Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук
Центр Физики Наногетероструктур
Лаборатория «Фотоэлектрических преобразователей»

Прудченко Ксения Константиновна

«Исследования концентраторного гибридного солнечного элемента на основе GaInP/Ga(In)As/Ge и гетероперехоного HJT кремниевого солнечных элементов»

Специальность 1.3.11 – физика полупроводников

Научный доклад

Санкт-Петербург
2024г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук.

Научный руководитель: Андреев Вячеслав Михайлович, доктор техн.наук, г.н.с. лаборатории «Фотоэлектрических преобразователей», член корр. РАН

Рецензенты:

Лунин Леонид Сергеевич

доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией ФГБУН «ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ЮЖНЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РАН»

Пушный Борис Васильевич

Кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, ФГБУН ФТИ ИМ. А.Ф. ИОФФЕ

СОДЕРЖАНИЕ

	Введение……	4
	Основная часть…….	10
1.	Глава 1. Современное состояние космической солнечной энергетики…….	10
1.1	Концентраторные GaInP/Ga(In)As/Ge солнечные элементы и электрогенерирующие линейки на основе GaInP/Ga(In)As/Ge СЭ….....	10
1.2	Гибридные солнечные элементы для фотоэлектрического концентраторного модуля……...	11
2.	Глава 2. Методы исследования и экспериментальные образцы……..	13
3.	Исследования гетероструктурных кремниевых солнечных элементов в качестве фотоактивного теплоотводящего основания……..	21
3.1	Исследование радиационной стойкости кремниевых гетероструктурных солнечных элементов…….	21
3.2	Исследование температурной стабильности кремниевых гетероструктурных солнечных элементов…….	29
3.3	Исследование влияния термоциклирования на характеристики кремниевых гетероструктурных солнечных элементов……	32
4.	Исследования фотоэлектрической концентраторной системы с гибридным солнечным элементом на основе трёхпереходных GaInP/GaAs/Ge и HJT солнечных элементов……	34
	Заключение……...	40
	Список использованных источников……	43

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность

Рост интереса к освоению космического пространства и новые открывающиеся при этом возможности требуют быстрого и эффективного решения поставленных технических задач. Одной из таких важнейших задач является энергоснабжение космических аппаратов (КА). Обеспечение современных КА электрической энергией главным образом осуществляется за счет фотоэлектрического преобразования солнечного света. Для высокоэффективных фотоэлектрических систем, выдерживающих условия космической среды, эталоном принято считать коммерчески доступные дорогие многопереходные солнечные элементы (СЭ) на основе соединений A3B5 - GaInP/GaAs/Ge. Солнечные батареи (СБ) на основе материалов GaInP/GaAs/Ge способны работать в течение 15 лет на геостационарной орбите с достаточно высокой эффективностью [1-2]. Для дальнейшего улучшения эксплуатационных характеристик и срока службы СБ необходим поиск новых решений. Одним из таких решений является создание СБ с концентраторами солнечного излучения (СИ) на основе гибридных СЭ (ГСЭ) [3-6]. ГСЭ разрабатываемые в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе представляют собой концентраторные монолитные трёхпереходные GaInP/Ga(In)As/Ge СЭ, собранные в электрогенерирующие линейки (ЭГЛ) и смонтированные на фотоактивное теплоотводящее кремниевое основание (ФТО). ГСЭ обеспечивают в фотоэлектрическом модуле (ФЭМ) при кратности концентрации СИ ≤ 10 Солнц и СБ на их основе КПД более 28%, удельную электрическую мощность более 390 W/m^2, снижение тепловых потерь и удельной массы фотогенерирующей части до 1 kg/m^3. СБ с ГСЭ имеет дополнительный источник электрической энергии за счёт кремниевых СЭ, интегрированных в ТО, без увеличения массы и размеров в широком диапазоне угла разориентации. Такая конструкция СБ позволяет увеличить срок службы на космических аппаратах, например на геостационарных орбитах, более 20 лет.

За последние десятилетия существенный прогресс в развитии технологий кремниевых СЭ позволил повысить их КПД ≥ 26% (AM1.5). Такой прогресс в наземной энергетике дает толчок к исследованиям и возможному применению кремниевых СЭ в низкоорбитальной области космической энергетики. Оценки предсказывают их возможную эффективность ≤ 26% при преобразовании излучения со спектральным составом AM0 [7]. Таким образом, кристаллические кремниевые СЭ с усовершенствуемой технологией являются альтернативой традиционным космическим кремниевым СЭ типа «BSF» (Back Surface Field) [8-9]. К тому же классические кремниевые СЭ обладают существенными массогабаритными параметрами, что значительно повышает стоимость вывода КА на рабочую орбиту, а также характеризуются слабой радиационной стойкостью. Существенным потенциалом обладают кремниевые СЭ с гетеропереходом (heterojunction technology solar cells) — HJT СЭ [10-11]. Исследования по деградации HJT СЭ при облучении электронами и протонами, их температурной стабильности и влиянию термоциклирования на сегодняшний день, являются актуальной научно-технологической задачей.

Научная новизна:

В работе впервые исследованы гибридные солнечные элементы на основе GaInP/Ga(In)As/Ge СЭ и кремниевых HJT СЭ. В работе предложено заменить кремниевые СЭ с стандартной диффузионной технологией, являющиеся частью фотоактивного теплоотводящего основания в ГСЭ, на фотоактивные ТО на основе HJT СЭ. Это позволит улучшить эксплуатационные характеристики и параметры концентраторного субмодуля, основы концентраторных солнечных батарей (СБ) нового поколения, а именно повысить КПД, уменьшить массогабаритные параметры и стоимость, увеличить резистивность к радиационному облучению, сохранив широкий диапазон угла разориентации. Использование ГСЭ позволит упростить конструкцию субмодуля, так как HJT СЭ в рассматриваемой оптической системе является самостоятельным теплоотводящим основанием для ЭГЛ и

одновременно эффективно преобразовывает диффузное (неконцентрированное, рассеянное линзовым концентратором и отражённое от ЭГЛ) СИ в электричество. Такое решение является новым и нигде более не встречается.

Таким образом, **объектом** исследования является ГСЭ в фотоэлектрической системе космического концентраторного субмодуля, составными частями которого являются сдвоенная линза Френеля, ЭГЛ из GaInP/Ga(In)As/Ge СЭ и бифункциональные HJT СЭ, отвечающие за теплоотвод и преобразование рассеянного СИ. **Предметом** исследования являются характеристики ГСЭ в составе субмодуля, и его составных частей. **Целью** исследования является определение возможности обеспечения КА концентраторными СБ с повышенным КПД и сроком службы, сниженными массогабаритными параметрами, стоимостью и расширенным углом разориентации. Для этого необходимо провести исследования фотовольтаических характеристик ГСЭ, фотоэлектрических и разориентационных характеристик концентраторного субмодуля и его составных частей. Провести исследования и анализ радиационной стойкости, температурной стабильности и влияния термоциклирования на HJT СЭ.

Основные результаты и положения, выносимые на защиту:

1. Впервые разработаны и исследованы фотоэлектрические характеристики космических гибридных солнечных элементов на основе GaInP/Ga(In)As/Ge и гетеропереходных кремниевых СЭ при кратности концентрации СИ < 10 Солнц. Гибридный солнечный элемент при нулевом угле разориентации обеспечивает электрическую мощность до 400 W/m^2 GaInP/Ga(In)As/Ge электрогенерирующими линейками и ≥ 25 W/m^2 фотоактивным HJT Si теплоотводящим основанием.
2. Выполнены исследования радиационной стойкости гетероструктурных кремниевых солнечных элементов при облучении 1 MeV электронами в диапазоне флюенсов до $1 \cdot 10^{15}$ cm^{-2}. Для структур с p-Si типом базы

снижение внешней квантовой эффективности на ≤ 24% преимущественно в длинноволновом крае спектральной чувствительности приводит к уменьшению тока короткого замыкания на ≤ 19%. Рост тока «насыщения» диффузионного механизма токопрохождения на два порядка в структурах солнечных элементов p-типа вызывает снижение вырабатываемой электрической мощности и КПД на ≤ 33%.

3. Солнечные элементы со структурами *n-α-Si:H/c-p(Ga)/p-a-Si:H* и *n-μc-Si:H/c-p(Ga)/p-a-Si:H* обладают наибольшей радиационной стойкостью при облучении 1 MeV электронами флюенсом до $1 \cdot 10^{15}$ cm^{-2}. Коэффициент деградации для данных гетероструктурных кремниевых солнечных элементов $\boldsymbol{K}_L$ = (4 - 10)$\cdot$ 10^{-12} меньше на порядок, чем у классических космических кремниевых солнечных элементов ($\boldsymbol{K}_L=5 \cdot 10^{-11}$) при облучении 1МэВ электронами в диапазоне флюенсов (2.5 - 10)$\cdot 10^{14}$ cm^{-2}.
4. Температурные коэффициенты тока короткого замыкания, напряжения холостого хода и КПД солнечных элементов структур *n-α-Si:H/c-p(Ga)/p-a-Si:H* и *n-μc-Si:H/c-p(Ga)/p-a-Si:H* ниже на 20%, чем у классических космических кремниевых *p*-c-Si солнечных элементов.
5. Термоциклирование в диапазоне температур -60°C ÷ 100°C *n-α-Si:H/c-p(Ga)/p-a-Si:H* и *n-μc-Si:H/c-p(Ga)/p-a-Si:H* солнечных элементов ведёт к изменению FF на ≤ 3 % и КПД на ≤ 10 %.
6. Применение гетероструктурных кремниевых солнечных элементов в гибридных солнечных элементах в составе космического фотоэлектрического концентраторного модуля позволяет сохранить высокие значения тока короткого замыкания ≤ 1.6 А в широком диапазоне угловой разориентации ± 25^0.

Методология:

В работе использовались следующие методы исследования: измерения и расчёт темновых и световых (нагрузочных) ВАХ при облучении

коллимированным СИ спектра AM0, 1367 W/m^2 до и после облучения 1 MeV электронами флюенсом до 1 10^{15} cm^2 в температурном диапазоне -100°C ÷ +100°C. Анализ темновых ВАХ трёхэкспоненциальным методом (Есаки, Саа-Нойс-Шокли, Шокли), спектральные измерения внешней квантовой эффективности солнечных элементов, математическое моделирование и аналитические расчёты полученных экспериментальных зависимостей фотоэлектрических характеристик, определение коэффициента деградации HJT СЭ на основе *n-α-Si:H/c-p(Ga)/p-a-Si:H* и *n-μc-Si:H/c-p(Ga)/p-a-Si:H* структур.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработаны концентраторные гибридные солнечные элементы на основе GaInP/Ga(In)As/Ge и гетеропереходного HJT Si солнечных элементов. Исследованы их фотоэлектрические характеристики в составе концентраторного фотоэлектрического модуля - основы СБ нового поколения.
2. Найдены коэффициент деградации и температурные коэффициенты параметров гетероструктурных кремниевых солнечных элементов до и после облучения 1 MeV электронами флюенсами $\leq 1 \cdot 10^{15}$ cm^{-2}. Проведённая оценка радиационной резистивности, температурной стабильности и стойкости к термоциклированию высокоэффективных гетероструктурных кремниевых солнечных элементов показала перспективы и возможность их применения в космическом пространстве.
3. Показана применимость концентраторного фотоэлектрического модуля с гибридными солнечными элементами в концентраторных космических СБ и в космических энергетических установках с концентрированием солнечного излучения.

Апробация:

Результаты работы изложены на российских и международных конференциях: "Физико-химические проблемы возобновляемой энергетики",

21-23 ноября 2022 г., Санкт Петербург; XIII Международная конференция «Аморфные и микрокристаллические полупроводники», Санкт-Петербург, 3-5 июля 2023 г.; V научно-техническая конференция «Разработка, производство, испытания и эксплуатация космических аппаратов и систем» на базе АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва (Железногорск), 9–10 октября 2023 г.; Российский форум МИКРОЭЛЕКТРОНИКА 2023, Москва, 9-14 октября 2023 г.

Основные результаты работы изложены в 3х статьях рецензируемых журналов и в 5 докладах на российских и международных конференциях.

Структура работы:

Работа состоит из введения, основной части из четырёх глав, заключения и списка используемых источников. Материал изложен на 49 стр., содержит 24 рисунка, 7 таблиц и 28 наименований литературных источников.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

ГЛАВА 1. Современное состояние космической солнечной энергетики.

В **первой главе** описывается становление и современное состояние солнечной энергетики, в частности, космической солнечной энергетики. Важнейшими шагами в развитии солнечной энергетики стали разработка многопереходных (позволяющих повысить КПД в разы, за счет выработки и сложения напряжений, полученных от каждого отдельно взятого каскада) и переход к концентраторным солнечным фотоэлементам. Речь идёт о переходе к преобразованию предварительно сконцентрированного СИ. Решающим обстоятельством для экономически оправданного использования многопереходных (каскадных) фотоэлементов является тот факт, что они могут весьма эффективно работать при высоком концентрированном СИ.

1.1 Концентраторные GaInP/Ga(In)As/Ge солнечные элементы и электрогенерирующие линейки на основе GaInP/Ga(In)As/Ge СЭ

Конструктивно монолитный GaInP/Ga(In)As/Ge СЭ состоит из трех, последовательно включенных фотоактивных *p*–*n*-переходов, соединенных между собой двумя туннельными *p*–*n*-переходами, и резистора – R_S, эквивалентного омическому сопротивлению всей структуры многопереходного (МП) СЭ. Как правило, в МП СЭ существенное влияние оказывают туннельно-ловушечный (Есаки) и рекомбинационный (Саа-Нойс-Шокли) механизмы токопрохождения. Рост токов «насыщения» данных механизмов, а следовательно рост поверхностных токов утечки, приводит к снижению КПД МП СЭ. А при уменьшении размеров МП СЭ (пропорционально кратности концентрации СИ) и утонении подложки состояния боковых поверхностей *p*–*n*-переходов и соединительных слоев фотоактивной части структуры более заметно влияют на фотоэлектрические характеристики СЭ. Разработана постростовая технология, которая позволяет формировать ровные боковые поверхности структуры GaInP/Ga(In)As/Ge МП СЭ при разделении на чипы в одностадийном процессе жидкостного химического травления. Для этого используется травитель, позволяющий

выровнять скорость травления слоёв структуры. Ровный, без протравов профиль поверхности травления структуры обеспечивает малую «эффективную» площадь боковой поверхности мезы СЭ и снижение влияния поверхностных токов утечки за счет снижения вклада туннельно-ловушечного (избыточного) и рекомбинационного механизмов токопрохождения. А также улучшает условия пассивации боковой поверхности МП СЭ, обеспечивая высокую термостабильность в широком диапазоне температур. При этом эффективность GaInP/Ga(In)As/Ge МП СЭ увеличивается с ростом концентрации, достигая значения КПД ≥ 35% (C=10-100, AM0, 0.136 mW/cm^2) [12-13]. Объединение GaInP/Ga(In)As/Ge МП СЭ в электрогенерирующие линейки (ЭГЛ) позволяет повысить фотогенерируемый ток системы.

1.2 Гибридные солнечные элементы для фотоэлектрического концентраторного модуля.

В традиционном варианте фотоэлектрическая концентраторная система (ФКС) включает в себя линзу Френеля, разделяющую падающее СИ со спектром AM0 на две составляющие: прямое и рассеянное излучение. Прямое излучение концентрируется на многопереходных СЭ. Рассеянное излучение не преобразуется в электричество и, как правило, расходуется на нагрев ТО. Кроме того, концентраторы имеют узкий диапазон угловой разориентации относительно нормали к падающему свету. Создание ФКС на основе гибридного солнечного элемента (ГСЭ) [6] позволило решить проблемы традиционных ФЭМ: уменьшить тепловые потери, повысить эффективность и электрическую вырабатываемую мощность, расширить диапазон угловой разориентации, при которой ФЭМ способен вырабатывать электричество. Ранние разработки ГСЭ представляют собой электрогенерирующие линейки (ЭГЛ) из GaInP/Ga(In)As/Ge СЭ которые коммутируются на фотоактивное кремниевое ТО с интегрированными кремниевыми СЭ, полученными диффузионным методом. Благодаря использованию в ГСЭ утонённых и изготовленных по специальной

технологии трехпереходных СЭ заметно повышается КПД ФЭМ (см. п. 1.1). В конструкции субмодуля использованы полноразмерный сдвоенный линзовый блок (сдвоенная линейная линза Френеля) и ГСЭ, которые равны по размерам и являются независимыми элементами с передачей части механических функций. Для уменьшения потерь выходной электрической мощности при разориентации системы на Солнце, между ЭГЛ и кремниевыми СЭ устанавливаются линейные отражатели под углом 68.2º. Такое решение делает процесс изготовления и сборки более технологичным и возможным для многократного повторения при создании ФЭМ и панелей СБ с концентраторами.

Исходя из имеющихся на сегодняшний день данных, был сделан вывод, что необходимо дальнейшее усовершенствование ФКС - увеличение эффективности в условиях широкой угловой разориентации, уменьшение массогабаритных параметров, увеличение радиационной стойкости ФЭМ. Способы решения данного вопроса являются интересной научной и практической задачей.

В работе предлагается решить поставленную задачу заменой ТО с интегрированными диффузионными кремниевыми СЭ на ТО – HJT СЭ (Heterojunction technology СЭ). В лучших наземных образцах HJT СЭ достигнут КПД более 26% (1000 W/m^2, AM1,5) [14-19]. Более высокие значения напряжения холостого хода (до 750 mV) и меньшие температурные коэффициенты (ниже – 0.3%/°C; AM1.5, 1000 W/m^2) достигают за счет использования более низких температур роста пассивирующих слоёв аморфного кремния HJT СЭ, что является большим преимуществом, например над PERC (Passivated Emitter Rear Cell) и IBC (Interdigitated Back Contact cells) технологиями СЭ [20-22]. HJT СЭ успешно функционируют в различных климатических поясах Земли в широком температурном диапазоне (−40ºC ÷ +50ºC). При этом вопросы деградации HJT СЭ при облучении электронами и протонами, их температурной стабильности и

влиянию термоциклирования на сегодняшний день, недостаточно изучены и являются актуальной научно-технологической задачей.

ГЛАВА 2. Методы исследования и экспериментальные образцы

Во **второй главе** описываются экспериментальные методики, использованные в работе. Приводятся установки для измерения темновых и световых ВАХ, спектральных характеристик СЭ. Описаны условия радиационного облучения, термоциклирования и температурных измерений ВАХ. Приводится описание исследуемых образцов СЭ, ГСЭ, фотоэлектрической системы с концентратором – субмодуля.

Для измерения темновых ВАХ образцов до и после облучения использовались зондовая станция и высокочувствительный источник-измеритель (рис. 1). К исследуемой структуре с помощью бериллиевых зондов по четырёхпроводной схеме прикладывалось прямое напряжение смещения в диапазоне от 0 до 1 V и значений плотностей токов в диапазоне от 10^{-9} до 1 A/cm^2. Измерения проводились в автоматическом режиме при комнатной температуре. Управление приборами производилось через персональный компьютер с использованием специальной программы, разработанной в среде *LabView*.

а

b

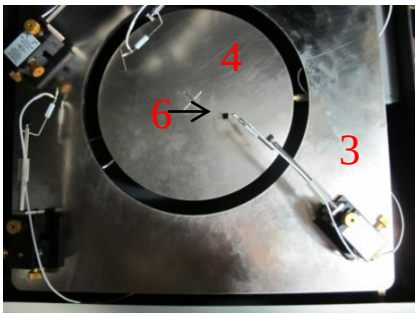


Рисунок 1. (***a***) – фото установки и (***b***) - измерительного стола для исследования темновых характеристик СЭ: 1 – экранированный корпус, 2 – микроскоп, 3 – зонд на микроподвижках, 4 – измерительный стол, 5 – источник-измеритель Keithley SourceMeter 2430, 2635-A, 6 – исследуемый образец, 7 - источник питания освещения микроскопа.

Измерения спектральных характеристик СЭ осуществляется на установке, оптическая схема которой представлена на рисунке 2. Основные узлы измерительного тракта: ПК, монохроматор, модулятор, исследуемый и контрольный образцы, зеркало, блок коммутации, блок управления. Экспериментальный образец СЭ фиксировался на специализированный держатель с электрической коммутационной колодкой. Держатель устанавливался на трехкоординатный XYZ позиционер. СЭ помещается с помощью XYZ позиционера в сфокусированный зеркальным конденсором монохроматический световой поток. Размер светового пятна монохроматического излучения на СЭ корректируется ирисовой диафрагмой, установленной на выходной щели монохроматора. Далее с помощью XYZ позиционера контрольный фотоприемник помещается в сфокусированный зеркальным конденсором монохроматический световой поток. Определение значений фоточувствительности в абсолютных единицах производится путем

сравнения фототоков исследуемого СЭ и контрольного фотоприемника при попадании на них монохроматического излучения.

Для измерения световых ВАХ СЭ в широком диапазоне температур до и после электронного облучения, термоциклирования использовался имитатор солнечного излучения (ИСИ). ИСИ также использовался для измерения световых ВАХ и разориентационных характеристик ГСЭ и субмодуля. ИСИ (рис.3) представляет собой специализированный измерительный комплекс, включающий источник излучения в виде двух импульсных ксеноновых ламп и оптическую систему, формирующую коллимированный световой поток. Установка включает также координатный стол и измерительный блок, который регистрирует временные зависимости генерируемого фототока и напряжения от тестируемого СЭ, а также значения фототока от контрольного СЭ (трёхпереходного СЭ с известными параметрами). Методика проведения исследований заключается в том, что при освещении СЭ в течение светового импульса ИСИ (импульса-вспышки 3 ms), который откалиброван по спектральному составу излучения AM0, 1367 Вт/m^2 (рис.4), происходит измерение его вольт-амперной характеристики. Блок питания импульсного источника состоит из: импульсного зарядного устройства накопительной батареи, блока поджига, источника дополнительных напряжений и разрядного контура. Специальное устройство на базе ПК организует весь цикл измерений, сбор и накопление данных. В связи с высоким временем жизни неосновных носителей заряда в представленных образцах, измерение каждой ВАХ проводилось по точечно, то есть пара ток-напряжение за один импульс-вспышку.

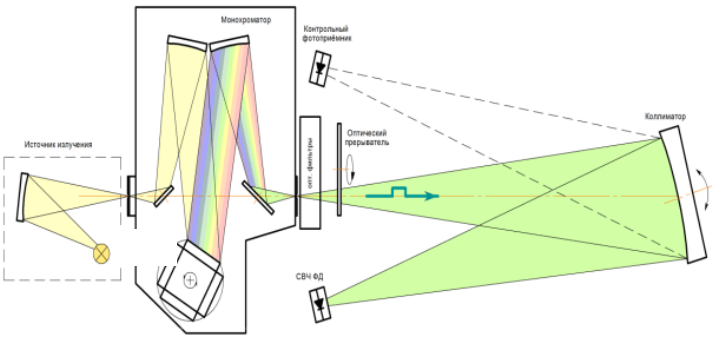


Рисунок 2. Оптическая схема установки для исследования спектральных характеристик

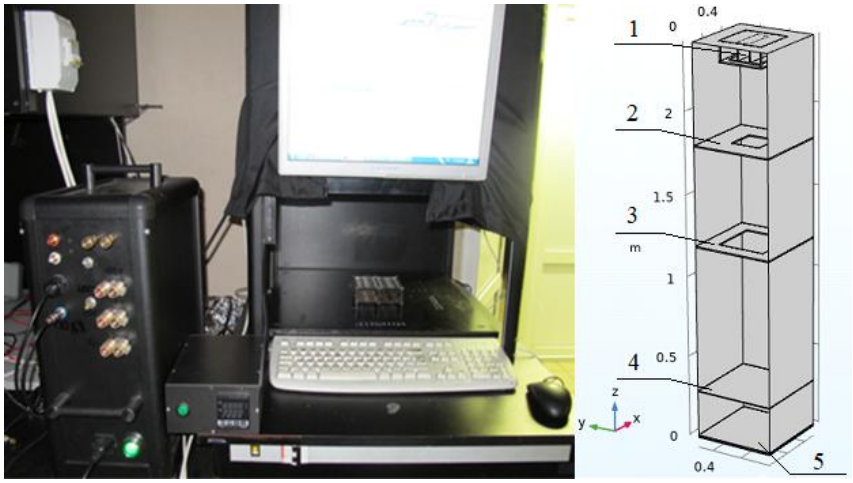


Рисунок 3. Схематический вид ИСИ для измерения световых (нагрузочных) характеристик: 1 – источник излучения с фильтром, 2 и 3 – диафрагмы, 4 – линза Френеля, 5 – измерительный стол

Разориентационные характеристики ГСЭ и СЭ проводились также с использованием установки ИСИ. Субмодуль в процессе измерения вращается в плоскости перпендикулярной линии фокуса линзового концентратора при помощи механизированной подвижки с углом поворота до 30° в двух взаимно ортогональных направлениях (по часовой стрелке и против). При изменении угла разориентации перпендикулярно линейному фокусу субмодуля на 1°, регистрируется фототок и напряжение.

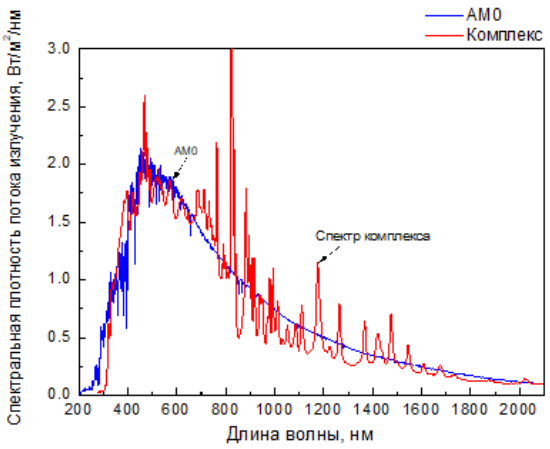


Рисунок 4. Сравнение спектров излучения источника излучения ИСИ и космического солнечного излучения (AM0, 1367 Вт/m^2)

Температурные измерения образцов проводились в криостате в интервале температур от −100 °C до 100 °C с шагом 10 °C. При этом засветка образцов производилась с помощью импульсного ИСИ (AM0, 1367 Вт/m^2). Криогенная установка включала в себя масляный насос, азотную ловушку и два сообщающихся криостата, один вспомогательный, обеспечивающий поддержку необходимого уровня вакуума, а в второй криостат помещался исследуемый СЭ. Ввод излучения осуществлялся через кварцевое оптическое окно криостата, где размещался исследуемый образец. Температура образца контролировалась при помощи термоконтроллера, который подключён к криогенной установке. Термоконтроллер позволял задавать точную температуру, диапазон температур, скорость нагрева и охлаждения. Криостат размещался в измерительную установку (рис.3).

Радиационное облучение осуществлялось на воздухе при комнатной температуре с фронтальной стороны при двухкоординатном сканировании СЭ пучком электронов (J_e = 12.5 μA/cm^2, E_e = 1±0.1 MeV) последовательно флюенсами F_e = $2.5 \cdot 10^{14}$, $5 \cdot 10^{14}$, $1 \cdot 10^{15}$ cm^{-2} на установке РТЭ-1В. Флюенс облучения увеличивался количеством проходов пучка электронов и перемещением стола с облучаемыми образцами в ортогональных направлениях. Ток электронного пучка ускорителя в процессе облучения образцов был постоянным и контролировался прибором GDM-8246. Поток электронов, интенсивность и время экспозиции выбиралось так, чтобы отсутствовал температурный отжиг образцов. Радиационное облучение проводилось на базе НТК «Ядерная физика» (СПбПУ).

Термоциклирование проводилось в ПАО «Светлана» с использованием климатической камеры теплового удара «Espec TSE-11-A» с рабочим диапазоном температур от -65°C до 200°C. Это двухзонная камера с подвижной рабочей зоной, способная подвергать образцы равномерной

термической нагрузке. Для испытаний была выбрана одна из рабочих программ, обеспечивающих работу камеры в постоянном режиме в течение 24 часов. Время переноса из низкотемпературной в высокотемпературную зону и наоборот составляло 10 секунд. Образцы СЭ подвергались воздействию температур от -60°C до 100°C. Количество полных циклов составляло 100. Время одного полного цикла составляло 20 минут.

Структуры HJT СЭ (рис.5, табл.1) формировались на подложках кристаллического кремния (c-Si) *n* или *p* – типа, полученных методом Чохральского, с легированием фосфором (P), галлием (Ga), или бором (B), с концентрацией носителей заряда ≤ 10^{16} cm^{-3}. Подложки толщиной ~ 140 мкм и удельным сопротивлением в диапазоне от 1.5 до 4 **Ω•**cm текстурировали с двух сторон путём химического травления для увеличения поглощения солнечного света и минимизации его отражения от поверхности СЭ. На подложки с двух сторон осаждались слои нелегированного аморфного кремния (*i*-α–Si:H) толщиной ~ 5 nm, затем *n*-аморфные (или *n*-микрокристаллические) и *p*-аморфные слои толщиной (10–20) nm, и слои оксида индия-олова (ITO) толщиной 100 nm. На c-Si *p*-типа *p*-*n* переход формировался с фронтальной стороны, а на c-Si *n*-типа - с тыльной стороны (конфигурация “заднего эмиттера”- RE) [20]. Серебряные (Ag) контактные шины шириной 40 мкм и шагом 1-1.5 мм наносились методом трафаретной печати.

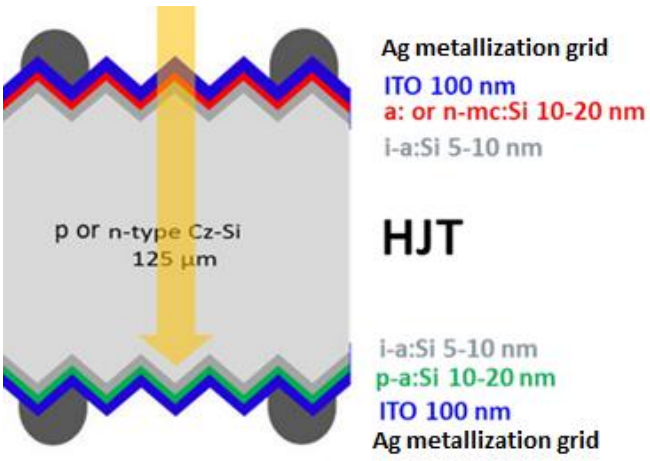


Рисунок 5. Общая схема структуры исследуемых образцов HJT СЭ.

Исследуемые структуры HJT СЭ различались лигатурой c-Si и аморфным либо микрокристаллическим *n*-фронтальными слоями. Исследовались образцы площадью 1 cm^2, вырезанные (лазерной резкой) из HJT СЭ площадью 15.6×15.6 cm^2, без какой-либо последующей пассивации боковых поверхностей. Характеристики изготовленных образцов соответствовали характеристикам HJT СЭ площадью 15.6x15.6 cm^2. В субмодуле использовался HJT СЭ размерами 54 mm × 104 mm.

Таблица 1. Исследуемые структуры HJT СЭ

№	Structure
A	*n-α-Si:H-(p)c-Si:B-p-a-Si:H*
B	*n-μc-Si:H-(p)c-Si:B-p-a-Si:H*
C	*n-α-Si:H-(p)c-Si:Ga-p-a-Si:H*
D	*n-μc-Si:H-(p)c-Si:Ga-p-a-Si:H*
E	*n-α-Si:H-(n)c-Si:P-p-a-Si:H*
F	*n-μc-Si:H-(n)c-Si:P-p-a-Si:H*

Субмодуль состоит из двух составных частей – оптической и фотоэлектрической. Оптическая часть – это сдвоенная линейная линза Френеля, являющаяся концентратором и фокусирующая солнечное излучение на трёхпереходные GaInP/Ga(In)As/Ge СЭ. Линза Френеля имела фокусное расстояние 32 mm и общую оптическую площадь 50 cm^2. Фотоэлектрическая часть - ГСЭ - включает электрогенерирующие линейки (ЭГЛ) из трёхпереходных GaInP/Ga(In)As/Ge СЭ на HJT СЭ в качестве теплоотводящего основания. Для уменьшения потерь выходной электрической мощности при разориентации оптической системы поперёк линии фокуса линзового концентратора, как и ранее [3], между ЭГЛ и HJT СЭ были установлены под углом 68.2º линейные отражатели (рис.6). Боковые отражатели - тонкие полированные алюминиевые зеркала с размерами 4.5 mm × 104 mm и толщиной 0.4 mm с максимальным коэффициентом отражения более 90% для длин волн излучения $\lambda > 500$ nm.

Исследуемый ГСЭ представлял собой две ЭГЛ из 18 параллельно соединенных GaInP/Ga(In)As/Ge СЭ смонтированных на теплоотводящее

основание из HJT СЭ. ЭГЛ толщиной ~ 150 μm имели габаритные размеры 0.54 cm× 104 cm. Конструкция субмодуля позволяла осуществить схему параллельного и последовательного соединения между ЭГЛ GaInP/Ga(In)As/Ge и HJT СЭ. При последовательном соединении друг за другом, соединяются положительные и отрицательные контакты ЭГЛ GaInP/Ga(In)As/Ge и HJT СЭ. При параллельном соединении в одной клемме соединяются все отрицательные контакты, а в другой клемме – все положительные.

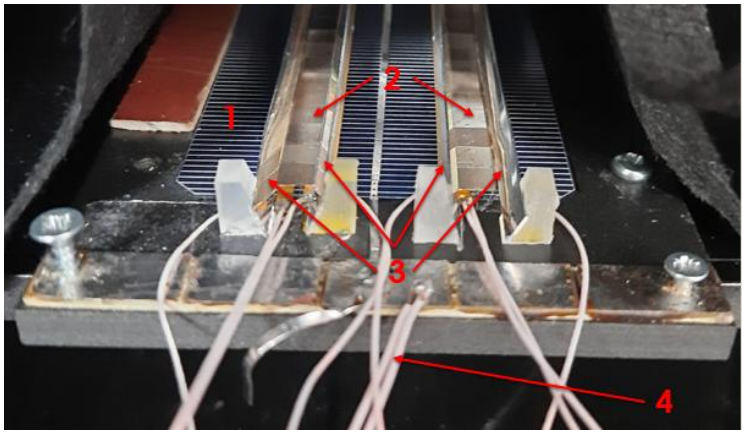


Рисунок 6. Фотография гибридного СЭ в оптической системе (субмодуле): 1 - HJT СЭ; 2 – электрогенерирующие линейки на основе GaInP/GaAs/Ge СЭ, размером 0.5 cm×10 cm; 3 – боковые оптические отражатели; 4 – контакты.

ГЛАВА 3. Исследования гетероструктурных кремниевых солнечных элементов в качестве фотоактивного теплоотводящего основания

В **третьей главе** затрагиваются темы исследования и анализа радиационной стойкости, температурной стабильности HJT СЭ и оценка влияния термоциклирования на их характеристики.

3.1 Исследование радиационной стойкости кремниевых гетероструктурных солнечных элементов

Полное исследование радиационной стойкости HJT СЭ включает анализ темновых и световых ВАХ, спектральных характеристик внешней квантовой эффективности образцов шести различных структур (см. табл.1, рис.5).

Прямая темновая ВАХ СЭ характеризует через токи «насыщения» доминирующие механизмы токопрохождения «идеальность» *p-n* перехода, качество пост ростовых процессов изготовления структуры. Анализ темновых ВАХ проводился методом, описанным в [23], посредством фиттинга экспериментальных кривых с использованием выражения (1) для темнового тока:

$$j = J_{0t} \cdot exp((U + jR_s)/\mathcal{E}_t) + J_{0r} \cdot exp((U + jR_s)/\mathcal{E}_r) + J_{0d} \cdot exp((U + jR_s)/\mathcal{E}_d) \quad (1),$$

где J_{0i} – ток насыщения, U – прикладываемое напряжение смещения, R_s – последовательное сопротивление структуры, $\varepsilon_i = A_i kT/q$ – характеристический потенциал, k – постоянная Больцмана, q – заряд электрона, A_i – диодный коэффициент (туннельно - ловушечный, $A_t > 2$; рекомбинационный, $A_r = 2$; диффузионный, $A_d = 1$, T – температура.

Метод заключается в представлении прямой ветви темновой ВАХ совокупностью экспоненциальных участков, соответствующих механизмам токопрохождения: туннельно-ловушечному, «избыточному» с диодным коэффициентом идеальности $A_t > 2$, (Esaki); рекомбинационному, $A_r = 2$, (Sah–Noyce–Shockley), диффузионному, $A_d = 1$, (Shockley).

Наименьшие значения токов «насыщения» были получены на образцах *n*-типа структуры ***E***. Относительно небольшие значения токов «насыщения»

были также получены на образцах структур ***C*** и ***D***. После облучения 1MeV электронами флюенсами: $2.5\cdot10^{14}$; $5\cdot10^{14}$; $1\cdot10^{15}$cm^{-2} образцы исследуемых структур деградируют с ростом токов «насыщения». Аналогичная деградация HJT СЭ *n*-типа с преимущественным изменением диффузионной составляющей тока ранее была показана при облучении электронами с энергией 3.8 MeV в работе [24]. Диффузионный ток «насыщения» для образцов *n*-Si после облучения в среднем более чем на порядок выше, чем для образцов *p*-Si.

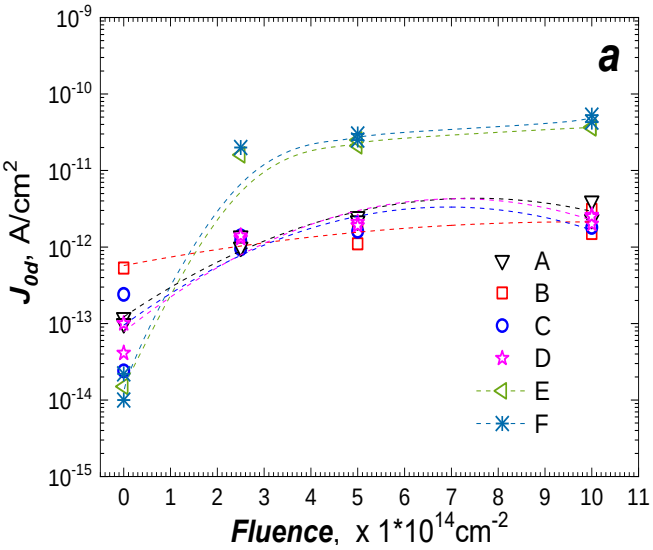


Рисунок 7. Зависимости тока “насыщения” (J_{0d}) диффузионного механизма токопрохождения от флюенса 1MeV электронов, рассчитанного из экспериментальных темновых ВАХ, для HJT СЭ структур ***A-F***, (Табл.2).

Изменение диффузионного тока «насыщения» для всех исследуемых структур ***A-F*** приведено на рисунке 7. Типичные темновые ВАХ для наиболее интересующих структур ***C, D*** и ***E*** представлены на рисунке 8. Рост диффузионного тока «насыщения» на два порядка и более в результате облучения 1 MeV электронами флюенсом до $1\cdot10^{15}$ cm^{-2} вызывает значительное снижение КПД и вырабатываемой мощности HJT СЭ. Значения токов «насыщения», J_{0i}, коэффициентов идеальности, A_i, и последовательного сопротивления R_{s1} структур ***C, D*** и ***E*** приведены в таблице 2.

Для оценки радиационной стойкости были измерены и проанализированы спектральные характеристики внешней квантовой эффективности образцов

HJT СЭ структур ***A-F***. Согласно полученным экспериментальным данным, у всех структур снижение диффузионной длины неосновных носителей заряда в результате введения радиационных дефектов привело к потере чувствительности, преимущественно в длинноволновом крае. Такое поведение связано с высокой энергией электронов, воздействующих на структуры.

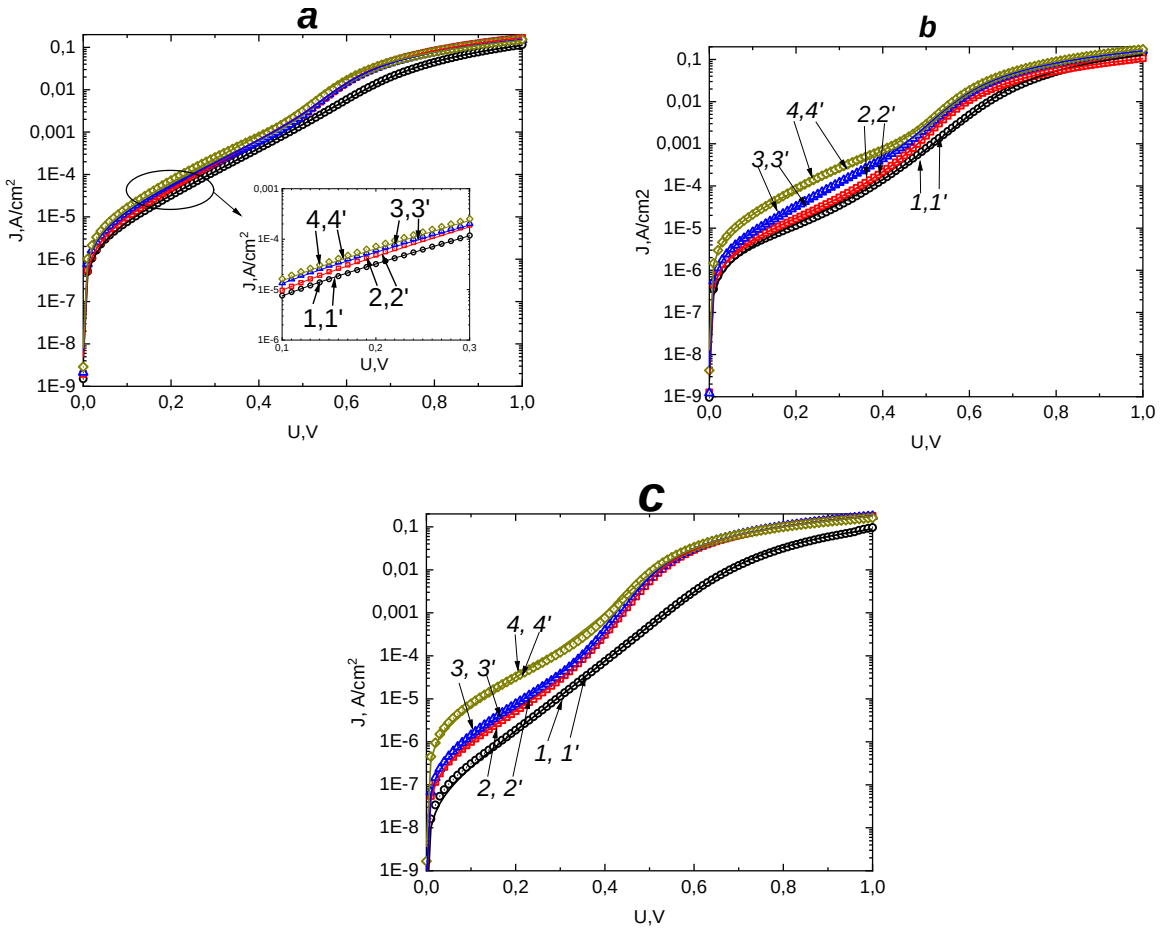


Рисунок 8. Экспериментальные (1-4) и расчётные (1’-4’) темновые ВАХ HJT СЭ структур ***C*** – (***a***), ***D*** – (***b***) и ***E*** – (***c***) при облучении электронами с энергией 1 MeV с различными значениями флюенса: 1 – 0; 2 – $2.5 \cdot 10^{14}$ cm^{-2}; 3 – $5 \cdot 10^{14}$ cm^{-2}; 4 – $1 \cdot 10^{15}$ cm^{-2}.

На рисунке 9 приведены спектральные зависимости внешней квантовой эффективности на примере структур ***D*** и ***E***. Интегральное снижение внешней квантовой эффективности в результате облучения приводит к снижению токов короткого замыкания исследуемых структур.

Наконец, были проанализированы световые ВАХ образцов HJT СЭ

структур ***A-F*** и для структур ***C, D*** и ***E*** найден коэффициент деградации диффузионной длины.

Световая ВАХ СЭ описывается выражением (2),

$$j = J_g - (J_{0t} \cdot exp(q(U + jR_s)/A_t kT) + J_{0r} \cdot exp(q(U + jR_s)/A_r kT) + J_{0d} \cdot exp(q(U + jR_s)/A_d kT)) \quad (2),$$

где J_g - фотогенерируемый ток.

Изменение некоторых основных экспериментальных параметров HJT СЭ структур ***A-F*** после облучения потоками 1 MeV электронов представлены на рисунке 10. КПД структур ***C*** и ***D*** снизилось с ≤ 19,2% до ≤ 13,6%. У данных структур относительное снижение тока короткого замыкания I_{sc} < 16%, напряжения холостого хода U_{oc} < 19%.

*Таблица 2. Параметры фиттинга темновой ВАХ исследуемых структур **C, D** и **E***

Структура	A_t	J_{0t},A/cm^2	A_r	J_{0r},A/cm^2	A_d	J_{0d},A/cm^2	R_{s1},Ω·cm^2
Fluence of 1MeV electrons = 0							
C	3.4	$3.2 \cdot 10^{-6}$	2	$1.7 \cdot 10^{-8}$	1	$2.5 \cdot 10^{-14}$	2.5
D	5.3	$3 \cdot 10^{-6}$	2	$2.8 \cdot 10^{-8}$	1	$5 \cdot 10^{-14}$	2.3
E	2.5	$3.4 \cdot 10^{-8}$	2	$1.9 \cdot 10^{-8}$	1	$3 \cdot 10^{-15}$	2.9
Fluence of 1MeV electrons = $2.5 \cdot 10^{14}$ cm^{-2}							
C	3.1	$3.7 \cdot 10^{-6}$	2	$1 \cdot 10^{-8}$	1	$1 \cdot 10^{-12}$	2.1
D	5.6	$4.7 \cdot 10^{-6}$	2	$4.4 \cdot 10^{-8}$	1	$1.3 \cdot 10^{-12}$	3.6
E	3.2	$2.8 \cdot 10^{-7}$	2	$3.6 \cdot 10^{-8}$	1	$1.6 \cdot 10^{-11}$	2.3
Fluence of 1MeV electrons = $5 \cdot 10^{14}$ cm^{-2}							
C	3.5	$6.2 \cdot 10^{-6}$	2	$3 \cdot 10^{-8}$	1	$1.2 \cdot 10^{-12}$	2.4
D	4.4	$5.1 \cdot 10^{-6}$	2	$7.3 \cdot 10^{-8}$	1	$1.9 \cdot 10^{-12}$	2.3
E	2.7	$3.7 \cdot 10^{-7}$	2	$5 \cdot 10^{-8}$	1	$2.4 \cdot 10^{-11}$	2.4
Fluence of 1MeV electrons = $1 \cdot 10^{15}$ cm^{-2}							
C	3.4	$7 \cdot 10^{-6}$	2	$5 \cdot 10^{-8}$	1	$3 \cdot 10^{-12}$	2.7
D	4.4	$1.5 \cdot 10^{-5}$	2	$5.1 \cdot 10^{-8}$	1	$2 \cdot 10^{-12}$	2.1
E	4.3	$3.3 \cdot 10^{-6}$	2	$2.5 \cdot 10^{-7}$	1	$1.7 \cdot 10^{-11}$	2.4

Полученные значения последовательного сопротивления из фиттинга темновых ВАХ (Табл.2) не позволяют с высокой точностью рассчитывать световую ВАХ СЭ. По этой причине значения последовательного сопротивления структур СЭ в фотовольтаическом режиме было скорректировано для расчёта экспериментальных световых ВАХ (Табл. 3).

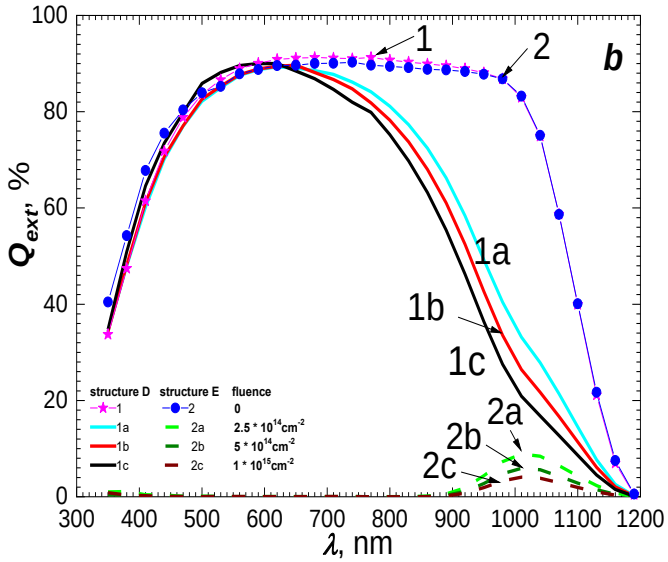
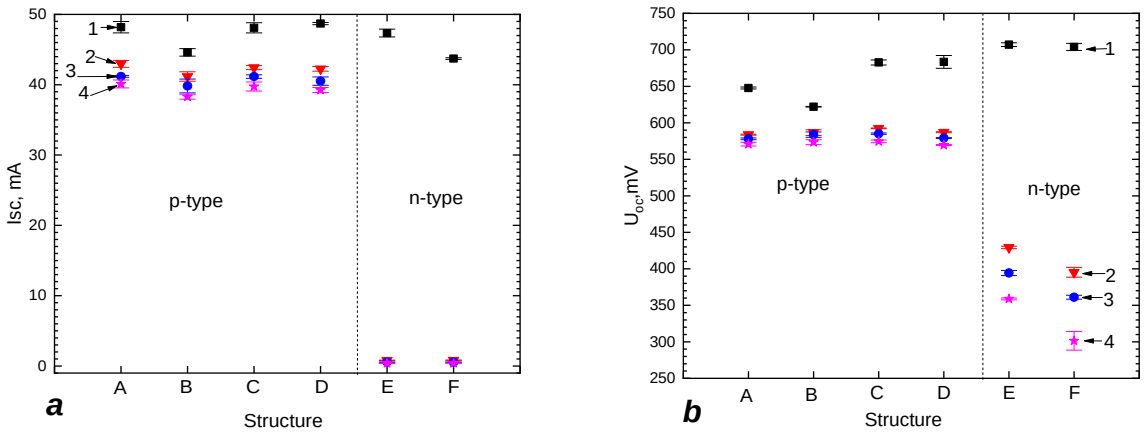


Рисунок 9. Спектральные характеристики внешней квантовой эффективности HJT СЭ структур ***D*** (кривая 1) и ***E*** (кривая 2), (Табл.1) при облучении 1 MeV электронами флюенсами: 0 – 1, 2; $2.5\cdot10^{14}$ cm^{-2} - 1***a***, 2***a***; $5\cdot10^{14}$ cm^{-2} - 1***b***, 2***b***; $1\cdot10^{15}$ cm^{-2} - 1***c***, 2***c***.



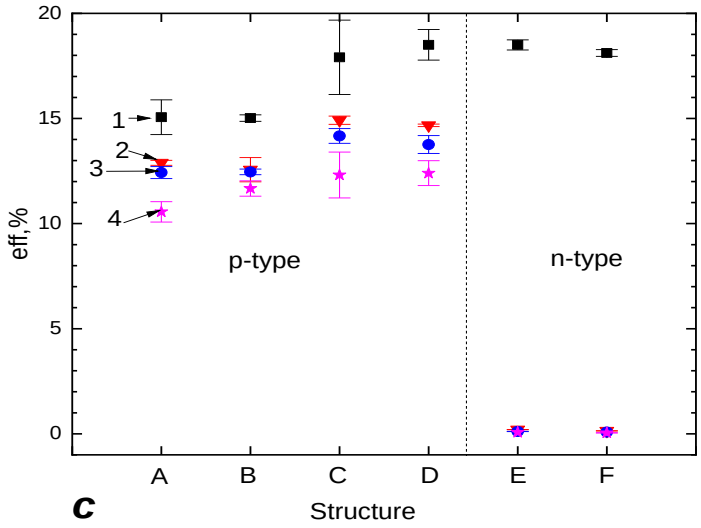


Рисунок 10. Зависимости фотоэлектрических параметров (a – I_{sc}, b – U_{oc}, c - КПД) исследуемых образцов HJT СЭ с p- и n- типом Si базовой области структур A-D и E-F, соответственно, от флюенса 1 MeV электронов полученные из световых ВАХ (AM0, 136 мВт/см^2, T=300K): 1 – 0; 2 – $2.5\cdot10^{14}$cm^{-2}; 3 – $5\cdot10^{14}$cm^{-2}; 4 – $1\cdot10^{15}$cm^{-2}.

Используя полученные данные из таблиц 2,3 и выражение (2) для описания световой ВАХ было проведено моделирование выходных фотоэлектрических параметров СЭ после облучения потоками 1 MeV электронов (рис.11, табл.4).

Таким образом, расчетные темновые и световые ВАХ и параметры по использованной в работе модели хорошо согласуются с экспериментальными характеристиками.

Таблица 3. Значения последовательного сопротивления структур в условиях засветки коллимированным излучением AM0, 0136 W/cm^2

Structure	Fluence of 1MeV electrons, cm^{-2}	R_{s2},Ω·cm^2
C	0	1.25
D		1.3
E		1.355
C	$2.5\cdot10^{14}$	1.3
D		1.4
E		1.3

C	$5 \cdot 10^{14}$	1.4
D		1.5
E		2.4
C	$1 \cdot 10^{15}$	1.4
D		1.65
E		2.4

Используя выражение (3) были найдены значения для диффузионных длин после облучения HJT СЭ структур ***C, D и E*** [25].

$$I_{sc}/I_{sc_0} \approx (L_{diff}/d) \cdot \tanh(d/L_{diff}) \quad (3),$$

где I_{sc_0}- ток короткого замыкания до облучения, I_{sc} – ток короткого замыкания после облучения, L_{diff} – значение диффузионной длины после облучения, d – толщина подложки HJT СЭ.

Полученные данные и выражение (4) позволяют найти коэффициент деградации и построить зависимость изменения диффузионной длины неосновных носителей заряда для исследуемых структур ***C***, ***D*** и ***E*** (Рис.12).

$$1/L^2 = 1/{L_0}^2 + K_L F_e \qquad (4),$$

где L, L_0 – диффузионная длина неосновных носителей заряда после и до облучения, K_L - коэффициент деградации диффузионной длины, который описывает скорость изменения диффузионной длины в зависимости от флюенса – F_e облучающих электронов [26-27].

Коэффициент деградации диффузионной длины K_L в рассматриваемой области флюенсов 1 MeV электронов для структур C и D лежит в диапазоне $(4\text{-}10)\cdot 10^{-12}$, а для структуры E ~ $8\cdot 10^{-8}$.

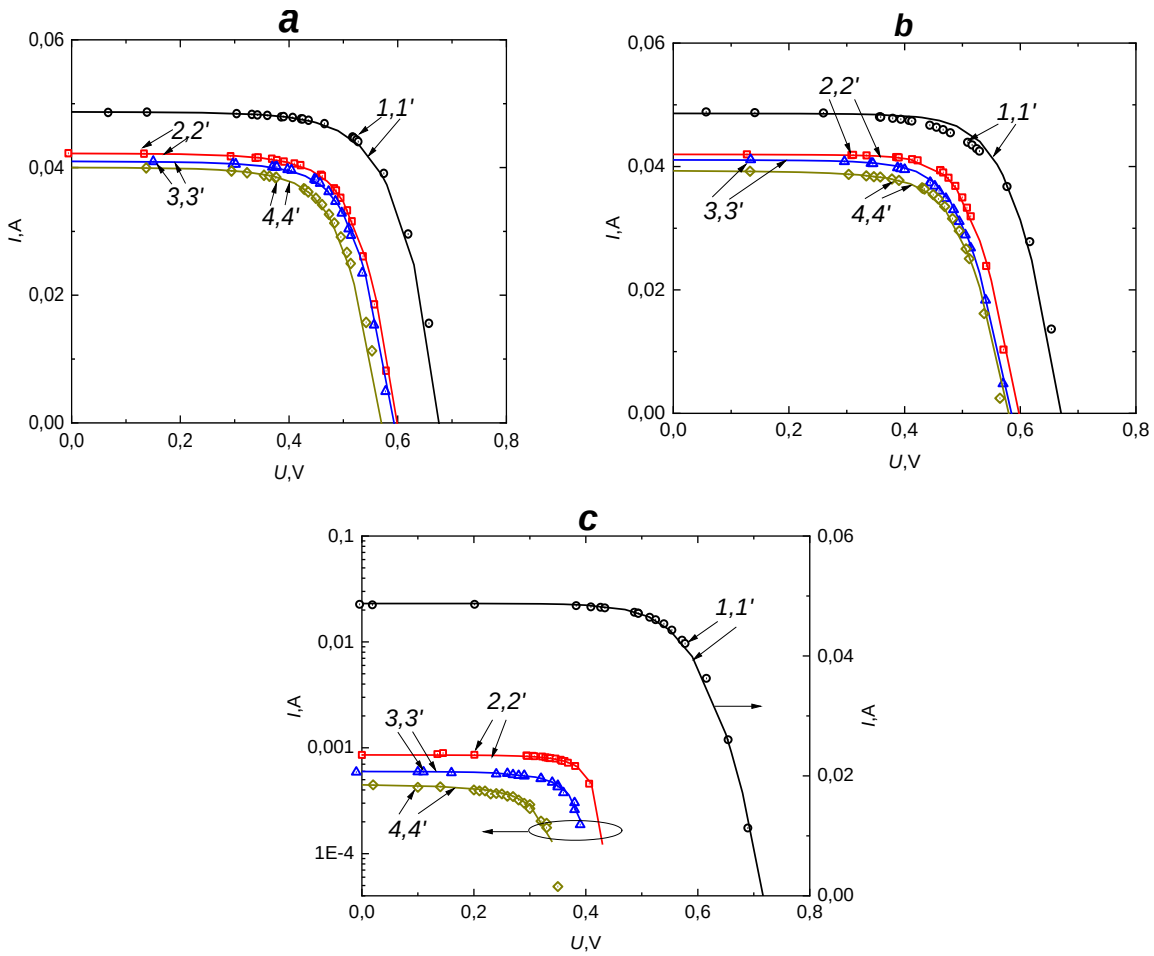


Рисунок 11. Экспериментальные (1-4) и расчётные (1'-4') нагрузочные ВАХ HJT СЭ структур C – (a), D – (b) и E – (c) при облучении электронами с энергией 1 MeV с различными значениями флюенса: 1 – 0; 2 – $2.5 \cdot 10^{14}$ cm^{-2}; 3 – $5 \cdot 10^{14}$ cm^{-2}; 4 – $1 \cdot 10^{15}$ cm^{-2}.

Таблица 4. Параметры световых ВАХ исследуемых структур ***C, D*** *и* ***E*** HJT *СЭ*

Structure	Fluence of 1MeV electrons, cm^{-2}	I_{sc}, mA (I_{sc} measured / I_{sc}, fitted)	U_{oc}, mV (U_{oc} measured /U_{oc}, fitted)	P_{max}, mW (P_{max} measured /P_{max}, fitted)
C	0	48.7 / 48.7	684 / 675	23.2 / 23.0
D		48.7 / 48.6	677 / 670	22.5 / 23.4
E		48.5 / 48.8	706 / 715	24.5 / 24.4
C	$2.5 \cdot 10^{14}$	42.2 / 42.2	591 / 598	17.8 / 17.8
D		42 / 42	587 / 597	18.2 / 18.1
E		0.86 / 0.86	430 / 434	0.27 / 0.27
C	$5 \cdot 10^{14}$	40.9 / 40.9	586 / 592	17.2 / 17.1
D		41.1 / 41.1	578 / 584	16.7 / 16.9
E		0.59 / 0.6	400 / 401	0.16 / 0.16
C	$1 \cdot 10^{15}$	40 / 40	574 / 570	15.8 / 15.8
D		39.3 / 39.3	568 / 579	15.9 / 15.7
E		0.44 / 0.45	358 / 350	0.09 / 0.09

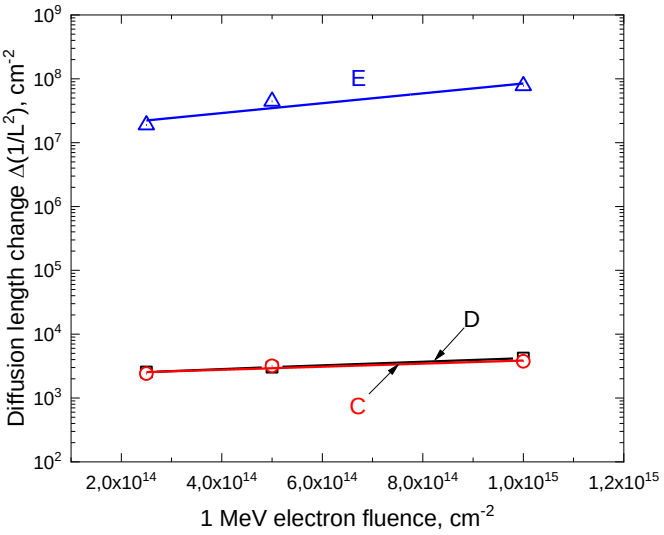


Рисунок 12. Изменения диффузионных длин неосновных носителей заряда для структур ***C, D и E*** после облучения 1 MeV электронами флюенсами: $2.5 \cdot 10^{14}$; $5 \cdot 10^{14}$; $1 \cdot 10^{15}$ cm^{-2}.

Полученное меньшее значение K_L для структур ***C*** и ***D*** по сравнению с классическими кремниевых СЭ обусловлено гетероструктурой высокоэффективных HJT СЭ, наличием аморфных и микрокристаллических слоев, а также малой толщиной c-Si в СЭ. Наряду с повышением радиационной стойкости следует отметить и более высокие достигнутые значения вырабатываемой электрической мощности и КПД HJT СЭ.

3.2 Исследование температурной стабильности кремниевых гетероструктурных солнечных элементов

На рисунках 13 – 16 представлены температурные зависимости ВАХ HJT СЭ p- и - n- типа структур ***B-E*** до облучения. Зависимости параметров ВАХ от температуры представлены на рисунке 17.

КПД рассматриваемых структур с ростом температуры понижается вследствие падения значения FF и напряжения холостого хода и роста темнового тока. Максимальное снижение КПД для рассматриваемых структур в широком диапазоне температур составляет ~ 35% - 40%, а

максимальная вырабатываемая мощность падает в среднем на 10 mW от максимального значения.

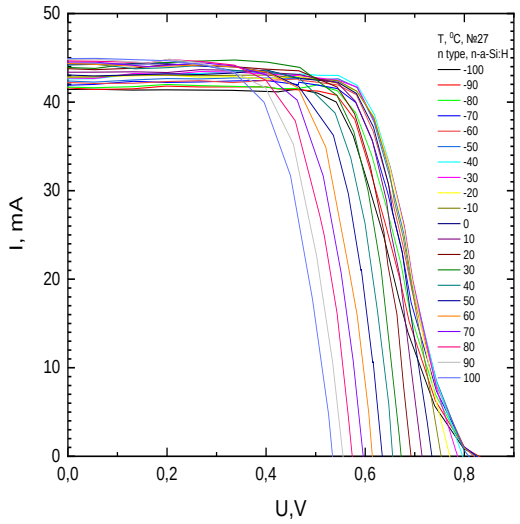


Рисунок 13. ВАХ HJT СЭ структуры E при воздействии коллимированным световым потоком плотностью мощности 136 mW/cm^2 в температурном диапазоне от T=-100ºC до T=+100ºC

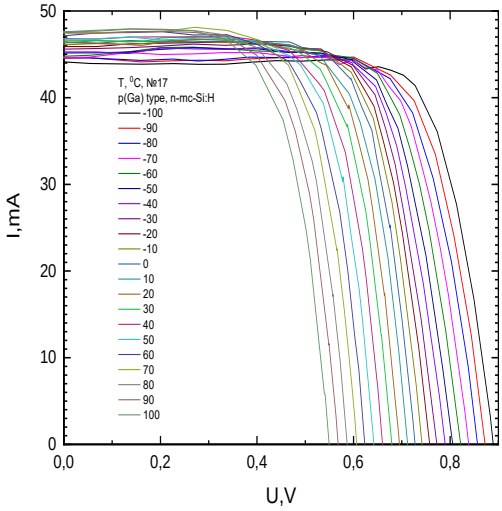


Рисунок 14. ВАХ HJT СЭ структуры D при воздействии коллимированным световым потоком плотностью мощности 136 mW/cm^2 в температурном диапазоне от T=-100ºC до T=+100ºC

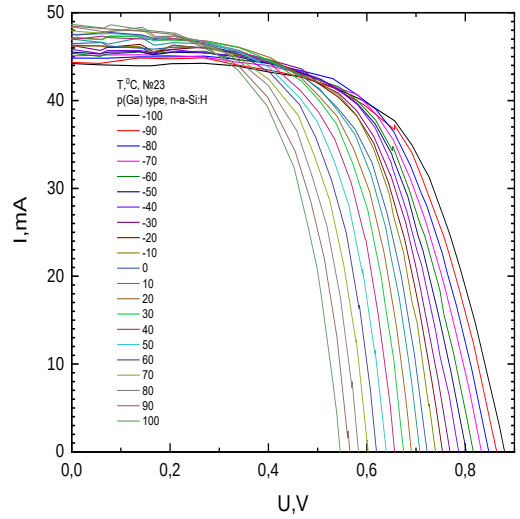


Рисунок 15. ВАХ HJT СЭ структуры C при воздействии коллимированным световым потоком плотностью мощности 136 mW/cm^2 в температурном диапазоне от T=-100ºC до T=+100ºC

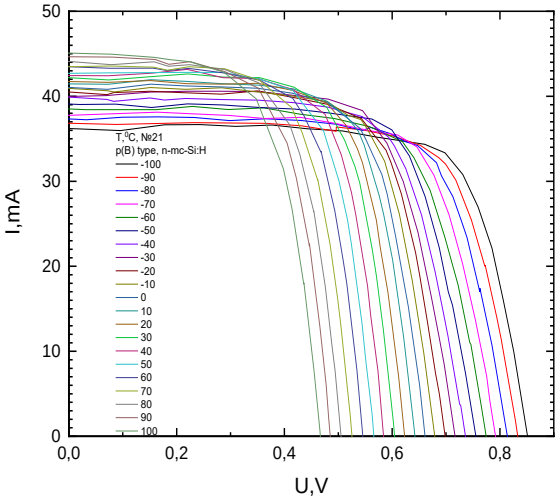


Рисунок 16. ВАХ HJT СЭ структуры B при воздействии коллимированным световым потоком плотностью мощности 136 mW/cm^2 в температурном диапазоне от T=-100ºC до T=+100ºC

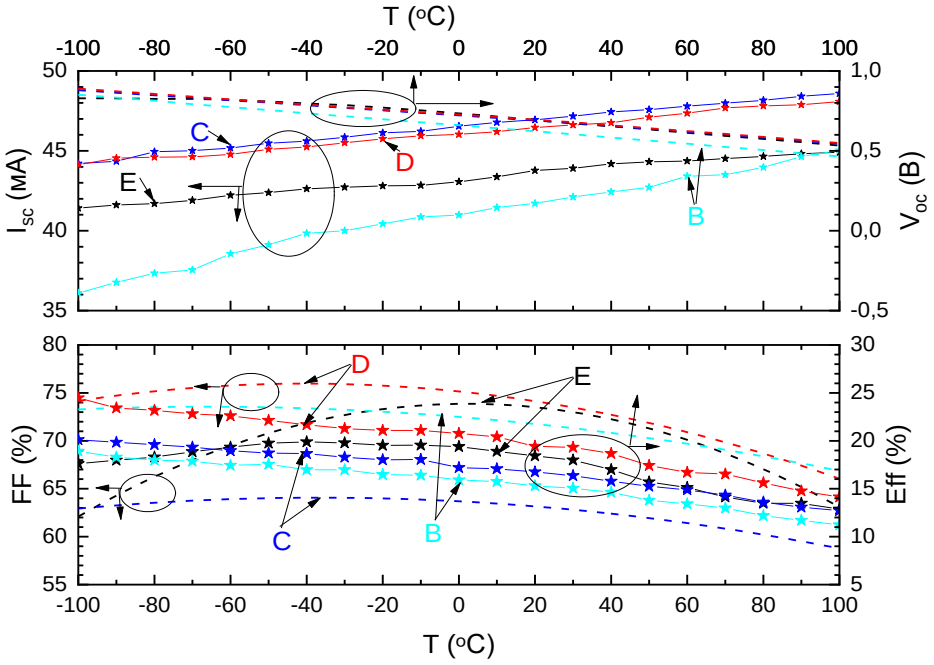


Рисунок 17. Температурные зависимости параметров ВАХ исследуемых HJT СЭ структур ***B-E*** при воздействии коллимированным световым потоком плотностью мощности 136 mW/cm^2 («AM0») – ∗ – Isc и КПД, – – – Uoc и FF

Расчёт приращения (изменения) параметров на 1ºС проводится путем линейной аппроксимации полученных кривых (рис. 17) по формуле (5) с последующим усреднением:

$$\Delta A_i = \frac{|A_{i+1} - A_i|}{(T_{i+1} - T_i) \cdot 1^{\circ}C}, \qquad (5)$$

где ΔA_i – изменение параметров между двумя соседними точками кривой - тока короткого замыкания ΔI_{sci}, напряжения холостого хода ΔU_{oci}, эффективности преобразования ΔКПДi; $(T_{i+1} - T_i)$ – температурный диапазон, шаг линейной аппроксимации.

HJT СЭ в начале срока службы обладают хорошей температурной стабильностью. Более стабильны структуры p-типа, при этом максимальными абсолютными значениями вырабатываемой мощности в точке оптимальной нагрузки и КПД обладает структура ***D*** p-типа.

Также было измерено семейство ВАХ в широком диапазоне температур для исследуемых структур HJT СЭ после облучения. Результаты температурной

стабильности для лучших образцов сведены в таблицы 5-7. Измерения для определения температурной стабильности структуры E после облучения не проводились из-за сильной, более 98%, деградации.

Таблица 5. Температурные коэффициенты параметров HJT СЭ структуры ***C*** в начале срока службы (BOL) и после облучения флюенсами 1MeV электронов

Структура ***C***		BOL	$2.5\cdot10^{14}$	$5\cdot10^{14}$	$1\cdot10^{15}$
dV_{oc}/dT	[mV/°C]	-1.57	-1.97	-1.94	-1.92
dI_{sc}/dT	[mA/cm²/°C]	0.0249	0.03478	0.03503	0.03719
dη/dT	[%/°C]	-0.02828	-0.03036	-0.02714	-0.023

Таблица 6. Температурные коэффициенты параметров HJT СЭ структуры ***D*** в начале срока службы (BOL) и после облучения флюенсами 1MeV электронов

Структура ***D***		BOL	$2.5\cdot10^{14}$	$5\cdot10^{14}$	$1\cdot10^{15}$
dV_{oc}/dT	[mV/°C]	-1.61	-1.97	-1.89	-1.91
dI_{sc}/dT	[mA/cm²/°C]	0.021	0.03993	0.03669	0.03733
dη/dT	[%/°C]	-0.03866	-0.03051	-0.02926	-0.0265

Таблица 7. Температурные коэффициенты параметров HJT СЭ структуры ***B*** в начале срока службы (BOL) и после облучения флюенсами 1MeV электронов

Структура ***B***		BOL	$2.5\cdot10^{14}$	$5\cdot10^{14}$	$1\cdot10^{15}$
dV_{oc}/dT	[mV/°C]	-1.81	-1.96	-1.94	-1.94
dI_{sc}/dT	[mA/cm²/°C]	0.03478	0.03422	0.03621	0.03764
dη/dT	[%/°C]	-0.02812	-0.02855	-0.0271	-0.02215

3.3 Исследование влияния термоциклирования на характеристики кремниевых гетероструктурных солнечных элементов

Ранее облученные и необлученные образцы были подвержены последующему термоциклированию. Термоциклирование позволяет установить способность СЭ выдерживать нагрузки, вызванные периодическим изменением температуры. Анализ световых ВАХ (AM0, 0.136 mW/cm^2, T=300K) показал небольшое снижение параметров (см. рис.18-19) после многократного нагрева и охлаждения СЭ. Снижение тока короткого замыкания и КПД СЭ, как для необлученных, так и для облученных образцов после термоциклирования, составило менее 10% для исследуемых структур

A-D. Для структур ***E-F*** n-типа, практически полностью деградировавших после облучения, наоборот, наблюдается подъем тока короткого замыкания, но не более, чем на 18%, а КПД не более, чем на 38%. Возможной причиной такого поведения является отжиг образцов при нагреве. Напряжение холостого хода после термоциклирования незначительно растёт для всех облученных образцов структур ***A-F***. Таким образом, ‘кспериментально показана хорошая устойчивость HJT СЭ к резкому перепаду температур, неизбежно встречающемуся в космосе.

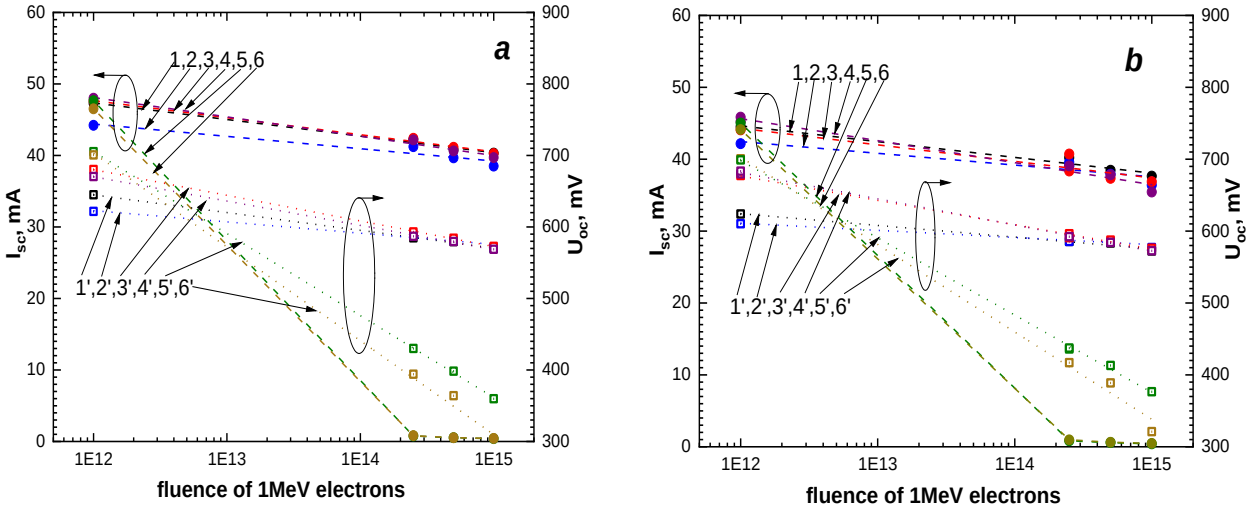


Рисунок 18. Ток короткого замыкания (кривые 1-6) и напряжение холостого хода (кривые 1’-6’) в зависимости от флюенса 1 MeV электронов до – (***a***) и после – (***b***) термоциклирования у структур: 1,1’ – A, 2,2’ – B, 3,3’ – C, 4,4’ – D, 5,5’ – E, 6,6’ – F.

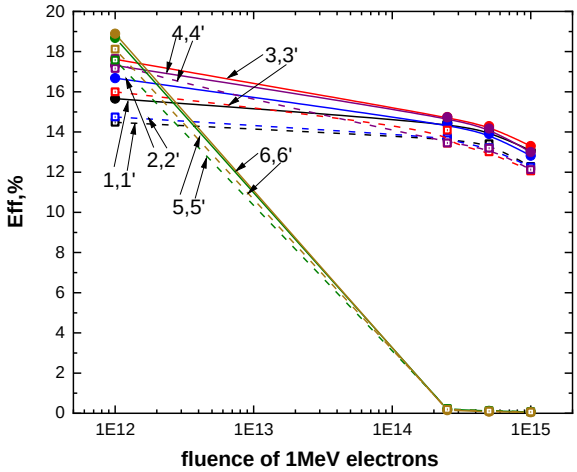


Рисунок 19. Изменение КПД в зависимости от флюенса 1 MeV электронов после термоциклирования у структур: 1,1’ – A, 2,2’ – B, 3,3’ – C, 4,4’ – D, 5,5’ – E, 6,6’ – F, где кривые 1-6 описывают параметры до термоциклирования, 1’-6’ – после.

ГЛАВА 4. Исследования фотоэлектрической концентраторной системы с гибридным солнечным элементом на основе трёхпереходных GaInP/GaAs/Ge и HJT солнечных элементов

В **четвертой главе** рассмотрен субмодуль на основе ГСЭ - GaInP/GaAs/Ge ЭГЛ на ТО, в качестве которого выступает HJT СЭ. А также на основе сдвоенного линзового концентратора (ЛК) (линзы с профилем Френеля, выполненным на космическом силиконе). Целью настоящей главы было теоретическое и экспериментальное исследование фотоэлектрических характеристик космического субмодуля на основе ГСЭ при углах разориентации от 0 до 30°.

Эффективность разработанных линейных ЛК типа линз Френеля составила ≤ 90 % при измерениях на импульсном имитаторе коллимированного солнечного излучения (AM0, 1367 W/m^2).

ЭГЛ из GaInP/GaAs/Ge СЭ преобразовывают сконцентрированное падающее СИ в электрический сигнал. HJT в рассматриваемой оптической системе является теплоотводящим основанием для ЭГЛ и одновременно преобразовывает диффузное (рассеянное ЛК и отражённое ЭГЛ) СИ в электричество.

Всего в субмодуль устанавливалось две ЭГЛ. Линейка, устанавливаемая в субмодуль, имеет габаритные размеры 0.5 cm × 10 cm. Для увеличения фотогенерируемого тока линейка формировалась путем параллельного соединения 18 трёхпереходных GaInP/GaAs/Ge СЭ. Максимальное значение КПД составляло 29 %. Далее L_1 и L_2 – обозначения ЭГЛ.

Разориентационные характеристики тока короткого замыкания последовательно или параллельно соединенных между собой ЭГЛ, а также L_1 и L_2 представлены на рисунке 20. Угол разориентации представляет собой угол наклона субмодуля относительно угла падения светового пучка (который составляет 90° к поверхности линзы).

При углах разориентации от 0° до 8° ЭГЛ еще генерируют фототок, падающий с ростом угла разориентации. Максимальные значения фототока

достигались при подключении линеек параллельно. При падении света под углом отличным от 90° на поверхность линзы (разориентация больше 0°) происходит уменьшение плотности падающего на линзу излучения и смещение сфокусированного ЛК излучения в оптической системе. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению фототока, генерируемого ЭГЛ, с возрастанием отражённой (диффузной) составляющей и уменьшением сконцентрированного СИ.

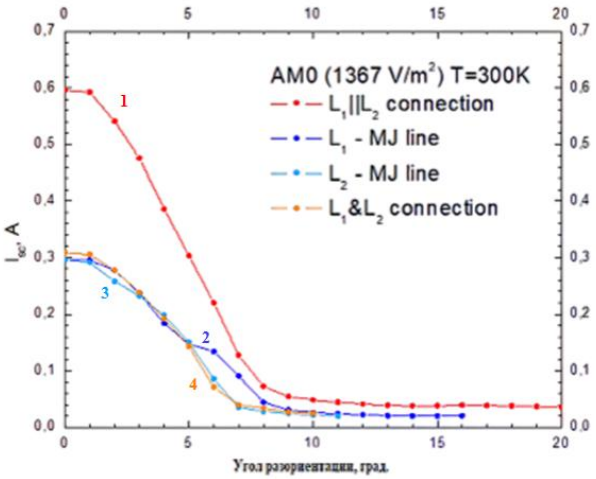


Рисунок 20. Разориентационные характеристики ЭГЛ:
1 – параллельное соединение L_1 и L_2; 2 – L_1; 3 – L_2; 4 – последовательное соединение L_1 и L_2.

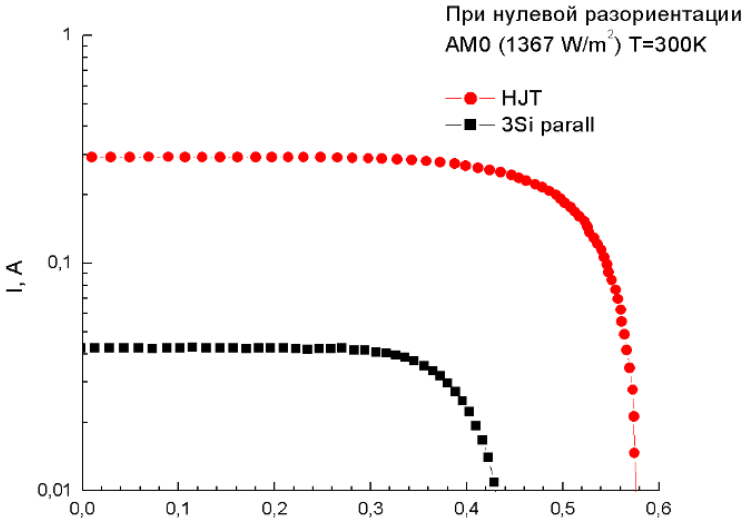
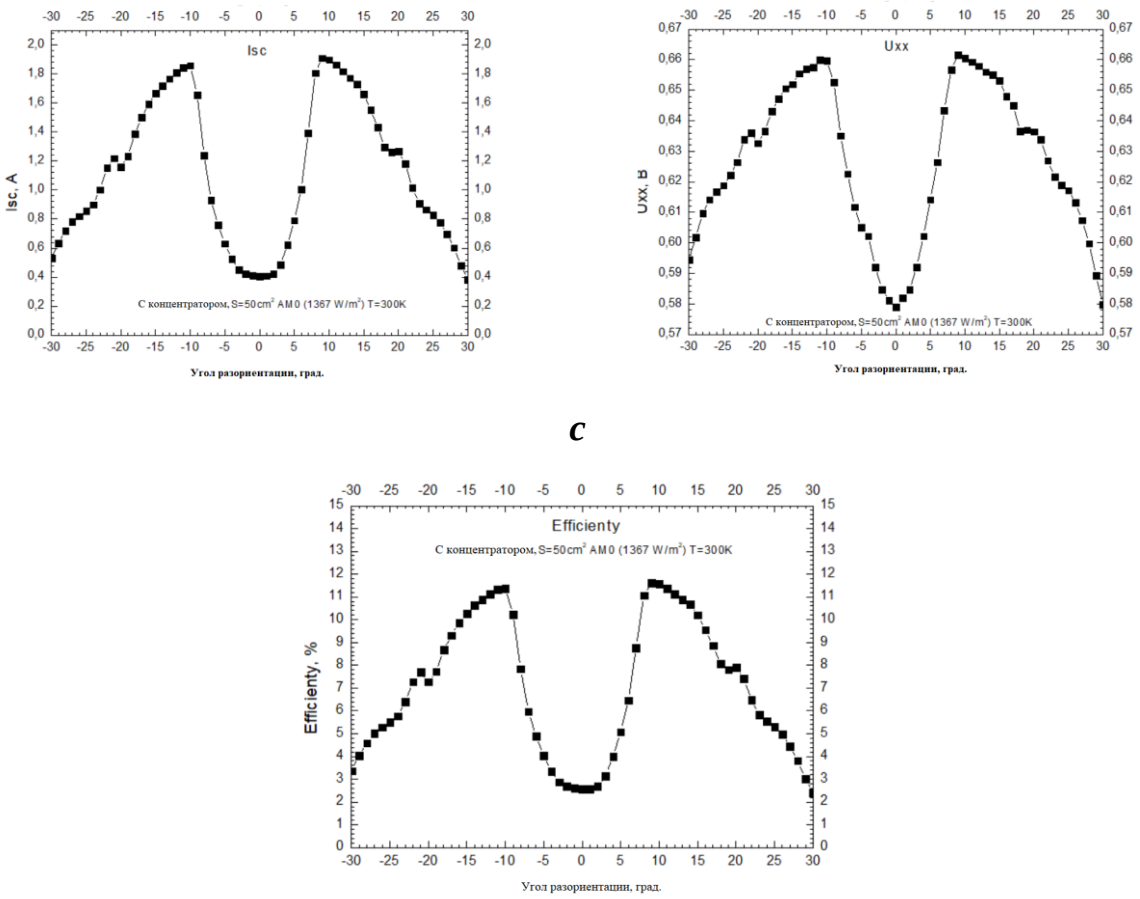


Рисунок 21. Световые ВАХ ТО с 3-мя параллельно соединенными диффузионными Si СЭ и HJT СЭ соответственно в субмодулях 1 и 2, при нулевом угле разориентации.

Улучшение эффективности преобразования диффузного излучения в субмодуле 2 при нулевом угле разориентации можно наглядно видеть на рисунке 21. ТО на основе HJT СЭ способны более эффективно преобразовывать диффузное излучение при нулевом угле разориентации в рассматриваемой оптической системе. При этом за счёт наличия HJT СЭ ТО повышается эффективность субмодуля в целом, а тепловые потери снижаются.

Разориентационные характеристики HJT СЭ ТО в субмодуле 2 представлены на рисунке 22.

a ***b***



c

Рисунок 22. Разориентационные характеристики HJT СЭ в субмодуле 2 (***a***) – тока короткого замыкания, (***b***) – напряжения холостого хода, (***c***) – КПД.

Анализируя полученные зависимости, можно прийти к выводу, что при увеличении угла разориентации оптической системы в плоскости

перпендикулярной фокусу линейной линзы Френеля до ±30°, в диапазоне углов разориентации от ±8º до ±30° основной вклад в выходную электрическую мощность начинают давать HJT Si СЭ, тогда как ЭГЛ в данном диапазоне углов разориентации снижают свою эффективность (рис.20). Максимальные значения параметров для HJT СЭ достигаются при углах разориентации ± 9º. При увеличении угла разориентации линейный фокус линзы Френеля смещается со снижением плотности света падающего на ЭГЛ. В это же время возрастает интенсивность света, падающего на HJT СЭ.

Сравнение разориентационных характеристик тока короткого замыкания HJT СЭ и трёх параллельно соединенных диффузионных Si СЭ в субмодулях 1 и 2 представлено на рисунке 23. Видно, что в HJT СЭ наблюдается улучшение эффективности преобразования солнечного излучения не только в условиях нулевой разориентации, но и во всем диапазоне углов 0-25°. Значения тока короткого замыкания HJT СЭ ~ на 72% выше, чем при использовании Si СЭ, во всем диапазоне углов разориентации.

Разориентационные характеристики субмодулей 1 и 2 могут быть представлены в виде графиков на рисунке 24 (кривые 3,4). Следует отметить разницу в структурах используемых ЭГЛ (и соответственно их фотовольтаических характеристиках и параметрах), а, следовательно, и в разориентационных характеристиках в диапазоне углов до $\pm 8^0$. Экспериментальные кривые (рис. 24) отображают нормированные на максимальные значения изменения напряжения холостого хода и тока короткого замыкания в условиях разориентации оптической системы перпендикулярно линейному фокусу линзы Френеля. При параллельном соединении ЭГЛ и HJT СЭ субмодуль 2 даёт выигрыш по току короткого замыкания по сравнению с субмодулем 1 в области углов разориентации, где трёхпереходные СЭ становятся малоэффективны, т.е. более 7^0. Дополнительным преимуществом субмодуля 2 является то, что HJT СЭ могут работать эффективнее даже в условиях низкой освещённости. Это

связано со снижением влияния поверхностной рекомбинации носителей заряда. Максимальное снижение U_{oc}, когда реализуется последовательное соединение ЭГЛ и HJT СЭ или Si СЭ, составляет менее 0.14% в пределах ±30°(кривые 5,6).

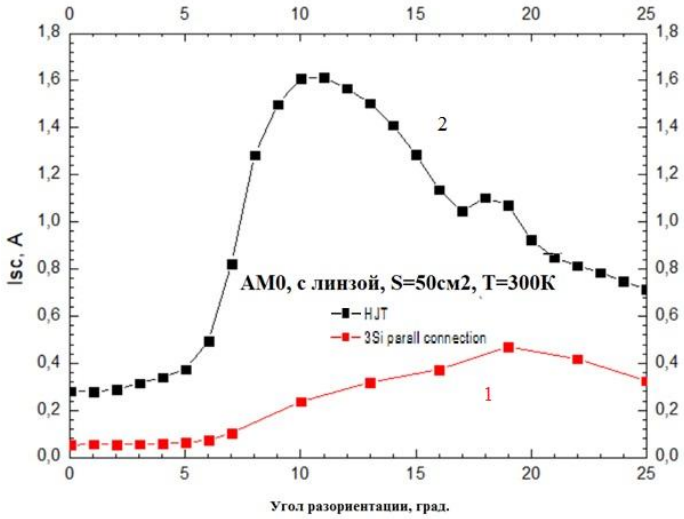


Рисунок 23. Разориентационные характеристики тока короткого замыкания ТО с тремя параллельно соединенными Si СЭ и HJT СЭ в субмодулях 1 и 2, соответственно.

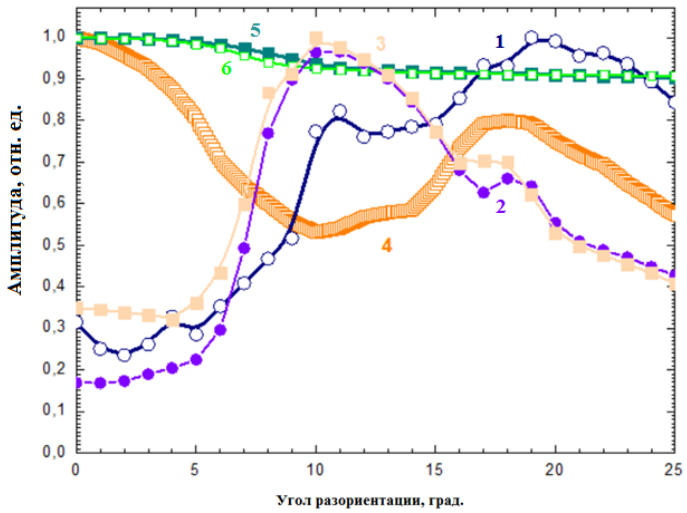


Рисунок 24. Разориентационные характеристики оптической системы – сдвоенной линзы Френеля и ГСЭ с боковыми отражателями: I_{sc} - Si СЭ в субмодуле 1 - (кривая 1), I_{sc} - HJT СЭ в субмодуле 2 - (кривая 2); I_{sc} - параллельно соединенных ЭГЛ с HJT СЭ в субмодуле 2 - (кривая 3), I_{sc} - параллельно соединённых ЭГЛ с Si СЭ в субмодуле 1 - (кривая 4);

$\boldsymbol{U_{oc}}$ при последовательном соединении ЭГЛ и Si СЭ в субмодуле 1 - (кривая 5), U_{oc} при последовательном соединении ЭГЛ и HJT СЭ в субмодуле 2 - (кривая 6).

ТО на основе HJT СЭ обеспечивает при нулевой разориентации на импульсном ИСИ (AM0, 1367 W/m^2) удельную мощность ≥ 24 W/m^2, что в несколько раз превышает электрическую мощность, обеспечиваемую ТО с тремя фотоактивными кремниевыми интегрированными диффузионными Si СЭ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Впервые разработаны и исследованы фотоэлектрические характеристики космических гибридных солнечных элементов на основе GaInP/Ga(In)As/Ge и гетеропереходных кремниевых СЭ при кратности концентрации СИ < 10 Солнц спектра AM0, 1367 W/m^2.

2. Фотоактивное ТО на основе HJT СЭ обеспечивает при нулевой разориентации на импульсном имитаторе СИ (AM0, 1367 W/m^2) дополнительную независимую удельную мощность ≥ 24 W/m^2.

3. Получено хорошее соответствие расчётных и экспериментальных данных, описывающих деградацию фотовольтаических характеристик шести различных структур HJT СЭ при облучении потоками 1 MeV электронов в диапазоне флюенсов (2.5 - 10)$\cdot 10^{14}$ cm^{-2}. Установлено, что в результате облучения 1 MeV электронами флюенсом до $1\cdot 10^{15}$ cm^{-2} рост диффузионного тока «насыщения» на два порядка и более вызывает значительное снижение КПД и вырабатываемой мощности HJT СЭ.

4. Более радиационно-стойкими являются образцы СЭ структур, выращенные на подложках *p*-типа, причем наиболее стойкими и обладающими более высокими значениями КПД до и после облучения являются HJT СЭ структур *n-α-Si:H/c-p(Ga)/p-a-Si:H* и *n-μc-Si:H/c-p(Ga)/p-a-Si:H* (***C*** и ***D***, соответственно). Эти структуры имели наименьший рост токов насыщения диффузионного механизма токопрохождения (с $J_{0d} < 5 \cdot 10^{-13}$ A/cm^2 до $J_{0d} < 3 \cdot 10^{-12}$ A/cm^2). Снижение внешней квантовой эффективности составило < 25% (λ = 0.35−1.2 μm), тока короткого замыкания I_{sc} < 16%, напряжения холостого хода U_{oc} < 19% и КПД с ≤ 19.2 до ≤ 13.6%.

5. Структуры на подложке *n*-типа (***E*** и ***F***) испытывают критическое снижение КПД на 98% после облучения флюенсом 1 MeV электронов $1\cdot 10^{15}$ cm^{-2}. Это вызвано облучением с фронтальной стороны HJT СЭ с *p-n* переходом, формируемым с тыльной стороны. Возможным объяснением причины такого поведения может служить дефект с энергией активации 0.18 eV, концентрация которого растёт с увеличением флюенса [28].

6. Коэффициент деградации для структур *n-α-Si:H/c-p(Ga)/p-a-Si:H* и *n-μc-Si:H/c-p(Ga)/p-a-Si:H* HJT СЭ в диапазоне флюенсов (2.5 - 10)$\cdot 10^{14}$ cm^{-2} составил K_L = (4 - 10)$\cdot$ 10^{-12}, а для *n-α-Si:H/c-n(P)/p-a-Si:H* - $8 \cdot 10^{-8}$.

7. Оценка радиационной стойкости показала, что коэффициент деградации HJT СЭ при облучении 1MeV электронами на порядок меньше, чем у космических кремниевых солнечных элементов ($\boldsymbol{K}_L=5 \cdot 10^{-11}$), что обеспечивает возможность их применения в космическом пространстве.

8. HJT СЭ также показали невысокие значения температурных коэффициентов параметров. Так, температурный коэффициент КПД HJT СЭ, структур *n-α-Si:H/c-p(Ga)/p-a-Si:H* и *n-μc-Si:H/c-p(Ga)/p-a-Si:H* (***C*** и ***D***, соответственно) в начале срока службы ≃ -0.03÷-0.04 и имеет тенденцию к уменьшению на ≤ 30% при облучении до значений флюенса 1 MeV электронов $1 \cdot 10^{15}$ cm^{-2}.

9. Снижение тока короткого замыкания и КПД HJT СЭ, как для необлученных, так и для облученных образцов после термоциклирования, составило менее 10% для исследуемых структур A-D. Для структур E-F n-типа, практически полностью деградировавших после облучения, наоборот, наблюдается подъем тока короткого замыкания, но не более, чем на 18%, а КПД не более, чем на 38%. Возможной причиной такого изменения характеристик, является отжиг радиационных дефектов в исследованных образцах при термоциклировании. Таким образом, экспериментально показана хорошая устойчивость HJT СЭ к резкому перепаду температур, неизбежно встречающемуся в космосе.

10. HJT СЭ, в качестве теплоотводящего основания в составе космического субмодуля, в условиях нулевой разориентации на выходе дает электрический сигнал порядка 300мА, что в ~ 7 раз превосходит показания 3-х диффузионных Si СЭ, монтированных на кремниевое теплоотводящее основание.

11. ТО на основе HJT СЭ при нулевой разориентации независимо генерируют мощность ≤ 24 W/m^2 при нулевой разориентации оптической

системы, что в 6 раз выше, чем при использовании в субмодуле ГСЭ с интегрированными Si СЭ в кремниевое теплоотводящее основание (≤ 4 W/m^2). Более высокая производительность HJT СЭ достигается за счёт ряда технологических решений. Например, осаждение тонких аморфных слоёв высококачественного кремния, пассивирующих поверхность монокристаллической подложки (то есть уменьшающих поверхностные рекомбинационные потери) и образующих с ней гетеропереход. Текстурирование подложки применяется для улучшения поглощения света. В результате увеличивается внешняя квантовая эффективность, ток короткого замыкания, напряжение холостого хода, мощность и КПД. К тому же, чисто конструктивно, удается увеличить фотоактивную поверхность преобразователя рассеянного (диффузного) излучения в условиях нулевой разориентации.

12. Усовершенствован процесс сборки и изготовления субмодуля с HJT СЭ ТО. В предыдущих разработках субмодуля с классическими Si СЭ на кремниевом теплоотводящем основании используется сложная и дорогостоящая технология для предотвращения инверсии проводимости поверхности трёх интегрированных кремниевых СЭ с ионным легированием бором с флюенсом F_i = (5,0 – 20)·10^{13}ion/cm^2, а для снижения токов утечки, между кремниевыми n+/p диодами, каждый кремниевый интегрированный солнечный элемент окружён сильнолегированными охранными кольцами p^+ типа (F_i – 1,9·10^{15}ion/cm^2).

13. Разработанный субмодуль с гибридным солнечным элементом и линзовым концентратором способен эффективно работать в условиях широкой угловой разориентации до ±30^0 с увеличенным сроком службы за счёт более высокой радиационной стойкости HJT СЭ по сравнению с классическими диффузионными кремниевыми солнечными элементами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

[1] A. Luque, S. Hegedus, Handbook of photovoltaic science and engineering (John Wiley & Sons, Ltd., 2003), p. 421.

[2] N. Gruginskie, F. Cappelluti, G.J. Bauhuis, P. Mulder, E. J. Haverkamp, E. Vlieg, J. J. Schermer. Electron radiation–induced degradation of GaAs solar cells with different architectures. Prog Photovolt Res Appl, **28**, 266–278 (2020). DOI: 10.1002/pip.3224

[3] V.S. Kalinovskii, E.V. Kontrosh, A.V. Andreeva, A.V. Malevskaya, V.M. Andreev, V.B. Malutina-Bronskaya, V.B. Zalesskiy, A.M. Lemeshevskaya, V.I. Kuzoro, V.I. Khalimanovich, M.K. Zayceva. CPV Module based on a Hybrid Solar Cell. AIP Conference Proceedings 2149, 030003 (2019).

[4] V.S. Kalinovskii, E.A. Ionova, A.V. Andreeva, E.V. Kontrosh, V.M. Andreev. Development and Investigation of Linear Fresnel Lens for Concentrator Space Solar Arrays. AIP Conference Proceedings 2149, 070007 (2019).

[5] M. Green, E. Dunlop, J. Hohl-Ebinger, M. Yoshita, N. Kopidakis, X. Hao. Prog Photovolt Res Appl. 2021; 29: 3– 15. https://doi.org/10.1002/pip.3371.

[6] V.S. Kalinovskii, E.V. Kontrosh, E.A. Ionova, E.G. Pavlova, E.G. Koksharov, V.M. Andreev. Study of misorientation characteristics of hybrid solar cell-doubled linear lens concentrator system. AIP Conf. Proc., v.2550 (2021).

[7] M. Yamaguchi, K. Lee, K. Araki, N. Kojima, Y. Okuno, M. Imaizumi. Analysis for Radiation Degradation of Advanced Si Space Solar Cells. Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2377–2380 (2019). DOI: 10.1109/PVSC40753.2019.8981219.

[8] H.Y. Tada, J.R. Carter, Jr., B.E. Anspaugh and R.G. Downing, Solar Cell Radiation Handbook Third Edition, (NASA and JPL, USA, 1982)

[9] A. Suzuki, “High-efficiency silicon space solar cels”, Solar Energy Materials and Solar Cells, 50, 289-303 (1998).

[10] E. Terukov, A. Kosarev, A. Abramov, E.Malchukova. From 11% thin film to 23% heterojunction technology (HJT) PV cell: Research, development and implementation related 1600 × 1000 mm2 PV modules in industrial production, in

Solar Panels and Photovoltaic Materials, Beddiaf Zaidi, Ed. (InTech Open, 2018, ch. 5) p. 158. DOI: 10.5772/intechopen.72061.

[11] W.M. Alkharasani, N. Amin, S.A. Shahahmadi, A.A. Alkahtani, Ili S. B. Mohamad, P. Chelvanathan, T.S. Kiong. A Comparative Study on p- and n-Type Silicon Heterojunction Solar Cells by AFORS-HET. Materials, **15**, 3508 (2022). DOI: 10.3390/ma15103508

[12] Е.В. Контрош; А.В. Малевская; Н.М. Лебедева; Е.А. Гребенщикова; Л.В. Контрош; Н.Д. Ильинская; В.С. Калиновский, Исследование фотоэлектрических характеристик многопереходных солнечных элементов, изготовленных одностадийным и двустадийным методом разделительного травления. Альтернативная энергетика и экология, т.19 (183), 2015, с. 70 - 75 http://dx.doi.org/10.15518/isjaee.2015.19.009

[13] В.С. Калиновский; Е.В. Контрош; Е.А. Гребенщикова; В.М. Андреев, Архитектура мезы и эффективность InGaP/Ga(In)As/Ge солнечных элементов. ЖТФ, т.91, 7, 2021, с. 1067 – 1074, http://dx.doi.org/10.21883/JTF.2021.07.50946.312-20

[14] Masuko, K. Achievement of More Than 25% Conversion Efficiency With Crystalline Silicon Heterojunction Solar Cell / K. Masuko, M. Shigematsu, T. Hashiguchi, D. Fujishima, M. Kai, N. Yoshimura, T. Yamaguchi, Y. Ichihashi, T. Mishima, N. Matsubara, T. Yamanishi, T. Takahama, M. Taguchi, E. Maruyama, S. Okamoto // IEEE Journal of Photovoltaics. – 2014. – Vol. 4(6). – P. 1433-1435

[15] Yoshikawa, K. Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26% / K. Yoshikawa, H. Kawasaki, W. Yoshida, T. Irie, K. Konishi, K. Nakano, T. Uto, D. Adachi, M. Kanematsu, H.i. Uzu, K. Yamamoto // Nature Energy. – 2017. – Vol. 2(5). – P. 17032

[16] Y. Liu, Y. Li, Y. Wu, G. Yang, L. Mazzarella, P. Procel-Moya, A. C. Tamboli, K. Weber, M. Boccard, O. Isabella, X. Yang, B. Sun, Materials Science and Engineering: R: Reports, **142** 100579 (2020). DOI: https://doi.org/10.1016/j.mser.2020.100579.

[17] W.M. Alkharasani, N. Amin, S. A. Shahahmadi, A. A. Alkahtani, I. S. Mohamad, P. Chelvanathan, T. Sieh Kiong, Materials, **15**(10) 3508 (2022). DOI: https://doi.org/10.3390/ma15103508.

[18] W. Long, S. Yin, F. Peng, M. Yang, L. Fang, X. Ru, M. Qu, H. Lin, X. Xu, Solar Energy Materials and Solar Cells, **231** 111291 (2021). DOI: https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111291

[19] H. Lin, M. Yang, X. Ru, G. Wang, S. Yin, F. Peng, C. Hong, M. Qu, J. Lu, L. Fang, C. Han, P. Procel, O. Isabella, P. Gao, Z. Li, X. Xu. Nat Energy, **8**, 789–799 (2023). DOI: 10.1038/s41560-023-01255-2.

[20] A.S. Abramov, D.A. Andronikov, S.N. Abolmasov, E.I. Terukov, Chapter 7. High-Efficient Low-Cost Photovoltaics, Silicon Heterojunction Technology: A Key to High Efficiency Solar Cells at Low Cost, (Springer Nature Switzerland: Springer Series in Optical Sciences, 2020), p. 113–132.

[21] M. Taguchi, ECS Journal of Solid State Science and Technology, **10** 025002 (2021). DOI: 10.1149/2162-8777/abdfb6

[22] V. Kanneboina, Microelectronic Engineering, **265** 111884 (2022). DOI: https://doi.org/10.1016/j.mee.2022.111884.

[23] В.М. Андреев, В.В. Евстропов, В.С. Калиновский, В.М. Лантратов, В.П. Хвостиков. ФТП, **43**(5), 671– 678 (2009). [V.M. Andreev, V.V. Evstropov, V.S. Kalinovsky, V.M. Lantratov, V.P. Khvostikov. Semiconductors, **43**(5), 644-651 (2009). DOI: 10.1134/S1063782609050200].

[24] В.С. Калиновский, Е.И. Теруков, Е.В. Контрош, В.Н. Вербицкий, А.С. Титов, Письма в ЖТФ, 44 (17), 95 (2018). DOI: 10.21883/PJTF.2018.17.46576.17283 [V.S. Kalinovskii, E.I. Terukov, E.V. Kontrosh, V.N. Verbitskii, A.S. Titov, Tech. Phys. Lett., 44, 801 (2018). DOI: 10.1134/S1063785018090067].

[25] И.Е. Панайотти, Е.И. Теруков. Письма ЖТФ, **45**(5), 9-12 (2019) DOI: 10.21883/PJTF.2019.05.47388.17612. [I.E. Panaiotti, E.I. Terukov. Tech. Phys. Lett., 45(3) 193-196 (2019). DOI: 10.1134/S106378501903012X].

[26] M. Yamaguchi. Journal of Applied Physics, **78**(3), 1476–1480 (1995). DOI:10.1063/1.360236.

[27] J. R. Srour, S. Othmer, K. Y. Chiu, and O. L. Curtis, Jr. Damage coefficients in low resistivity silicon. (1975) (https://ntrs.nasa.gov/citations/19750016785).

[28] О.П. Михайлов, А.И. Баранов, А.С. Гудовских, Е.И. Теруков, А.В. Кочергин, Н.Р. Костик, О.К. Атабоев. Исследование влияния облучения потоком электронов на фотоэлектрические и электрофизические свойства кремниевых гетероструктурных солнечных элементов. Письма в ЖТФ, **50**(2), 23-27 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.02.56979.19726.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1. Kalinovskii V.S., Terukov E.I., Abolmasov S.N., Prudchenko K.K., Kontrosh E.V., Tolkachev I.A., Kochergin A.V., Titov A.S., Ataboev O.K. Studies of Degradation Silicon Heterojunction Solar Cells by 1 MeV Electrons Irradiation. Appl. Sol. Energy, v.59(5), 2023, p. 604 – 611
2. В.С. Калиновский, Е.И. Теруков, К.К. Прудченко, А.А. Базелей, Е.В. Контрош, И.А. Толкачев, А.А. Титов. Исследования радиационной стойкости гетероструктурных кремниевых солнечных элементов. Письма ЖТФ, 49(16), 2023, с. 18 – 21. DOI: https://doi.org/10.21883/PJTF.2023.16.55962.19573.
3. Калиновский В.С., Теруков Е.И., Контрош Е.В., Прудченко К.К., Толкачев И.А., Кузоро В.И., Халиманович В.И. Концентраторный фотоэлектрический модуль из гибридных солнечных элементов на углепластиковой конструкции для солнечных батарей космических аппаратов. В сборнике: «Решетневские чтения». Материалы XXVII Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева. В 2-х частях. Красноярск, 2023. с. 81-84.

4. Kalinovskii V. S., Terukov E.I., Kontrosh E.V., Yuferev V.S., Prudchenko K.K., Terukova E.E., Tolkachev I.A., Koksharov E.G., Pavlova E.G., Chekalin A.V. Energy-informational hybrid photovoltaic converter of laser radiation. St. Petersburg. State. Polytech. Univ. J. Phys. Math., v.16, 1.2, 2023, p. 47 – 51

5. Prudchenko K.K., Terukova E.E., Kontrosh E.V., Tolkachev I.A., Koksharov E.G., Pavlova E.G., Kalinovskii V.S., Terukov E.I. Photovoltaic characteristics of HJT photo converters of laser radiation at a wavelength of 1064 nm. St. Petersburg. State. Polytech. Univ. J. Phys. Math., v.16, 1.2, 2023, p. 52 – 58

6. В.С. Калиновский, Е.И. Теруков, Ю.В. Ащеулов, Е.В. Контрош, В.С. Юферев, К.К. Прудченко, А.В. Чекалин, Е.Е. Терукова, И.А. Толкачев, С.Е. Гончаров, В.М. Устинов. Разработка и исследование макета автономной энергоинформационной станции атмосферной оптической линии связи. Письма ЖТФ, т.49, 2, 2023, с. 21 - 25 DOI: https://doi.org/10.21883/PJTF.2023.02.54281.19306

7. К.К. Прудченко, И.А. Толкачев, Е.В. Контрош, Е.А. Силантьева, В.С. Калиновский. Источник электрической энергии на основе Al0.8Ga0.2As/GaAs фотоэлектрического преобразователя и YPO4:Eu/(238Pu) радиолюминесцентного излучателя. ЖТФ, т.92, 12, 2022, с. 1875 – 1880 DOI: http://dx.doi.org/10.21883/JTF.2022.12.53754.199-22

8. K.K. Prudchenko, I.A. Tolkachev, E.A. Silantieva E.V. Kontrosh. Investigation of the characteristics of a radioisotope source based on a (Y)PO4/(238Pu) self-glowing crystal and an AlxGa(1-x)As/GaAs photovoltaic converter. J. Phys.: Conf. Ser., v.2103, 1, International Conference PhysicA.SPb/2021, 2021 DOI: http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2103/1/012195

СПИСОК ТЕЗИСОВ ДОКЛАДОВ

1. К.К. Прудченко, В.С. Калиновский; Е.И. Теруков, Е.В. Контрош, И.А. Толкачев, А.А. Базелей, В.Н. Вербицкий, А.А. Титов. «Резистивность высокоэффективных гетероструктурных кремниевых солнечных элементов к облучению 1MeV электронами». В книге (сборнике): ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ. Сборник трудов российской конференции, 2022, с. 55 – 56.
2. В.С. Калиновский, Е.И. Теруков, Е.В. Контрош, П.А. Белогуров, К.К. Прудченко, И.А. Толкачев, «Фотоэлектрические характеристики кремниевых HJT солнечных элементов в температурном диапазоне (80-350) К» // Разработка, производство, испытания и эксплуатация космических аппаратов и систем: тез. докл. науч.-техн. конф. молодых специалистов (Железногорск, 9–10 окт. 2023 г.) / АО «РЕШЕТНЁВ». Железногорск, 2023.
3. В.С. Калиновский, Е.И. Теруков, К.К. Прудченко, Е.В. Контрош, И.А. Толкачев, А.В. Кочергин, А.С. Титов, О.К. Атабоев, «Фотоэлектрические характеристики кремниевых HJT солнечных элементов в температурном диапазоне (80÷350)K», XIII Международная конференция «Аморфные и микрокристаллические полупроводники», 2023.
4. В.С. Калиновский, Е.И. Теруков, К.К. Прудченко, Е.В. Контрош , И.А. Толкачев, «Влияние флюенса 1 МэВ электронов на параметры высокоэффективных кремниевых гетеропереходных солнечных элементов», XIII Международная конференция «Аморфные и микрокристаллические полупроводники», 2023.
5. К.К. Прудченко, А.Л. Глазов, В.С. Калиновский, Е.В. Контрош, К.Л. Муратиков, «Исследования лазерным термоволновым методом тепловых свойств контактов полупроводник — керамика, спаянных пастами различных составов», тезисы докладов научной конференции

«ЭКБ и микроэлектронные модули». Российский форум «Микроэлектроника 2023», с. 313-314.