов А.В., Юрченко А.В. Проблемы мониторинга работы солнечных батарей в условиях Сибири и Дальнего Востока.// Материалы Международного семинара «Альтернативные источники энергии и проблемы энергосбережения. СПб, 30 мая –1 июня, 2005 г. СПб, 2005. С. 64-67.
23. Козлов А.В., Юрченко А.В. Экологические аспекты использования солнечных батарей в Сибири. // Материалы Российской конференции «Демидовские чтения» Томск 2006. С. 234-238
24. Юрченко А.В., Юрченко В.И. Мониторинг изменения и анализ роли малых долей веществ в производстве и работе СБ //Полифункциональные химические материалы и технологии. Сборник статей. Т.2. Томск, 2007 /Под. ред. Ю.Г. Слижова. С. 321-323.
25. Юрченко А.В., Ушеренко А.А. Планарная неоднородность фоточувствительности фотоэлектрических преобразователей // Электронная промышленность. 1998 г. – № 1-2. – С. 17-21.
26. Юрченко А.В., Юрченко В.И. Физические основы метрологии дефектов в полупроводниковых фотоматериалах и тестирование сложных соединений на основе GaAs. //Материалы VII Российской конференции «GaAs-99». Томск. ТГУ, 1999.
27. Юрченко А.В., Ушеренко А.А. Модель неоднородного фотоэлектрического преобразователя // Материалы VII Российской конференции «GaAs-99». Томск. ТГУ, 1999.
28. Юрченко А.В. Юрченко В.И., Воторопин С.Д. Установка для визуализации и определения места расположения дефектов в солнечных элементах на основе КВЧ автодинных датчиков 5-мм диапазона //Методы и средства измерения физических величин: Тезисы докладов научно-технической конференции. – Н.Новгород, 1998. – Т.5.
29. Юрченко А.В., Чихман А.В., Мызгин В.С., Воторопин С.Д., Юрченко В.И., Крылов С.В Автоматизированная установка на основе автодинных датчиков КВЧ-диапазона для контроля материалов //Электронная промышленность – № 1-2, 1998.
30. Юрченко А.В., Юрченко В.И., Воторопин С.Д. Установка для визуализации и определения мест расположения дефектов в плоских материалах

- на основе КВЧ автодинных датчиков 5-мм диапазона //Труды VII Крымской Международной конференции «КрыМиКо 98». Севастополь, 1998.
31. 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. – Новосибирск, 2000.
 32. Юрченко А.В., Бакин Н.Н., Зыков В.М., Юнда Н.Т. Радиационная деградация ФЭП при воздействии потока высокоэнергетических электронов //Материалы VIII Российской конференции «Арсенид галлия и полупроводниковые соединения группы III-V» GaAs-2002. – Томск, ТГУ, 2002. – С. 368.
 33. Юрченко А.В., Ковалевский В.К., Плотников А.П. Климатические испытания солнечных батарей //Электронная промышленность. №2-3, 2002. – С. 189-192.
 34. Юрченко А.В., Юрченко В.И., Использование синхротронного излучения для изготовления и испытания солнечных элементов //Российская конференция по использованию синхротронного излучения. СИ-2002. – Новосибирск, 2002.– С. 131.
 35. Юрченко А.В., Юрченко В.И. Автономные системы на основе СЭУ – повышение энергетической безопасности индивидуальных пользователей //Материалы докладов VIII Всероссийской научно-практической конференции «Энергия: Экология, Надежность, Безопасность». – Т. 1. ТПУ. – Томск, 2002. – С. 146-149.
 36. Юрченко А.В., Бакин Н.Н., Шапошников А.Г., Пономарев А.А., Лисицын В.М., Юрченко В.И. Эффективность СЭУ состояние и перспективы развития //Материалы докладов VIII Всероссийской научно-практической конференции «Энергия: Экология, Надежность, Безопасность». – Т. 2. ТПУ. – Томск, 2002. – С. 61-63.
 37. Юрченко А.В., Козлов А.В., Юрченко В.И. Технология модульных интегрированных систем как путь повышения ресурса надежности //III международный технологический конгресс «Военная техника, вооружение и технологии двойного применения». Омск, 7-10 июня 2005 г. Материалы конгресса. Ч.1. – Омск, 2005. – С. 195-196.
 38. Юрченко А.В. Экологические аспекты технологии производства и использования солнечных батарей //Материалы международного семинара «Альтернативные источники энергии и проблемы энергосбережения. СПб., 30 мая – 1 июня, 2005 г. – СПб., 2005. – С. 31-33.
 39. Юрченко А.В., Козлов А.В. Проблемы мониторинга работы солнечных батарей в условиях Сибири и Дальнего Востока //Материалы международного семинара «Альтернативные источники энергии и проблемы энергосбережения. СПб., 30 мая – 1 июня 2005 г. – СПб., 2005. – С. 64-67.

40. Юрченко А.В., Юрченко В.И. Экологические аспекты производства и использования солнечных батарей //Материалы конференции GaAs-2006. Томск, 3-5 октября, 2006 г. – Томск, 2006. – С. 476-478.