

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего  
образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

Рябцева Мария Владимировна

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ  
СВОЙСТВ ФОТОВОСПРИИМЧИВОЙ ЭЛЕКТРОГЕНЕРИРУЮЩЕЙ  
ЧАСТИ БАТАРЕИ СОЛНЕЧНОЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ  
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ  
ЭНЕРГОПИТАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Специальность  
1.3.11 Физика полупроводников

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:  
к.х.н. доцент Вагапова Наргиза Тухтамышевна

Москва, 2024

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## Актуальность темы исследования

Сегодня освоение космического пространства имеет большую значимость для развития различных сфер человеческой деятельности, науки и техники. Основным инструментом решения космических задач являются космические аппараты (КА) разнообразных конструкций, функционирование которых напрямую зависит от системы энергопитания. Характеристики этой системы и срок активного существования (САС) КА во многом определяет батарея солнечная (БС). Так для спутников, эксплуатируемых на высоких орбитах (например, на геостационарной орбите (ГСО)), БС должна непрерывно обеспечивать КА энергопитанием в течение (10 – 15) лет, ввиду высокой стоимости и сложности реализации запуска [1].

За последние десятилетия наблюдается повышенный интерес научно-технического сообщества к способам увеличения САС БС. Этот параметр определяется воздействием различных факторов космического пространства (ФКП), которые могут стать причиной аномалий в функционировании бортовой аппаратуры, например, нестабильность работы различных устройств, перебои с подачей электроэнергии от БС [2]. Особую роль играет радиация, которая имеет вклад в деградацию БС более 60 % от суммарного вклада всех ФКП. Это объясняет большое количество публикаций по исследованию способов восстановления выходных характеристик облученных фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) БС [3], [4].

Одним из таких способов является инжекционный отжиг, который реализуется за счет стимулированной люминесценции в полупроводниковой структуре ФЭП. Первое упоминание этого типа отжига использовалось уже в 1980-х годах [5]. Однако ввиду неэффективности инжекционного отжига для БС на основе  $Si$  и сложности получения надежных структур на основе  $GaAs$  в больших масштабах, развитие данного исследования было приостановлено. При этом область фотовольтаики стала развиваться в направлении модификации полупроводниковой структуры ФЭП: использование распределенных брэгговских отражателей в наиболее уязвимом каскаде [6], увеличение количества каскадов [7], создание эпитаксиальных структур со встроенными наноразмерными частицами [8] и другое. Сегодня не все перечисленные методы реализуемы на достаточном уровне в масштабах серийного производства и, к тому же, значительно усложняют конструкцию и технологию изготовления ФЭП. Поэтому разработчики при проектировании БС закладывают избыточную площадь фотовосприимчивой электрогенерирующей части (ФГЧ) с целью удержания необходимого для

функционирования КА уровня мощности до конца САС (с учетом влияния ФКП), что сказывается как на суммарном весе изделия, так и на его стоимости.

Ужесточение требований к надежности, стоимости, удельным электрическим и массогабаритным характеристикам современных БС КА стало причиной поиска альтернативных способов увеличения электрических характеристик БС КА. После демонстрации эффективности различных типов отжига [3], [4] поврежденных полупроводниковых структур возник вопрос применения отжига непосредственно в процессе эксплуатации БС. Это позволило возобновить исследование в области инжекционного отжига ФЭП на основе полупроводниковых материалов *AIIIIVB* [9], которые сегодня используются более чем на 80 % всех зарубежных и отечественных КА околоземного пространства [10].

По сравнению с термическим и фотоинжекционным отжигом, применяемыми в полупроводниковой промышленности, развитие научных исследований, посвященных тематике инжекционного отжига, находится на раннем этапе. Для определения эффективности рассматриваемого типа отжига необходимо знать степень деградации и восстановления многокаскадных ФЭП, что является неординарной задачей. Покаскадный анализ ФЭП (без изготовления отдельных образцов), основанный на известных подходах исследования оптических и фотоэлектрических явлений, включая измерение вольт-амперной характеристики (ВАХ), съемку спектров внешнего квантового выхода фотоотклика (ВКВФ) и электролюминесцентную спектроскопию, позволяет выявить изменение основных электрических параметров ФЭП в результате облучения и инжекционного отжига. Это дает возможность разработать экспериментально-расчетную модель схемы размещения ФЭП в составе БС с инжекционным отжигом за счет собственного ресурса, что меняет физический принцип работы БС. Оценка эффективности отжига позволяет выработать подход к определению оптимального режима функционирования БС КА с учетом инжекционного отжига. Все это способствует частичному восстановлению характеристик БС в конце САС без значительного утяжеления конструкции.

В связи с этим актуальной научной и практической задачей в космической фотоэнергетике является внедрение инжекционного отжига в конструкцию современных высокоэффективных БС КА, что позволит обеспечить космический комплекс требуемой мощностью на протяжении всего времени эксплуатации, увеличить энергомассовые характеристики БС на конец САС или продлить САС КА. Как следствие – снижение расхода редкораспространенных и дорогостоящих полупроводниковых материалов, а также сокращение объема космического мусора в околоземном пространстве.

Основная часть диссертации выполнена на базе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», отдельные экспериментальные исследования научной работы проведены на Акционерном обществе «Научно-производственное предприятие «Квант» (АО «НПП «Квант») в рамках внутреннего НИР «Энергия», утвержденного Приказом № 01-120 от 27.05.2022.

### **Цель и задачи исследования**

Целью настоящего исследования является разработать способ снижения негативного воздействия ионизирующего излучения на электрические параметры многокаскадных ФЭП на основе полупроводниковых материалов *AIII BV/Ge* БС в процессе эксплуатации КА.

Для достижения поставленной цели требуется решение следующих задач:

1. Исследование деградации каскадов на основе *InGaP*, *InGaAs*, *Ge* в составе полупроводниковой структуры ФЭП при воздействии ионизирующего излучения.

2. Разработка схемы подключения ФГЧ БС с возможностью применения инжекционного отжига многокаскадных ФЭП за счет стимулированной люминесценции полупроводниковой структуры *InGaP/InGaAs/Ge*.

3. Исследование степени восстановления каскада на основе *InGaAs* в составе полупроводниковой структуры ФЭП при воздействии инжекционного отжига.

4. Определение эффективного режима отжига многокаскадных ФЭП на основе полупроводниковых материалов *AIII BV/Ge* в зависимости от радиационных условий, в которых эксплуатируется БС КА.

### **Научная новизна**

1. Разработана модель расчета степени деградации величин  $I_{КЗ}$  и  $U_{ХХ}$  каскадов на основе *InGaP*, *InGaAs* и *Ge* в составе ФЭП, где используются результаты исследования оптических и фотоэлектрических явлений, что исключает необходимость изготовления дополнительных элементов, аналогичных каскадам ФЭП, и позволяет учитывать взаимное влияние слоев в структуре.

2. Разработан экспериментально-теоретический подход к определению эффективного режима инжекционного отжига ФЭП на основе полупроводниковых материалов *AIII BV/Ge* в зависимости от радиационных условий, в которых эксплуатируется БС.

3. Экспериментально-теоретическим методом определена величина скорости отжига *InGaAs* в составе трехкаскадного ФЭП в результате анализа фотоэлектрических явлений в полупроводниковой структуре.

4. Применен новый физический принцип работы БС и экспериментально подтверждена возможность использования инжекционного отжига облученных ФЭП в процессе функционирования БС.

5. Разработана и запатентована конструкция ФГЧ БС с применением стимулированной люминесценции в полупроводниковой структуре ФЭП для изменения характеристик прибора в конце САС.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

1. Разработанная модель расчета степени деградации величин  $I_{кз}$  и  $U_{хх}$  каскадов на основе *InGaP*, *InGaAs* и *Ge* в составе ФЭП позволяет определить наиболее уязвимый для ионизирующего излучения каскад.

2. Разработанная конструкция ФГЧ БС с применением стимулированной люминесценции в полупроводниковой структуре ФЭП при плотности тока инжекции ( $J_{инж}$ ) более 90 мА/см<sup>2</sup> через каждый год в течение не более 12,3 часов позволяет получить относительный выигрыш по мощности в конце САС до 15,5 % при эксплуатации КА в условиях ГСО. Данная разработка получила патент на полезную модель (RU219254U1). Акт о внедрении результатов кандидатской диссертации от 17.10.2023 г. представлен в приложении к диссертации.

3. Результаты работы потенциально применимы для любых КА с БС на основе многокаскадных ФЭП с полупроводниковой структурой *AlInBV/Ge*. Наиболее оправдано для перспективных КА с большим энергопотреблением (например, для современных спутников связи типа «Angosat-2», «Экспресс-АМ5», «Экспресс-АМ8», «Луч-5В», для Российской орбитальной служебной станции и другое), и, как следствие, с мощными энергоустановками и с БС большой площади.

### **Объекты и методы исследования**

В качестве объектов исследования выбраны многокаскадные ФЭП с полупроводниковой структурой *InGaP/InGaAs/Ge* производства АО «НПП «Квант», на основе которых была создана экспериментальная сборка (ЭС) с инжекционным отжигом. Площадь исследуемых ФЭП составляла 2,5 см<sup>2</sup>. Исследуемые ФЭП не были защищены радиационно-стойким стеклом. Использовались шунтирующие диоды на основе *Si*,

переключатели, коммутационные серебряные шины, текстолит, монтажный теплостойкий провод с изоляцией из фторопласта.

Для оценки степени деградации электрических параметров каскадов и всей структуры ФЭП исследовались их оптические и фотоэлектрические явления: измерялись световые ВАХ, проводилась электролюминесцентная спектроскопия и исследовались спектры ВКВФ. Измерение выходных характеристик ФЭП проводилось при комнатной температуре (25 °С) до и после облучения, а также после инъекционного отжига. ВАХ измерялись на импульсном имитаторе солнечного излучения при освещении в условиях, соответствующих нулевой эффективной массе атмосферного поглощения света  $AM0$  (1366,6 Вт/м<sup>2</sup>). Из измеренных ВАХ были определены следующие электрические параметры:  $I_{кз}$ ,  $U_{ХХ}$ , максимальная мощность ( $P_{\text{макс}}$ ), коэффициент полезного действия (КПД), коэффициент заполнения ВАХ ( $FF$ ). Плотность фототока каждого каскада ФЭП была получена из спектров ВКВФ. Для определения величины  $U_{ХХ}$  для каждого каскада использовались спектры электролюминесцентной спектроскопии  $InGaP$  и  $InGaAs$  каскадов ФЭП. Данный метод основан на регистрации спектральной зависимости интенсивности стимулированной люминесценции в результате излучательной рекомбинации неосновных носителей заряда (ННЗ) в прямозонном полупроводниковом материале. Для регистрации интенсивности спонтанной люминесценции каскадов ФЭП использовался спектрометр *Ocean Optics «USB 2000+»*. При этом ФЭП подключался к источнику питания, и на элемент подавалось напряжение прямого смещения. Сигнал регистрировался в диапазоне длин волн от 200 нм до 1100 нм.

В целях апробации модели расчета электрических параметров ФЭП до и после отжига, а также эффекта инъекционного отжига исследуемые ФЭП были облучены электронами с энергией 7 МэВ при флюенсе  $10^{15}$  см<sup>-2</sup> в Акционерном обществе «Научно-исследовательский институт приборов» (Россия).

Энергетическая зависимость потери энергии на образование структурных повреждений была смоделирована в среде *SPENVIS* [11]. Моделирование степени деградации ФЭП, расчет скорости инъекционного отжига и эффективного времени отжига облученных ФЭП проводилось в среде *Mathcad*.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Экспериментально-теоретическая модель расчета величин  $I_{кз}$  и  $U_{ХХ}$  каскадов на основе  $InGaP$ ,  $InGaAs$ ,  $Ge$  в составе фотоэлектрического преобразователя благодаря спектральным методам исследования учитывает взаимное влияние слоев полупроводниковой структуры, а моделирование изменения диффузионной длины

неосновных носителей заряда в результате воздействия радиации позволяет учесть деградацию *Ge* каскада. Расчет показывает высокую сходимость между экспериментально и теоретически полученными значениями: погрешность по величинам  $I_{кз}$  и  $U_{ХХ}$  фотоэлектрического преобразователя составляет менее 1 %.

2. Установлено, что по дозе структурных повреждений воздействие электронами с энергией 7 МэВ при флюенсе  $10^{15} \text{ см}^{-2}$  на фотоэлектрический преобразователь с полупроводниковой структурой *InGaP/InGaAs/Ge* можно сопоставить с воздействием протонов с энергией 0,93 МэВ при флюенсе  $10^{12} \text{ см}^{-2}$ . Это является наиболее губительным уровнем воздействия радиации в условиях космического пространства, поскольку наносит наибольший ущерб ограничивающему по току каскаду на основе *InGaAs*, что показал анализ спектров внешнего квантового выхода фотоотклика.

3. Разработанная экспериментальная сборка, меняющая принцип функционирования традиционной батареи солнечной, позволила продемонстрировать возможность частичного восстановления характеристик облученных фотоэлектрических преобразователей в составе батареи солнечной с параллельно-последовательным соединением элементов и цепей. Относительное восстановление мощности фотоэлектрических преобразователей, облученных электронами с энергией 7 МэВ и флюенсом  $10^{15} \text{ см}^{-2}$ , после 38,5 часов отжига при  $J_{инж}$  14,9 мА/см<sup>2</sup> составило 33,3 %.

4. Расчет эффективного времени отжига фотоэлектрических преобразователей на основе полупроводниковых материалов *АІІІВ* в зависимости от радиационных условий на эксплуатируемой орбите позволяет смоделировать изменение фотоэлектрических свойств каскадной структуры *InGaP/InGaAs/Ge*. На примере условий геостационарной орбиты моделирование показало, что проведение инжекционного отжига при  $J_{инж}$  выше 90 мА/см<sup>2</sup> через каждый год в течение не более 12,3 часов позволит получить относительный выигрыш по мощности в конце срока активного существования до 15,5 % для батареи солнечной космического аппарата.

### **Достоверность и обоснованность полученных результатов**

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечена проведением исследований, основанных на известных подходах к получению оптических и фотоэлектрических характеристик ФЭП, и использованием современных взаимодополняющих методов анализа и статистической обработки.

### **Личный вклад соискателя**

В диссертации представлены результаты исследований, выполненных лично соискателем в АО «НПП «Квант». Личный вклад соискателя состоит в непосредственном участии на всех этапах работы, включая определение цели и задач исследований, разработку методики экспериментальных исследований, создание экспериментальных образцов и ЭС, осуществление полного комплекса необходимых измерений по всем разделам работы, обработку, анализ и обобщение полученных результатов исследований, оформление результатов исследований в виде публикаций, научных докладов и патента на полезную модель.

### **Апробация результатов**

По результатам исследований, составляющих содержание диссертации, опубликовано 4 печатные работы в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК, 3 печатные работы в журналах, входящих в международные базы данных *Web of Science* и *Scopus*, 16 трудов конференций и тезисов докладов и 1 патент на полезную модель.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемых источников из 163 наименований и приложения. Работа изложена на 151 страницах, содержит 85 рисунков, 29 таблиц, 1 приложение.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность и определена цель работы, поставлены необходимые задачи для ее достижения, определены объект и предмет исследования, сформулированы методы решения поставленных задач, приведены основные положения, выносимые на защиту, научная новизна, а также указаны теоретическая и практическая значимости.

**В первой главе** приводится аналитический обзор литературы в области многокаскадных ФЭП космического назначения, описаны особенности конструкции и принцип их работы. Проанализированы литературные данные по влиянию ионизирующего излучения, приближенного к космическому, на электрические параметры ФЭП со структурой *InGaP/InGaAs/Ge*. Описываются различные варианты конструктивных изменений полупроводниковой структуры ФЭП с целью повышения их радиационной стойкости, включая использование распределенных брэгговских отражателей, квантовых нитей и ям, инвертированного метаморфного роста и увеличение числа каскадов. Эффективность применения этих конструктивных изменений представлена в анализе современных многокаскадных ФЭП на основе полупроводниковых материалов *AlInBV/Ge* космического назначения различных производителей. Также в работе изложены способы частичного восстановления выходных характеристик ФЭП за счет применения изотермического, изохорного, инжекционного типов отжига радиационно-индуцированных дефектов. Для реализации инжекционного отжига необходим только внешний источник питания, которым могут быть сами ФЭП, подключенные подобающим образом. В выводах по литературному обзору подчеркивается необходимость внедрения инжекционного отжига в современные БС космического назначения для повышения выходной мощности на протяжении САС.

**Во второй главе** приводится описание комплексных методов анализа степени деградации полупроводниковой структуры *AlInBV/Ge* многокаскадных ФЭП.

С точки зрения конструкции многокаскадные ФЭП имеют ограничения по току. Условно полупроводниковая структура многокаскадного ФЭП представляется как набор последовательно соединенных каскадов, между которыми располагаются туннельные диоды. Поэтому выходной ток многокаскадного ФЭП ограничивается каскадом, генерирующим ток минимальной величины, а выходное напряжение представляется как сумма напряжений каждого каскада [1]. Ввиду этого ограничения многокаскадных ФЭП принятый за стандарт метод исследования (измерение ВАХ) усложняет понимание роли каждого каскада. Для решения этой проблемы, некоторые исследователи используют

специально созданные элементы, аналогичные каскадам ФЭП [12], [13], что требует дополнительных затрат. Кроме того, исключение из структуры каких-либо слоев может оказывать влияние на результат. Например, как показано в [6], [14], в самой структуре многокаскадного ФЭП может возникать переотражение падающего излучения, что способно увеличить генерацию тока в верхних каскадах. К тому же, при формировании отдельных слоев структуры необходимо учитывать их взаимное влияние, которое возникает в процессе эпитаксиального роста, например, размытие границ между слоями.

В настоящей работе используются методы, основанные на известных подходах к получению оптических и фотоэлектрических характеристик ФЭП: ВАХ, ВКВФ, электролюминесцентная спектроскопия. В основе методики расчета  $U_{XX}$  каскадов лежит выражение, выведенное из соотношения спектральной взаимности [15], [16], которое связывает спектры ВКВФ и электролюминесцентной спектроскопии:

$$U_i(J_{инж}) = \varphi_{тепл} \cdot [\varphi_{ЭЛ_i}(J_{инж})] + \frac{E_{макс\ i}}{q} - 2 \cdot \varphi_{тепл} \cdot \ln(E_{макс\ i}) - \varphi_{тепл} \cdot Q_{внеш\ i} - \delta U, \quad (1)$$

где  $\varphi_{тепл}$  – тепловая энергия, эВ;

$\varphi_{ЭЛ_i}(J_{инж})$  – значение интенсивности электролюминесценции (ЭЛ)  $i$ -каскада ФЭП при заданной плотности тока инжекции, отн. ед.;

$J_{инж}$  – плотность тока инжекции при съемке спектра ЭЛ ФЭП, мА/см<sup>2</sup>;

$E_{макс\ i}$  – энергия при максимальной интенсивности ЭЛ, соответствующей  $i$ -му каскаду ФЭП, эВ;

$q$  – элементарный электрический заряд, Кл;

$Q_{внеш\ i}$  – ВКВФ для  $i$ -го каскада ФЭП при  $E_{макс\ i}$ , отн. ед.;

$\delta U$  – поправка по напряжению, В.

При этом

$$U_i^*(J_{инж}) = \varphi_{тепл} \cdot [\varphi_{ЭЛ_i}(J_{инж})] + \frac{E_{макс\ i}}{q} - 2 \cdot \varphi_{тепл} \cdot \ln(E_{макс\ i}) - \varphi_{тепл} \cdot Q_{внеш\ i}, \quad (2)$$

$$\delta U = \frac{1}{3} \left[ \sum_{i=3}^3 U_i^*(J_{\phi\ i}) - U_{XX\ ФЭП} \right], \quad (3)$$

где  $J_{\phi\ i}$  – плотность фототока  $i$ -каскада, полученного из спектров ВКВФ, мА/см<sup>2</sup>;

$U_{XX\ ФЭП}$  – напряжение холостого хода, полученное из ВАХ ФЭП, В.

На рисунке 1 представлены усредненные спектры ВКВФ до и после облучения ФЭП электронами с энергией 7 МэВ и флюенсом  $10^{15} \text{ см}^{-2}$ . Электроны с энергией 7 МэВ имеют большую глубину проникновения в полупроводниковую структуру, формируя области разупорядочения, в основном в диапазоне длин волн действия среднего каскада. Это показано спадом ВКВФ в базе каскада на основе *InGaAs* (рисунок 1). По дозе структурных повреждений и характеру повреждения полупроводниковой структуры воздействие электронов с энергией 7 МэВ на объект исследования можно сопоставить с воздействием протонов с энергией 0,93 МэВ при флюенсе  $10^{12} \text{ см}^{-2}$ . Воздействие протонов с энергией до 1 МэВ является наиболее губительным уровнем воздействия радиации в условиях космического пространства, поскольку наносит наибольший ущерб ограничивающему по току каскаду на основе *InGaAs* [17].

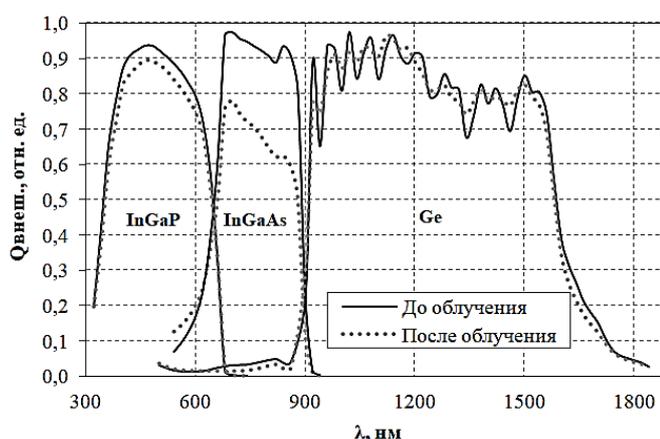


Рисунок 1 – ВКВФ ФЭП до и после облучения электронами с энергией 7 МэВ и с флюенсом  $10^{15} \text{ см}^{-2}$

В электролюминесцентной спектроскопии основную сложность представляет исследование *Ge* каскада, который ввиду своей непрямозонности, не способен люминесцировать в видимом диапазоне и для его изучения необходимо дорогостоящее оборудование. Поскольку вклад *Ge* каскада по напряжению наименьший относительно *InGaP* и *InGaAs* каскадов, то потери по напряжению рассматриваемого каскада незначительны. Поэтому данные по интенсивности ЭЛ для *Ge* каскада необлученного ФЭП были взяты из работы [18], где исследовались ФЭП с аналогичной структурой.

В среде *Mathcad* были смоделированы ВАХ ФЭП и отдельных каскадов (рисунок 2а). Был определен вклад каждого каскада по  $I_{кз}$  и  $U_{хх}$ . При сравнении теоретической и экспериментальной ВАХ была рассчитана погрешность моделирования электрических параметров. Для  $I_{кз}$  и  $U_{хх}$  погрешность составила менее 1 %, что говорит об адекватности модели расчета для рассматриваемых параметров.

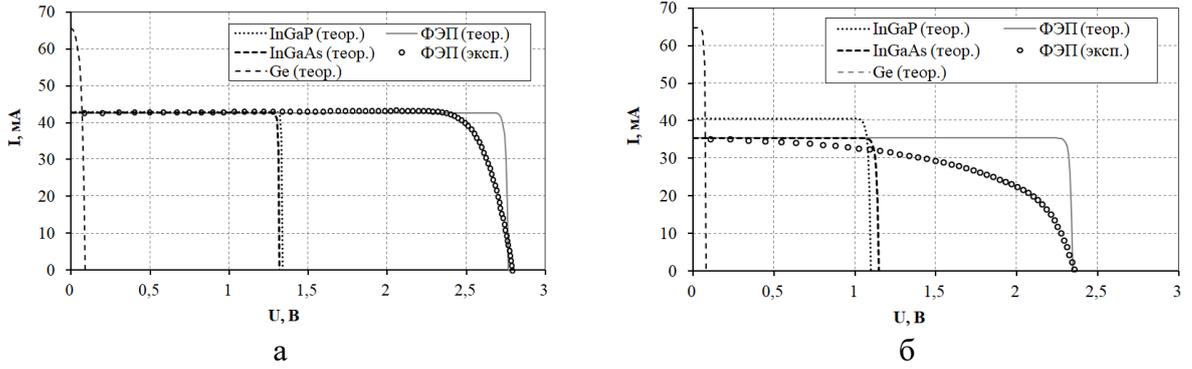


Рисунок 2 – Результаты моделирования ВАХ ФЭП: а – до облучения; б – после облучения

Расчет  $U_{XX}$  каскадов после облучения проводился аналогичным образом. Однако для расчета  $U_{XX}$  *Ge* каскада было определено значение диффузионной длины ННЗ после облучения по формуле [19]:

$$\frac{1}{L_{\phi}^2} = \frac{1}{L_0^2} + K_L \cdot \Phi, \quad (4)$$

где  $L_0$  – диффузионная длина ННЗ до облучения, см;

$L_{\phi}$  – диффузионная длина ННЗ после облучения, см;

$K_L$  – коэффициент деградации диффузионной длины ННЗ, отн. ед.;

$\Phi$  – флюенс воздействующих частиц, см<sup>-2</sup>.

Для использованного в работе уровня воздействия электронов величина  $K_L$  для *Ge* была найдена из [19] с учетом смоделированной в среде *SPENVIS* величины потери энергии на образование структурных повреждений ( $L_{стр}$ ). Тогда  $U_{XX}$  *Ge* каскада после облучения:

$$U_{XX\phi}^{Ge} = U_{XX0}^{Ge} - 2 \cdot \phi_{тепл} \cdot \ln \left( \frac{L_{n0}^{Ge} \cdot L_{p0}^{Ge}}{L_{n\phi}^{Ge} \cdot L_{p\phi}^{Ge}} \right), \quad (5)$$

где  $U_{XX0}^{Ge}$  – напряжение холостого хода *Ge* каскада до облучения, В;

$L_{n0}^{Ge}, L_{p0}^{Ge}$  – диффузионная длина электронов и дырок до облучения соответственно, см;

$L_{n\phi}^{Ge}, L_{p\phi}^{Ge}$  – диффузионная длина электронов и дырок после облучения соответственно, см.

В настоящей работе была получена следующая формула для определения  $\delta U$  с учетом напряжения, вырабатываемого *Ge* каскадом после облучения ФЭП:

$$\delta U = \frac{1}{2} \left[ \sum_{i=2}^2 U_i^*(J_{\phi i}) + U_{XX\phi}^{Ge} - U_{XX\text{ ФЭП}} \right]. \quad (6)$$

Анализ теоретической и экспериментальной ВАХ после облучения (рисунок 2б) показал, что погрешность для  $I_{кз}$  и  $U_{XX}$  составила менее 1 %, что соответствует высокой сходимости модели. Отмечено, что после облучения величина  $J_{кз}$  *InGaP* снижается от исходного значения на 5,3 %, *InGaAs* каскада – на 17,2 %, и *Ge* каскада – на 0,6 %. Величина  $U_{XX}$  *InGaP* каскада упала на 18,2 %, *InGaAs* каскада – на 12,8 %, *Ge* каскада – на 10,1 %.

Для  $P_{\text{макс}}$ , КПД,  $FF$  до облучения погрешность в относительных величинах составила 11,3 %, 11,2 %, 11,9 % соответственно. Для  $P_{\text{макс}}$ , КПД,  $FF$  после облучения погрешность в относительных величинах составила 37,2 %, 41,6 %, 41,9 % соответственно. В связи с этим по полученным данным можно лишь отдаленно оценить деградацию мощности каждого каскада. Для снижения погрешности рассмотренных величин необходимо учитывать изменение шунтирующего и последовательного сопротивлений, что требует дополнительных исследований.

Рассмотренная в работе методика не ограничивается размером исследуемых образцов, поскольку учитывает величину  $J_{\phi}$ , генерируемого каскадами и ФЭП. Кроме того, методика может быть применима для оценки деградации ФЭП в результате воздействия протонного облучения, что актуально в области проектирования БС КА различного назначения. Применение результатов работы в области создания ФЭП и элементов последующей защиты от радиации должно повысить надежность и САС БС.

**В третьей главе** рассмотрены особенности создания ФГЧ БС космического назначения в части использования каркасов, элементарных сборочных единиц (на основе ФЭП, радиационно-стойкого стекла, шунтирующего диода и коммутационных шин), развязывающего диода, а также способа коммутации (последовательного и параллельного соединения) элементарных сборочных единиц. Представлены результаты по модернизации привычной схемы подключения ФЭП в БС космического назначения, где часть БС выступает в качестве внешнего источника питания для проведения инжекционного отжига облученных в условиях космического пространства ФЭП БС.

Инжекционный отжиг способен частично восстановить электрические параметры облученного ФЭП за счет инъекции ННЗ в поврежденную полупроводниковую структуру, при этом высвободившаяся энергия в результате безызлучательной рекомбинации инжектированных ННЗ передается кристаллической решетке и способствует аннигиляции радиационно-индуцированных дефектов [20].

В рамках работы была создана ЭС из 15 ФЭП со структурой *InGaP/InGaAs/Ge* (рисунок 3). Ток, обеспечиваемый источником питания (области «1» и «2»), в 3 раза больше тока, генерируемого отжигаемой областью (область «3») в ЭС. Напряжение источника питания в 1,3 раза больше напряжения, вырабатываемого отжигаемой областью.

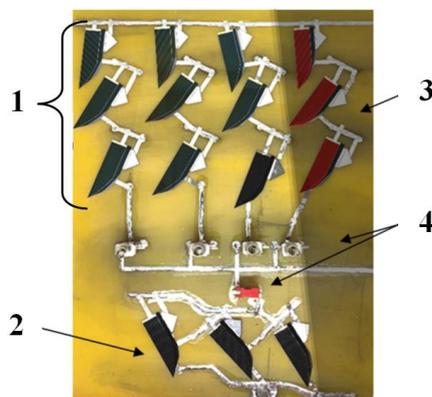


Рисунок 3 – ЭС с инжекционным отжигом: 1 – область для набора тока инжекции; 2 – область для набора напряжения; 3 – цепочка отжигаемых ФЭП (затенена на рисунке); 4 – переключатели

Для увеличения надежности каждый ФЭП защищен шунтирующим диодом для исключения пробоя при частичном затенении ЭС. Использование переключателей дает возможность отжига всех цепочек ЭС поочередно, а при необходимости отключить область «2», тогда области «1» и «3» будут работать в активном режиме и генерировать энергию для питания, например, бортовой аппаратуры КА. С целью увеличения  $J_{инж}$  представленная на рисунке 3 ЭС была изменена: количество цепочек в области «1» было увеличено на одну.

Величина плотности тока короткого замыкания ФЭП до облучения ( $J_{кз0}$ ) составила  $18,5 \text{ mA/cm}^2$ , после облучения электронами с энергией 7 МэВ при флюенсе  $10^{15} \text{ cm}^{-2}$  ( $J_{кз\phi}$ ) –  $15,4 \text{ mA/cm}^2$ . При сборке ФЭП, наблюдались потери по току и напряжению, что может быть связано с особенностями их коммутации при последовательном и параллельном подключении. Также большой вклад в потери вносит паразитное сопротивление контактных дорожек на основе олова. С учетом вышесказанного  $J_{инж}$  ЭС составила  $14,9 \text{ mA/cm}^2$ .

Для определения времени отжига ЭС в первом приближении, скорость инжекционного отжига при рабочей температуре БС  $75 \text{ }^\circ\text{C}$  была взята из [21] –  $1,1 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ . Эффективное время инжекционного отжига определялось из [21]:

$$t_{\text{отж}} = - \frac{\ln \left[ \frac{J_{\text{КЗ } \phi}^2 \cdot (J_{\text{КЗ } 0}^2 - J_{\text{КЗ } \text{отж}}^2)}{J_{\text{КЗ } \text{отж}}^2 \cdot (J_{\text{КЗ } 0}^2 - J_{\text{КЗ } \phi}^2)} \right]}{A^*}, \quad (7)$$

где  $J_{\text{КЗ } \text{отж}}$  – плотность тока короткого замыкания после отжига,  $\text{мА/см}^2$ ;

$A^*$  – скорость инжекционного отжига,  $\text{с}^{-1}$ .

Логично предположить, что величину  $J_{\text{КЗ } \text{отж}}$  каскада можно рассчитать на основе следующего выражения:

$$J_{\text{КЗ } \text{отж}} = J_{\text{КЗ } \phi} + (J_{\text{КЗ } 0} - J_{\text{КЗ } \phi}) \cdot (1 - p), \quad (8)$$

где  $p$  – доля дефектов, которые не подлежат восстановлению, отн. ед.

Для использованного в работе типа облучения ФЭП величина  $p$  составила 0,4. Расчеты проводились путем пересчета флюенса облучения в дозу структурных повреждений. При этом искомая величина определялась из зависимости, построенной на основе данных из работы [22], где рассчитывалась концентрация дефектов в результате отжига двухкаскадного ФЭП со структурой *InGaAs/Ge* протонами с энергией 150 кэВ и флюенсом в диапазоне от  $1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  до  $5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ .

Эффективное время инжекционного отжига при 75 °С (рабочая температура БС при освещении) составило 26,1 часов. Поскольку рабочая температура ЭС при экспериментальном инжекционном отжиге была низкой и составила 50 °С, то для усиления эффекта отжига время проведения процесса восстановления было пропорционально увеличено до 38,5 часов.

На рисунке 4а показана ВАХ отжигаемой области ЭС (область «3» на рисунке 3) после инжекционного отжига. В результате отжига величина  $I_{\text{КЗ}}$  отжигаемой цепи восстановилась на 3,3 %,  $U_{\text{ХХ}}$  – на 2,3 %, а  $P_{\text{макс}}$  – на 6,2 %.

Также были исследованы ВАХ отдельных ФЭП из отжигаемой цепи (рисунок 4б). После отжига наблюдалось повышение электрических параметров ФЭП, в частности величина  $I_{\text{КЗ}}$  выросла на 1,4 %,  $U_{\text{ХХ}}$  – на 5,2 %, а  $P_{\text{макс}}$  – на 33,3 %.

В результате исследования выходных характеристик ФЭП после отжига в течение 38,5 часов при температуре 50 °С и  $J_{\text{инж}}$  14,9  $\text{мА/см}^2$  по формуле (7) была оценена величина  $A^*$  для *InGaAs* в составе трехкаскадного ФЭП, что составило  $2,3 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ . В этом случае для максимально возможного восстановления тока эффективное время отжига должно составлять 516 часов, что не применимо для БС из-за требований, накладываемых системой энергообеспечения КА. Для снижения эффективного времени отжига или

повышения скорости отжига необходимо увеличить  $J_{инж}$  и температуру отжига. Тогда для *InGaAs* каскада при рабочей температуре БС 75 °С и  $J_{инж}$  90 мА/см<sup>2</sup> величина  $A^*$  составит  $2 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ , учитывая данные из работы [21] и результаты экспериментального отжига, полученные в настоящей работе.

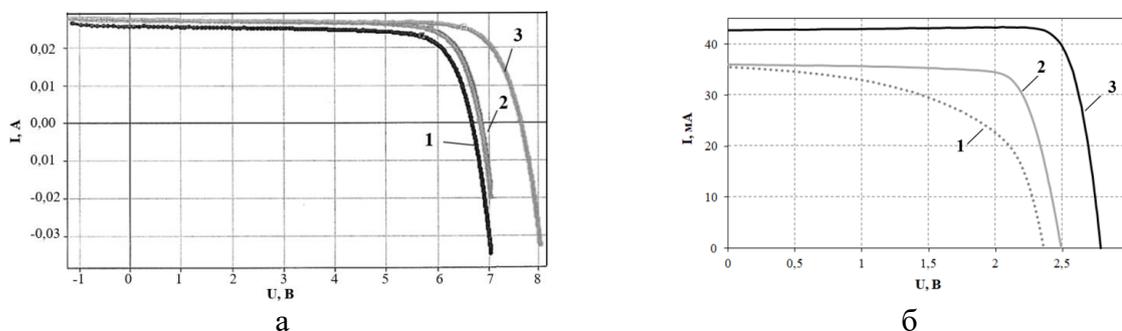


Рисунок 4 – ВАХ отжигаемой области ЭС в спектре *AM0* при температуре 25 °С (1 – после облучения электронами с энергией 7 МэВ и флюенсом  $10^{15} \text{ см}^{-2}$ ; 2 – после отжига в течение 38,5 часов и при  $J_{инж}$  14,9 мА/см<sup>2</sup>; 3 – до облучения): а – отжигаемой цепи ЭС; б – отдельного ФЭП отжигаемой цепи

В четвертой главе представлены деградационные кривые  $P_{\text{макс}}$  ФЭП современных производителей в зависимости от эквивалентного флюенса электронов с энергией 1 МэВ (рисунок 5). При воздействии электронов с флюенсом  $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  на ФЭП современных производителей деградация по  $P_{\text{макс}}$  в среднем составляет 13,7 %, что подтверждает важность прогнозирования радиационной стойкости БС при выборе режима инжекционного отжига.

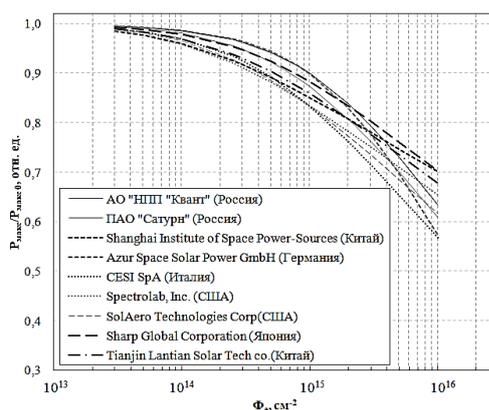


Рисунок 5 – Деградационная кривая  $P_{\text{макс}}$  ФЭП современных производителей

В работе рассчитывается режим отжига облученных многокаскадных ФЭП на основе полупроводниковых материалов *AlInBV/Ge*, который учитывает воздействие СВА, температуры и радиации на ФГЧ БС КА. Приводятся результаты расчетов оценки эффективности применения инжекционного отжига БС КА, аналогичной ЭС (рисунок 6).

Поскольку прогнозирование стойкости БС к ФКП – это комплексная инженерная задача, решение которой уникально для каждой орбиты, то в качестве исходных данных были использованы параметры ГСО. С учетом изменения  $J_{кз}$  на протяжении САС для повышения  $J_{инж}$  до  $(90 - 100)$  мА/см<sup>2</sup> необходимо увеличить количество цепочек в области «2» до 5 цепочек и в области «1» до 6 цепочек. Для повышения напряжения, генерируемого областями «1» и «2», с учетом этих же факторов необходимо увеличить количество ФЭП в каждой цепочке в области «1» в 2 раза. Тогда внешний вид ЭС будет соответствовать рисунку 6.

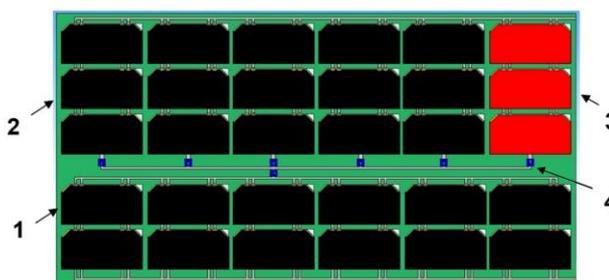


Рисунок 6 – ЭС с инъекционным отжигом: 1 – область для набора напряжения; 2 – область для набора  $J_{инж}$ ; 3 – цепочка отжигаемых ФЭП; 4 – переключатели

На рисунке 7а предложено два режима отжига – через каждый год и через каждые 5 лет. На рисунке 7б представлены деградационная кривая для  $P_{макс}$  соответственно без использования инъекционного отжига и при рассматриваемых режимах отжига. В основе моделирования эффективного времени отжига лежал расчет деградации ФЭП с применением *NRL*-метода [23] и формулы (7), (8) для учета изменения  $J_{кз}$ . Ввиду этого можно увидеть, что для БС КА, эксплуатируемого в условиях ГСО, большую эффективность имеет применение отжига через каждый год при  $J_{инж}$  90 мА/см<sup>2</sup> в течение не более 12,3 часов. Это позволит получить выигрыш  $P_{макс}$  в конце САС – 15,5 %. При этом инъекционный отжиг даже через каждый год будет стоить менее 8,5 % времени эксплуатации КА.

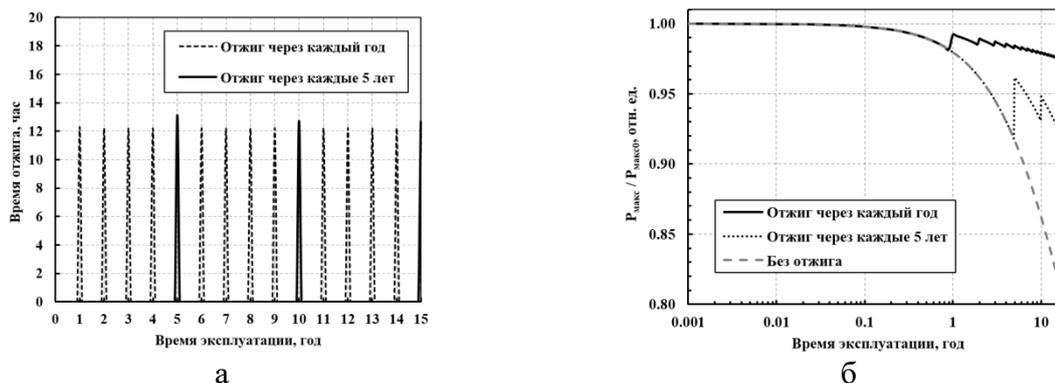


Рисунок 7 – Режим инъекционного отжига (а) и его влияние на  $P_{макс}$  БС (б)

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

В ходе подготовки диссертационной работы удалось достичь цели исследования и решить все поставленные задачи в полном объеме.

Были изучены методы оценки степени деградации многокаскадных ФЭП на основе полупроводниковых материалов *AIII BV/Ge*. В результате анализа была разработана модель расчета вклада каждого каскада в ВАХ ФЭП на основе известных подходов к получению оптических и электрических характеристик ФЭП (измерение ВАХ, ВКВФ и электролюминесцентная спектроскопия). Также разработана модель оценки степени деградации  $I_{кз}$  и  $U_{ХХ}$  каскадов на основе *InGaP*, *InGaAs*, *Ge* в составе полупроводниковой структуры ФЭП. Погрешность по величинам  $I_{кз}$  и  $U_{ХХ}$  ФЭП до облучения составила 0,4 %, 0,8 % соответственно, а для ФЭП после облучения – 0,4 %, 0,6 % соответственно, что показывает сходимость между экспериментально и теоретически полученными значениями.

В результате анализа спектров ВКВФ было установлено, что электроны с энергией 7 МэВ и флюенсом  $10^{15}$  см<sup>-2</sup> имеют большую глубину проникновения в полупроводниковую структуру, формируя области разупорядочения, в основном в диапазоне длин волн действия ограничивающего каскада на основе *InGaAs*. Это можно сопоставить с воздействием протонов с энергией 0,93 МэВ и флюенсом  $10^{12}$  см<sup>-2</sup>, что является наиболее губительным уровнем воздействия радиации на ФЭП в условиях космического пространства. Полученные результаты будут актуальны для разработчиков БС в части удешевления и уменьшения объема испытаний на радиационную стойкость БС.

Модернизация привычной схемы подключения ФЭП в БС позволила использовать часть БС в качестве внешнего источника питания для проведения инжекционного отжига облученных ФЭП БС. Работоспособность разработанных и изготовленных ЭС, прошедших испытание на воздействие электронов с энергией 7 МэВ и флюенс  $10^{15}$  см<sup>-2</sup>, была подтверждена.

Были изучены методы оценки степени восстановления многокаскадных ФЭП на основе полупроводниковых материалов *AIII BV/Ge*. В основе определения степени восстановления ФЭП рассматриваемого типа лежит анализ результатов исследования оптических и фотоэлектрических явлений (ВАХ, ВКВФ и электролюминесцентной спектроскопии) до и после осуществления инжекционного отжига. Разработанная ЭС, где применен новый физический принцип работы БС, показала восстановление облученных электроном (с энергией 7 МэВ и флюенсом  $10^{15}$  см<sup>-2</sup>) ФЭП в составе ЭС:  $P_{\text{макс}}$  при  $J_{\text{инж}}$  14,9 мА/см<sup>2</sup> после 38,5 часов отжига восстановилась на 33,3 %. Значение скорости

инжекционного отжига радиационных дефектов в материале среднего каскада на основе *InGaAs*, полученная в результате анализа фотоэлектрических явлений полупроводниковой структуры ФЭП, составило  $2,3 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ .

Определен научный подход к формированию эквивалентной схемы ФГЧ БС с инжекционным отжигом, учитывая условия на эксплуатируемой орбите в части воздействия температуры, СВА и радиации:  $J_{\text{инж}}$  более  $90 \text{ мА/см}^2$ , напряжение источника питания в 1,7 раз больше напряжения, генерируемого областью с отжигаемыми ФЭП. Также был разработан научный подход к определению эффективного режима отжига многокаскадных ФЭП на основе полупроводниковых материалов *AlInBV/Ge* в зависимости от радиационных условий, в которых эксплуатируется БС КА. Для БС КА, эксплуатируемого в условиях ГСО, применение стимулированной люминесценции в полупроводниковой структуре ФЭП при  $J_{\text{инж}}$  более  $90 \text{ мА/см}^2$  через каждый год в течение не более 12,3 часов позволит получить выигрыш по мощности в конце САС – 15,5 %.

По результатам работы опубликован цикл статей и проведен ряд устных выступлений на международных конференциях. Работа защищена патентом РФ.

Последующие развитие данной области космической фотоэнергетики возможно в направлении усовершенствования конструкции ФГЧ БС конкретного типа КА и его задач.

**Список работ по теме диссертации, в том числе опубликованных автором в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ и журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus:**

1 Наумова А. А., Лебедев А. А., Вагапова Н. Т., Каган М. Б., **Синева М. В. (Рябцева М. В.)** Особенности создания и результаты испытания экспериментальной солнечной батареи космического назначения с каркасом сотовой конструкции из углепластика (An experimental space-purpose solar cell with a carbon fiber honeycomb frame: features of development and test results) // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2020. – № 8. – С. 1 – 15.

2 **Рябцева М. В.**, Петров А. С., Воеводкин Г. С., Таперо К. И., Вагапова Н. Т., Баньковский М. В. Исследование воздействия электронов, нейтронов и гамма-квантов на выходные характеристики трехкаскадных фотоэлектрических преобразователей на основе *AlInBV/Ge* // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2021. – № 2. – С. 16 – 22.

3 Воеводкин Г. С., **Рябцева М. В.**, Бадурин И. В., Вагапова Н. Т., Логинова Е. С., Таперо К. И., Петров А. С. Адаптированная методика оценки радиационной деградации

фотоэлектрических преобразователей концентрированного солнечного излучения и их каскадов на базе InGaP, InGaAs и Ge // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2021. – № 3. – С. 5 – 10.

4 **Sineva M. V. (Ryabtseva M. V.)**, Voevodkin G. S., Vagapova N. T., Kagan M. B. Ways optimization of the electrical characteristics of multi-junction solar cells for space application // AIP Conference Proceedings. – 2021. – Vol. 2318. – No. 040009. – P. 1 – 5.

5 **Ryabtseva M. V.**, Petrov A. S., Voevodkin G. S., Tapero K. I., Vagapova N. T., Bankovsky M. V. Degradation of АПВV/Ge triple junction solar cells irradiated by gamma-rays, electrons and neutrons // Microelectronics Reliability. – 2021. – Vol. 125. – No. 114350. – P. 1 – 5.

6 **Рябцева М. В.**, Лебедев А. А., Наумова А. А., Болотин А. М., Вагапова Н. Т., Черенков П. Г. Анализ конструкций перспективных солнечных батарей космических аппаратов // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2022. – Вып. 3. – С. 1 – 26.

7 Солнечная батарея космического назначения с регенерацией эксплуатационных характеристик // Патент РФ № 219254. 2023. Бюл. № 19. / **Рябцева М.В.**, Бадури И.В., Вагапова Н.Т. [и др.]

8 Voevodkin G. S., **Ryabtseva M. V.**, Badurin I. V., Vagapova N. T., Loginova E. S., Tapero K. I., Petrov A. S. Improved method for radiation degradation studying of concentrated solar radiation converter subcells based on АПВV/Ge compounds // AIP Conference Proceedings, 2549 (2023) 050003.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Обзор современных фотоэлектрических преобразователей космического назначения на основе соединений АПВ / Е. В. Слыщенко, А. А. Наумова, А. А. Лебедев и др. // Сибирский журнал науки и технологий. – 2018. – Т. 19. – No. 2. – С. 308 – 324.

2 Экспериментальное исследование загрязняющего воздействия собственной внешней атмосферы на этапе орбитальной эксплуатации космического аппарата / А. Б. Надирадзе, В. А. Смирнов, И. А. Максимов и др. // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнева. Авиационная и космическая техника. – 2006. – С. 91 – 95.

3 Radiation hardness and post irradiation regeneration behavior of GaInAsP solar cells / R. Lang, J. Schön, J. Lefèvre et al. // Sol. Energy Mater. Sol. Cells. – 2020. – Vol. 211. – No. 110551.

4 Radiation resistance of high-efficiency InGaP/GaAs tandem solar cells / T. Takamoto, M. Yamaguchi, S.J. Taylor et al. // Sol. Energy Mater. Sol. Cells. – 1999. – Vol. 58. – No. 3. – P. 265–276.

5 Knechtli R. C., Loo R. Y., Kamath G. S. Accelerated annealing of gallium arsenide solar cells // US 4494302 A. – 1985.

6 Емельянов В. М., Калюжный Н. А., Минтаиров С. А. Многопереходные солнечные элементы с брэгговскими отражателями на основе структур GaInP/GaInAs/Ge // Физика и техника полупроводников. – 2010. – Т. 44. – Вып. 12. – С. 1649 – 1654.

7 Yasterebova N. V. High-efficiency multi-junction solar cells. // Centre for research in photonics. University of Ottawa. – 2007.

8 Enhanced Conversion Efficiency of III–V Triple-junction Solar Cells with Graphene Quantum Dots / T.-N. Lin, S. R. M. S. Santiago, J.-A. Zheng et al. // Scientific Reports. – 2016. – No. 6. – P. 39163.

9 Recovery of electron / proton radiation-induced defects in n+p AlInGaP solar cell by minority-carrier injection annealing / H. S. Lee, M. Yamaguchi, N. J. Ekins-Daukes // NASA/CP—2007. – P. 18–24.

10 Investigation on high-efficiency Ga<sub>0.51</sub>In<sub>0.49</sub>P/In<sub>0.01</sub>Ga<sub>0.99</sub>As/Ge triple-junction solar cells for space applications / L. Zhang, P. Niu, Y. Li et al. // AIP Advances. – 2017. – No. 7. – Vol. 12. – P. 125217.

11 SPENVIS: сайт. URL: <https://www.spervis.oma.be/> (дата обращения: 11.03.2021). – Текст: электронный.

12 Displacement damage dose and DLTS analyses on triple and single Junction solar cells irradiated with electrons and protons / C. Baur, R. Campesato, M. Casale et al. // IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference. – 2017.

13 Subcell light current-voltage characterization of irradiated multijunction solar cell / D. Walker, J. Nocerino, Y. Yue et. al // E3S Web of Conferences 16. – 2017. – P. 1 – 3.

14 Cascade optical coupling and quantum efficiency measurements of MJ SCs / S.A. Levina, V.M. Emelyanov, E.D. Filimonov et al. // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2020. – Vol. 213. – No. 110560.

15 Subcell I-V characteristic analysis of GaInP/GaInAs/Ge solar cells using electroluminescence measurements / S. Roensch, R. Hoheisel, F. Dimroth et al. // Appl. Phys. Lett. – 2011. – Vol. 98. – No. 251113.

16 Thorough subcells diagnosis in a multi- junction solar cell via absolute electroluminescence-efficiency measurements / C. Shaoqiang, L. Zhu, Y. Masahiro et al. // Scientific Reports. – 2015. – Vol. 5. – No. 7838. – P. 1 – 6.

17 A short review of radiation-induced degradation of III–V photovoltaic cells for space applications / J. M. Raya-Armenta, N. Bazmohammadi, J. C. Vasquez et al. // Solar Energy Materials & Solar Cells. – 2021. – Vol. 233. – No. 111379. – P 1–20.

18 Modeling of Radiation Induced Defects in Space Solar Cells / R. J. Walters, S. Messenger, J. H. Warner et al. // Proc. of SPIE. – 2011. – P. 7933.

19 NIEL analysis of radiation degradation parameters derived from quantum efficiency of triple-junction space solar cell / Sh. Sato, H. Miyamoto, M. Imaizumi et al. // 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference. – 2008.

20 Recovery of electron / proton radiation-induced defects in n+p AlInGaP solar cell by minority-carrier injection annealing / H. S. Lee, M. Yamaguchi, N. J. Ekins-Daukes // NASA/CP—2007. – P. 18–24.

21 Superior radiationresistant properties of InGaP/GaAs tandem solar cells / M. Yamaguchi, T. Okuda, S. J. Taylor et al. // Appl. Phys. Lett. – 1997. – Vol. 70. – P. 1566 – 1568.

22 Annealing Effects on GaAs/Ge Solar Cell after 150keV Proton Irradiation / M. Fang, T. Fei, M. Bai et al. // International Journal of Photoenergy. – 2020. – P. 1–8.

23 SCREAM: A new code for solar cell degradation prediction using the displacement damage dose approach / S.R. Messenger, E.M. Jackson, J.H. Warner et al. // 2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference. – 2010. – P. 001106–001111.