

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

На правах рукописи

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

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

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

Москва - 2024

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И СПЕЦИАЛЬНЫХ ТЕРМИНОВ

- АО «НПП «Квант» – Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Квант»
- АОП – антиотражающее покрытие
- БС – батарея солнечная
- ВАХ – вольт-амперная характеристика
- ВКВФ – внешний квантовый выход фотоотклика
- ВЭО – высокоэллиптическая орбита
- ГСО – геостационарная орбита
- ЕРПЗ – естественный радиационный пояс Земли
- ИМР – инвертированный метаморфный рост
- ИП – источник питания
- КА – космический аппарат
- КМВ – кварцевые микровесы
- КП – космическое пространство
- КПД – коэффициент полезного действия
- КЯ – квантовые ямы
- ННЗ – неосновной носитель заряда
- НОО – низкая околоземная орбита
- ОПЗ – область пространственного заряда
- ПАО «Сатурн» – Публичное акционерное общество «Сатурн»
- ПК – персональный компьютер
- РБО – распределенный брэгговский отражатель
- САС – срок активного существования
- СВА – собственная внешняя атмосфера
- ТПБ – тыльный потенциальный барьер
- ФГЧ – фотовосприимчивая электрогенерирующая часть
- ФКП – факторы космического пространства
- ФЭП – фотоэлектрический преобразователь
- ЭЛ – электролюминесценция
- ЭС – экспериментальная сборка
- ЭСЕ – элементарная сборочная единица
- АIIIВV* – бинарные соединения элементов *III* и *V* групп периодической системы элементов Д. И. Менделеева

$AlGaAs$ – арсенид алюминия-галлия
 Al_2O_3 – оксид алюминия
 $AM0$ – нулевая атмосферная масса
 As – мышьяк
 E_a – энергия активации инжекционного отжига
 E_c – зона проводимости
 E_d – пороговая энергия смещения атома
 E_g – ширина запрещенной зоны
 E_v – валентная зона
 FF – коэффициент заполнения ВАХ
 $GaAs$ – арсенид галлия
 Ge – германий
 $I_{кз}$ – ток короткого замыкания
 In – индий
 InP – фосфид индия
 $InGaAs$ – арсенид галлия-индия
 $InGaP$ – фосфид галлия-индия
 $J_{инж}$ – плотность тока инжекции
 $J_{макс}$ – плотность тока в точке максимальной мощности
 JPL – *Jet Propulsion Laboratory*, Лаборатория реактивного движения
 K_L – коэффициент деградации диффузионной длины неосновных носителей заряда
 $L_{стр}$ – потеря энергии на образование структурных повреждений
 NRL – *Naval Research Laboratory*, Лаборатория военно-морских исследований
 P – фосфор
 $P_{ист}$ – мощности внешнего источника излучения
 $P_{макс}$ – максимальная мощность
 Si – кремний
 SiO_2 – диоксид кремния
 $SPENVIS$ – *Space Environment Information System*, специальное программное обеспечение Европейского космического агентства
 TiO_x – оксид титана
 $U_{макс}$ – напряжение в точке максимальной мощности
 $U_{ХХ}$ – напряжение холостого хода

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|-----|
| Введение | 6 |
| Глава I. Аналитический обзор литературы | 16 |
| 1.1 Многокаскадные ФЭП космического назначения и принцип их работы | 16 |
| 1.2 Радиационная стойкость многокаскадных ФЭП | 19 |
| 1.3 Способы повышения радиационной стойкости ФЭП и БС | 24 |
| 1.3.1 Конструктивные изменения ФЭП | 25 |
| 1.3.2 Анализ литературных данных степени деградации современных многокаскадных ФЭП на основе полупроводниковых материалов <i>AIIIIV</i> для космического назначения | 32 |
| 1.3.3 Отжиг радиационных дефектов ФЭП | 46 |
| Глава II. Комплексные методы анализа степени деградации полупроводниковой структуры многокаскадных ФЭП на основе полупроводниковых материалов <i>AIIIIV/Ge</i> | 53 |
| 2.1 Объект исследования | 53 |
| 2.2 Описание эксперимента | 54 |
| 2.3 Оборудование | 54 |
| 2.4 Описание методики исследования | 61 |
| 2.5 Результаты эксперимента и их анализ | 66 |
| Глава III. Комплексные методы анализа степени восстановления полупроводниковой структуры | 75 |
| 3.1 Объект исследования | 75 |
| 3.2 Описание эксперимента | 84 |
| 3.3 Оборудование | 85 |
| 3.4 Описание методики исследования | 87 |
| 3.4.1 Оценка электрических параметров ИП ЭС | 87 |
| 3.4.2 Определение скорости отжига <i>InGaAs</i> методом электролюминесцентной спектроскопии | 89 |
| 3.4.3 Определение скорости отжига <i>InGaAs</i> на основе спектров внешнего квантового выхода фотоотклика | 92 |
| 3.5 Результаты эксперимента и их анализ | 94 |
| Глава IV. Режим отжига многокаскадных ФЭП на основе полупроводниковых материалов <i>AIIIIV/Ge</i> | 100 |
| 4.1 Объект исследования | 100 |

| | |
|--|-----|
| 4.2 Описание эксперимента | 100 |
| 4.3 Оборудование..... | 101 |
| 4.4 Описание методики исследования | 102 |
| 4.4.1 Оценка воздействия СВЧ на БС КА..... | 103 |
| 4.4.2 Оценка воздействия температуры на БС КА..... | 106 |
| 4.4.3 Оценка воздействия радиации на БС КА..... | 110 |
| 4.4.4 Оценка эффективности применения инъекционного отжига БС КА..... | 117 |
| 4.5 Результаты эксперимента и их анализ | 117 |
| 4.5.1 Оценка воздействия СВЧ на БС КА..... | 117 |
| 4.5.2 Оценка воздействия температуры на БС КА..... | 120 |
| 4.5.3 Оценка воздействия радиации на БС КА..... | 123 |
| 4.5.4 Оценка эффективности применения инъекционного отжига БС КА..... | 129 |
| Заключение..... | 131 |
| Публикации по теме диссертации..... | 133 |
| Список использованных источников..... | 138 |
| Приложение А (справочное) Акт внедрения результатов диссертации в АО «НПП «Квант» | 151 |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы

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 (РБО) 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 представленных в работе результатов заключается в следующем:

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 mA/cm^2 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 А.

3. Результаты работы потенциально применимы для любых КА с БС на основе многокаскадных ФЭП с полупроводниковой структурой $AIII BV/Ge$. 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 исследования 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 $2,5 \text{ cm}^2$. 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/м²). 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⁻² 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} 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} 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} см^{-2} , после 38,5 часов отжига при $J_{инж}$ 14,9 мА/см² 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/см² 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:

Основные результаты исследования докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

– Устный доклад. Н.Т. Вагапова, **М.В. Синева (М.В. Рябцева)**, Г.С. Воеводкин. Разработка универсальной методики исследования отдельных каскадов солнечных элементов космического назначения. XI Общероссийская конкурс научно-техническая конференция «Молодежь. Техника. Космос», V Всероссийский молодежный конкурс научно-технических работ «Орбита молодежи». 16 – 22 сентября, 2019, г. Санкт-Петербург, Россия.

– Устный доклад. **М.В. Синева (М.В. Рябцева)**, Г.С. Воеводкин, Н.Т. Вагапова. Универсальный метод оценки электрических параметров многокаскадных солнечных элементов. XXIII Международная научно-практическая конференция, посвященная памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика Михаила Федоровича Решетнева «Решетневские чтения». 11 – 15 ноября, 2019, г. Красноярск, Россия.

– Устный доклад. **М.В. Синева (М.В. Рябцева)**, Г.С. Воеводкин, Н.Т. Вагапова. Оценка электрических параметров многокаскадных солнечных элементов на базе спектральных методов исследования (Electric parameters of multijunction solar cells estimation using the spectral research methods). XLIV Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства «Королевские чтения». 28 – 31 января, 2020, г. Москва, Россия.

– Устный доклад. **М.В. Синева (М.В. Рябцева)**, Г.С. Воеводкин, Н.Т. Вагапова, А.С. Петров, М.В. Баньковский. Оценка степени деградации электрических и спектральных характеристик фотоэлектрических преобразователей на основе Al_{0.3}BV/Ge космического

назначения при воздействии электронного излучения. 23-я Всероссийская научно-техническая конференция «Радиационная стойкость электронных систем» – «Стойкость-2020». 22 – 23 сентября, 2020, г. Лыткарино, Россия.

– Устный доклад. **М.В. Рябцева**. Разработка системы повышения электрических характеристик солнечных элементов космического назначения в процессе их эксплуатации (The development of a system for increasing the electrical characteristics of space solar cells purposes during in-service life). VI-я Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «Орбита молодежи» и перспективы развития российской космонавтики». 28 – 30 сентября, 2020, г. Пермь, Россия.

– Устный доклад. И.В. Бадурин, **М.В. Рябцева**, Г.С. Воеводкин, Е.С. Логинова, Н.Т. Вагапова, А.А. Лебедев. Разработка методики исследования деградации многокаскадных фотоэлектрических преобразователей космического назначения. XLV Академические чтения по космонавтике посвященные памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства. 30 марта – 2 апреля, 2021, г. Москва, Россия.

– Устный доклад. Г.С. Воеводкин, **М.В. Рябцева**, И.В. Бадурин, Н.Т. Вагапова. Анализ воздействия электронов на фотоэлектрические параметры каскадов фотопреобразователей концентрированного солнечного излучения на основе АПВВ/Ge. XLV Академические чтения по космонавтике посвященные памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства. 30 марта – 2 апреля, 2021, г. Москва, Россия.

– Устный доклад. **М.В. Рябцева**, А.А. Наумова, А.А. Лебедев, А.М. Болотин, Н.Т. Вагапова. Анализ конструкций перспективных солнечных батарей космических аппарат. XLV Академические чтения по космонавтике посвященные памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства. 30 марта – 2 апреля, 2021, г. Москва, Россия.

– Устный доклад. **М.В. Рябцева**, А.С. Петров, Г.С. Воеводкин, К.И. Таперо, Н.Т. Вагапова, М.В. Баньковский. Degradation of АПВВ/Ge triple junction solar cells irradiated by gamma-rays, electrons and neutrons. 32th European Symposium on Reliability of Electron Devices, Failure Physics and Analysis. 4 – 8 октября, 2021, г. Бордо, Франция.

– Устный доклад. **М.В. Рябцева**, И.В. Бадурин, Н.Т. Вагапова. Солнечная батарея космического назначения с увеличенным сроком активного существования. XXII Научно-техническая конференция ученых и специалистов, посвященная 60-летию полета Ю. А. Гагарина, 75-летию ракетно-космической отрасли и основанию ПАО «РКК «Энергия». 8 – 12 ноября, 2021, г. Королев. Россия.

– Устный доклад. Е.С. Чуянова, **М.В. Рябцева**, М.А. Генали. Моделирование вольт-амперных характеристик фотоэлектрических преобразователей космического назначения с различными антиотражающими покрытиями. XXII Научно-техническая конференция ученых и специалистов, посвященная 60-летию полета Ю.А. Гагарина, 75-летию ракетно-космической отрасли и основанию ПАО «РКК «Энергия». 8 – 12 ноября, 2021, г. Королев, Россия.

– Устный доклад. И.В. Бадурин, **М.В. Рябцева**, Н.Т. Вагапова. Создание автоматизированной системы обработки результатов квалификационных испытаний солнечных батарей космического назначения на радиационную стойкость. 17-я ежегодная Молодежная конференция: «Новые материалы и технологии в ракетно-космической, авиационной и других высокотехнологичных отраслях промышленности». 8 –10 декабря, 2021, г. Звездный городок, Россия.

– Устный доклад. **М.В. Рябцева**, И.В. Бадурин, Н.Т. Вагапова. Разработка системы повышения ресурса солнечной батареи космического назначения. 17-я ежегодная Молодежная конференция: «Новые материалы и технологии в ракетно-космической, авиационной и других высокотехнологичных отраслях промышленности». 8 –10 декабря, 2021, г. Звездный городок, Россия.

– Устный доклад. Е.С. Чуянова, М.А. Генали, **М.В. Рябцева**, А.А. Лебедев, Н.Т. Вагапова. Оценка эффективности просветления многокаскадного фотоэлектрического преобразователя на начало и конец срока активного существования. XLVI Академические чтения по космонавтике посвященные памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства. 25 – 28 января, 2022, г. Москва, Россия.

– Устный доклад. И.В. Бадурин, **М.В. Рябцева**, Г.С. Воеводкин, Н.Т. Вагапова, Е.С. Логинова, К.И. Таперо, А.С. Петров. Методика оценки радиационной деградации многокаскадных фотоэлектрических преобразователей космического назначения на основе полупроводниковой структуры InGaP/InGaAs/Ge. Научно-технический сборник 25-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» – «Стойкость-2022». 7 – 8 июня, 2022, г. Лыткарино, Россия.

– Устный доклад. **М.В. Рябцева**, Н.Т. Вагапова. Разработка системы повышения ресурса солнечной батареи космического назначения (Development of a system for the resource increasing of the space solar battery). Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «Орбита молодежи» и перспективы развития российской космонавтики», 19 – 23 сентября, 2022, г. Калуга, Россия.

– Устный доклад. И. В. Бадурин, **М. В. Рябцева**, Н. Т. Вагапова. Прогнозирование радиационной стойкости каскадов фотоэлектрического преобразователя со структурой InGaP/InGaAs/Ge. Отраслевая научно-техническая конференция «Космонавтика XXI века. Памяти академика В. Ф. Уткина». 15 – 16 февраля, 2023, г. Королев, Россия.

– Устный доклад. Е. С. Чуянова, **М. В. Рябцева**, А. А. Лебедев, М. А. Генали. Оценка вклада просветления в радиационную стойкость фотоэлектрического преобразователя космического назначения. Отраслевая научно-техническая конференция «Космонавтика XXI века. Памяти академика В.Ф. Уткина». 15 – 16 февраля, 2023, г. Королев, Россия.

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.

Глава I. Аналитический обзор литературы

1.1 Многокаскадные ФЭП космического назначения и принцип их работы

Одной из важных составляющих КА является бортовая энергетика, в частности БС. В настоящее время для создания БС космического назначения наиболее перспективными являются трехкаскадные ФЭП на основе гетероструктур *InGaP/InGaAs/Ge*. БС на основе таких ФЭП имеют КПД от 26 % до 31 % в спектре *AM0*, где интенсивность излучения составляет 1366,6 Вт/м² [12].

Многокаскадная полупроводниковая структура ФЭП обеспечивает наиболее эффективное преобразование спектра поглощения за счет использования материалов с различной шириной запрещенной зоны (E_g), каждый из которых эффективно работает в соответствующей области спектра (рисунок 1):

- *InGaP* – в спектральном диапазоне ~ (300 – 700) нм;
- *InGaAs* – в спектральном диапазоне ~ (700 – 900) нм;
- *Ge* – в спектральном диапазоне ~ (900 – 1800) нм.

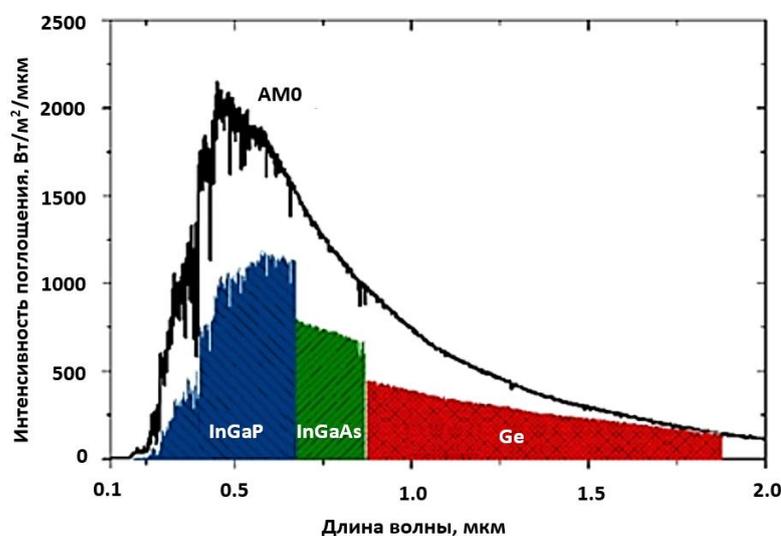


Рисунок 1 – Спектральное распределение интенсивности поглощения солнечного излучения спектра *AM0* для трехкаскадных ФЭП [13]

Для понимания толщины и очередности расположения полупроводниковых слоев на рисунке 2 показано схематическое изображение архитектуры современного трехкаскадного ФЭП на основе *InGaP/InGaAs/Ge* [14].

Каждый каскад состоит из двух слоев – базы (слой *p*-типа) и эмиттера (слой *n*-типа). В этих слоях осуществляется прямое преобразование энергии, переносимой оптическим излучением, в электрическую энергию.

Туннельные диоды представляют собой *p-n*-переходы, на основе вырожденных полупроводников. Следует отметить, что диоды включены в обратном направлении относительно полярности каскадов ФЭП, как показано на рисунке 2. Туннельные диоды обеспечивают согласование каскадов, что позволяет наиболее полно собрать сгенерированные в каскадах носители заряда [1].

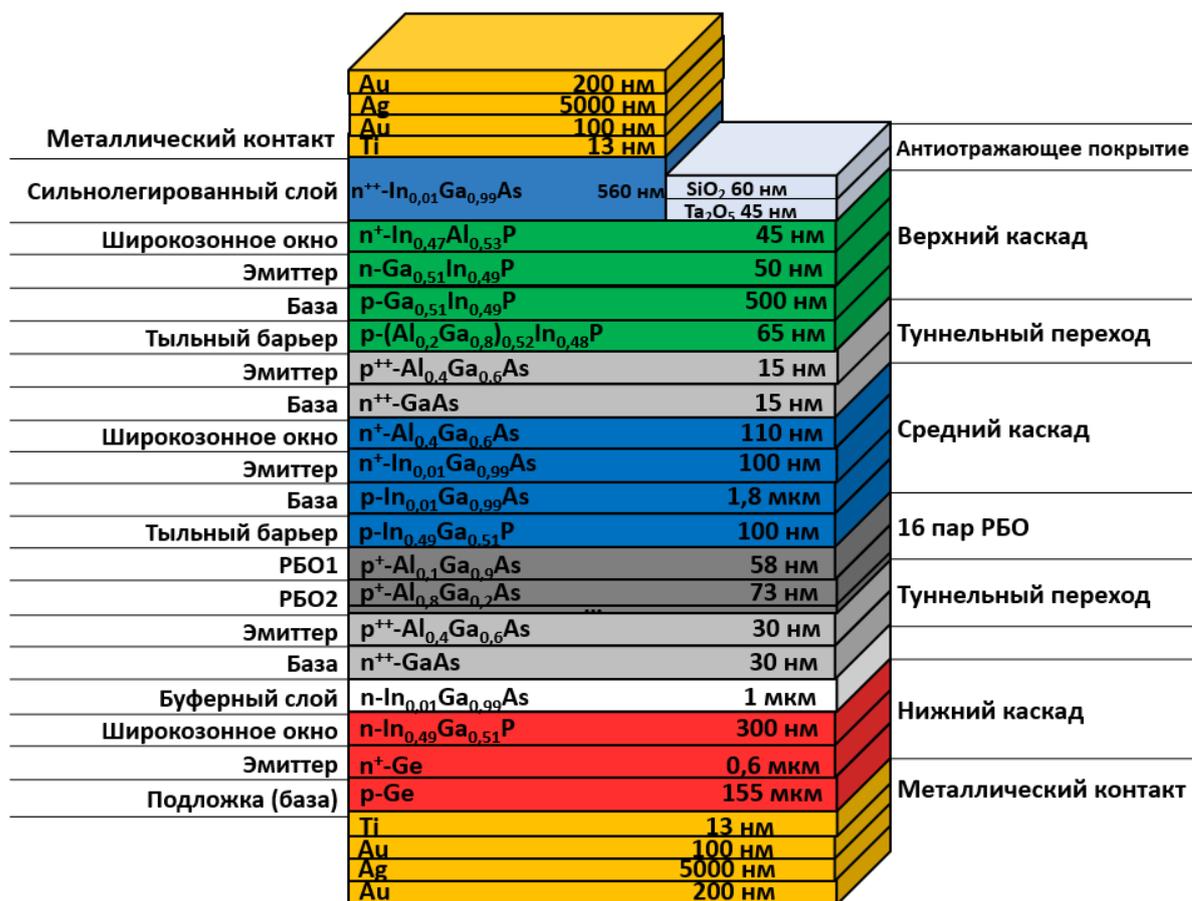


Рисунок 2 – Теоретическая структура исследуемого ФЭП [14]

Для повышения КПД ФЭП в полупроводниковую структуру включают [1], [15]:

- широкозонное окно (только в верхнем и среднем каскадах), которое имеет E_g больше, чем нижние слои структуры. Кроме того, рассматриваемый элемент препятствует поверхностной рекомбинации носителей заряда за счет создания потенциального барьера;
- буферный слой, который компенсирует дефекты на поверхности подложки и задерживает возможные примеси из приграничных слоев, а также обеспечивает согласованность выращиваемых эпитаксиальных слоев по параметру решетки с материалом подложки;

– сильнолегированный слой, который обеспечивает омичность контакта металл-полупроводник, а также защищает широкозонное окно от окисления во время межоперационных процессов создания ФЭП;

– тыльный потенциальный барьер (ТПБ), который пассивирует границы раздела между базой p - n -перехода и прилегающим слоем туннельного диода, что, способствует снижению обратной диффузии легирующих примесей из базы p - n -перехода.

На рисунке 3а схематически представлена зонная диаграмма отдельного каскада трехкаскадного ФЭП, на рисунке 3б – устройства в целом [16].

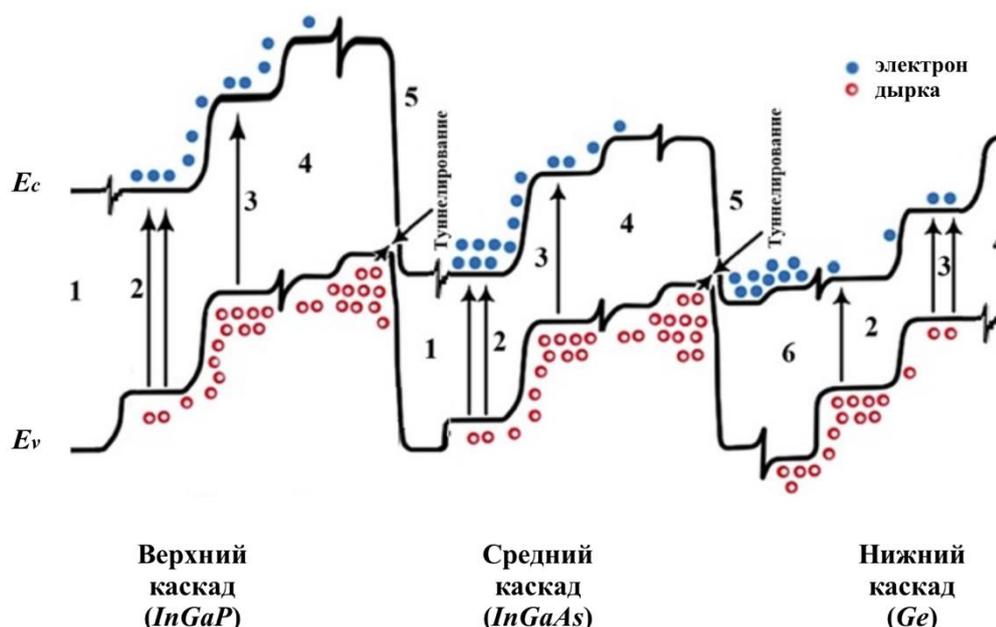


Рисунок 3 – Пример зонной диаграммы многокаскадного ФЭП: 1 – широкозонное окно, 2 – эмиттер, 3 – база, 4 – ТПБ, 5 – туннельный диод; 6 – буферный слой (E_c – зона проводимости; E_v – валентная зона; стрелками показано движение носителей заряда) [16]

При формировании p - n -перехода каскада ФЭП при температуре более 0 К в результате колебаний кристаллической решетки в полупроводнике возникают подвижные носители заряда, движение которых хаотично. При этом концентрация подвижных электронов в n -области больше, чем в p -области, обратное для подвижных дырок в p -области. Из-за избытка подвижных носителей заряда в p - n -переходе возникает градиент, который вызывает диффузию дырок из p -области в n -область, и обратное для электронов. С удалением от p - n -перехода концентрация подвижных носителей заряда (электронов в n -области и дырок в p -области) уменьшается вследствие процесса рекомбинации, так образуется область пространственного заряда (ОПЗ). Электрические заряды неподвижных ионов в ОПЗ создают электростатический потенциал, который препятствует протеканию диффузионных токов [17].

В результате поглощения энергии фотонов в полупроводнике возникают электрон-дырочные пары. В ОПЗ происходит эффективное разделение электрон-дырочных пар за счет внутреннего поля, которое способствует дрейфу избыточных дырок в p -область и обратное для избыточных электронов [17].

В многокаскадных ФЭП фотоны с большой энергией эффективно поглощаются в верхнем каскаде, а фотоны с более низкой энергией поглощаются нижележащими каскадами с меньшей E_g . Поскольку туннельные диоды представляют собой p - n -переходы на основе вырожденных полупроводников, то уровень Ферми располагается в E_c и E_v для слоев n - и p -типа соответственно. В этом случае фотоны проходят через туннельный диод без какого-либо поглощения. Следует отметить, что слои туннельного диода должны быть минимальной толщины (рисунок 2) для предотвращения паразитного поглощения фотонов. ТПБ также как и туннельный диод должен иметь большую E_g , чем нижележащие слои, что позволяет беспрепятственно пропускать фотоны с более низкой энергией.

Сбор избыточных носителей заряда осуществляется контактной структурой, которая формируется на фронтальной и тыльной поверхностях ФЭП. Для обеспечения более полного поглощения энергии оптического излучения на фотоактивной стороне ФЭП расположено антиотражающее покрытие.

1.2 Радиационная стойкость многокаскадных ФЭП

С начала космической эры (1950-е г.) БС являются первичным источником энергии для КА, действующих относительно близко к Солнцу. Именно поэтому особое внимание уделяется источникам энергии, от которых зависит вся миссия, включая безопасность экипажа и корабля.

КП характеризуется интенсивным излучением частиц, ультрафиолетовым излучением, микрометеоритами, космическим мусором, экстремальным термоциклированием, вакуумом и электростатическими полями, вызывающими деградацию ФЭП и другое. В результате негативного воздействия условий КП производительность БС КА постепенно снижается, что отрицательно сказывается на стоимости и продолжительности миссии [18].

В космосе источником радиационного излучения (наиболее губительного ФКП для БС) являются в основном энергетические частицы, такие как электроны и протоны естественных радиационных поясов Земли (ЕРПЗ), а также протоны солнечных вспышек. Потоки радиации над Землей расположены в двух областях: внутренний и внешний ЕРПЗ, а область между ними – щелевая область (рисунок 4). В центре внутреннего ЕРПЗ

преобладают потоки протонов с энергией более 20 МэВ, во внешнем ЕРПЗ – электронов с энергией более 1,6 МэВ. Также в состав радиационных поясов входят ионы и другие элементы, но в значительно меньших количествах, чем протоны и электроны [19].

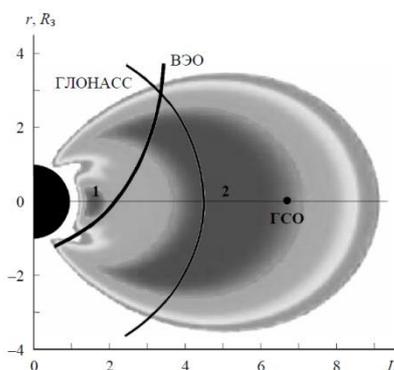


Рисунок 4 – Сечение области ЕРПЗ меридиональной плоскостью с проекциями трех орбит: ГЛОНАСС, ВЭО – высокоэллиптическая орбита; ГСО (1 – внутренний ЕРПЗ; 2 – внешний ЕРПЗ) [19]

Как только заряженная частица проникает в материал, она замедляется, потребляя или передавая свою энергию электронам и ядрам в материале, в результате чего кристаллическая структура полупроводников модифицируется за счет ионизации или смещения атомов (рисунок 5а). Уровень воздействия радиации в основном зависит от вида частиц, их энергии, направления удара, материала каскада, его толщины, а также концентрации и типа легирования полупроводникового материала. Поскольку воздействующие частицы (электроны, протоны, нейтроны или ионы) обладают массой, энергией и иногда зарядом, это обуславливает разные способы их (или других генерируемых частиц) взаимодействия с полупроводниковым материалом для каждого типа радиационного повреждения.

Первый рассматриваемый в работе тип радиационного повреждения – ионизация. В основном ионизация образуется в результате неупругого столкновения частицы с электронами атомов кристаллической решетки, которые в дальнейшем испытывают переход в возбужденное или несвязное состояние [20].

Обычно ионизация характерна для радиационно-стойкого стекла элементарной сборочной единицы (ЭСЕ), что приводит к его потемнению и уменьшению коэффициента пропускания. Когда ионизирующее излучение возбуждает орбитальный электрон в E_c , электрон может оказаться захваченным атомами примеси в радиационно-стойком стекле, образуя центры окрашивания. Последующим результатом является затемнение радиационно-стойкого стекла ЭСЕ, уменьшающее освещенность ФЭП [21]. Ионизирующее излучение может также нести положительный характер для ФЭП – возбуждение электронов

из E_v в E_c , создавая электрон-дырочные пары, аналогичные фотовольтаическому эффекту. Однако, чтобы создать такое же количество электрон-дырочных пар для этого потребуется гораздо больше энергии ионизирующего излучения, чем от фотона. Взаимодействие атомного электрона с ионизирующим излучением неупругое, поэтому электрон переходит в возбужденное состояние. Если передача энергии между ними недостаточна для перемещения электрона в E_c , эффект будет временным. В конечном итоге электрон будет рекомбинировать с дыркой, при этом энергия рассеивается на нагрев кристаллической решетки.

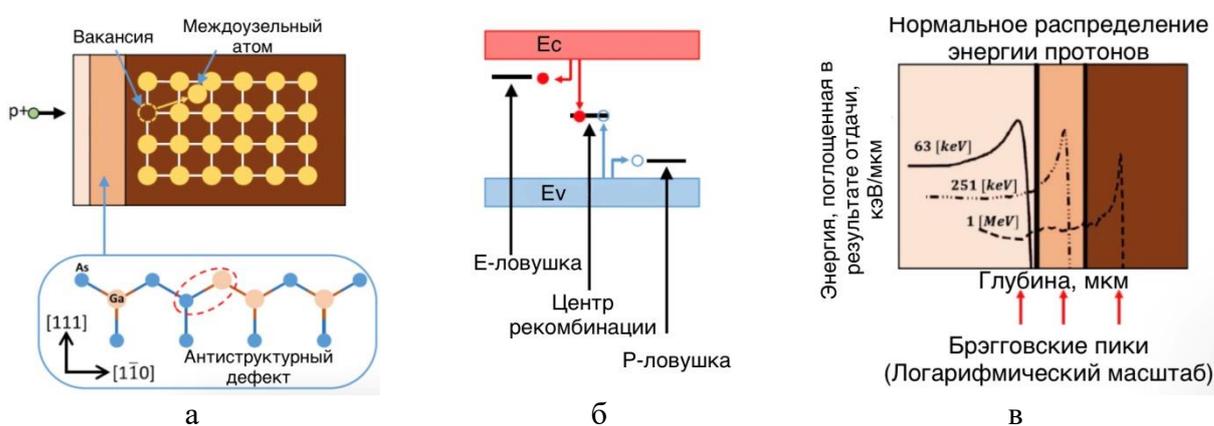


Рисунок 5 – Деградация трехкаскадного ФЭП при облучении протонами:
 а – схематическое изображение атомных смещений (образование вакансий, междоузлий или атомов замещения) в структуре; б – образование дефектами уровней в E_g , которые могут действовать как ловушки основных и ННЗ, центры рекомбинации, центры генерации или временные центры захвата;
 в – профиль поглощаемой энергии потоков протонов [18]

Наиболее разрушительным типом радиационного повреждения для ФЭП является смещение атомов, которое возникает в результате упругого столкновения высокоэнергетических быстро движущихся частиц с ядрами атомов кристаллической решетки. Атом может быть вытеснен из своего узла в ходе кулоновского взаимодействия с энергетически заряженной частицей и при взаимодействии с положительно заряженным ядром атома (Резерфордовское рассеяние). Смещенный атом может, в свою очередь, сталкиваться с другими атомами, вызывая их смещение, если исходному смещенному атому была передана достаточная для этого энергия [6]. Эти смещенные атомы и связанные с ними вакансии будут в конечном счете формировать постоянные устойчивые дефекты в кристаллической решетке (вакансии, междоузельные атомы, примесные атомы, дефектные комплексы). Создание такого рода дефектов в кристаллической решетке приносит дополнительные энергетические состояния, которые локализуются в E_g . Далее образованные дефекты могут действовать как дополнительные примеси, изменяя концентрацию примесей в ФЭП, как центры захвата, генерации или рекомбинации, в

зависимости от расположения энергетического уровня дефекта в E_g (рисунок 5б). При этом, центры рекомбинации уменьшают диффузионную длину и время жизни ННЗ, а центры ловушек создают эффект удаления основных носителей заряда (уменьшение их суммарного количества) [18].

Уменьшение диффузионной длины ведет к снижению глубины сбора заряда неравновесных носителей заряда, которые появляются при поглощении энергии солнечного излучения. Все это ведет к уменьшению фоточувствительности ФЭП, и в первую очередь для длинноволнового излучения, которое проникает наиболее глубоко в структуру [22]. Кроме того, увеличивается ток насыщения, генерируемый на краю или внутри ОПЗ. В результате флуктуаций плотности ННЗ, вызванных спонтанными изменениями скорости их генерации и рекомбинации, возникает генерационно-рекомбинационный шум. Также может увеличиться диффузионный шум вследствие локализованных флуктуаций плотности ННЗ и скорости их диффузии. В обоих случаях эти шумы влияют на уровень сгенерированного тока [23].

Следует отметить, что вакансии и междоузельные атомы чрезвычайно мобильны и нестабильны при комнатной температуре. Вакансия может совмещаться с другим атомом, образуя тесно связанные пары вакансии-кислород, пары вакансии-донор или пары вакансии-акцептор. В случае пар вакансии-кислород и вакансии-донор ловушки захвата являются электрически активными и могут стать отрицательно заряженными при переходе электрона из E_c . Уровни энергии этих дефектов находятся чуть ниже E_c . Для пар вакансии-акцептор дефекты могут стать положительно заряженными, если захватывают дырку из E_v (отдавая электрон в E_v). Уровень энергии этого дефекта немного выше уровня E_v . Если вакансия совмещается с междоузельным атомом, дефект в основном аннигилируется, что возвращает кристалл к его первоначальной структуре решетки. Это было бы идеальным условием для облученных ФЭП [24].

Так, электрон с энергией 1 МэВ, ударяющийся о пластину Ge, генерирует в среднем одну пару Френкеля, то есть вакансию и междоузелье, в то время как один протон с той же энергией создает кластеры повреждений (в 3000 раз больше повреждений, чем электрон относительно пороговой энергии 15 эВ) из-за большей плотности столкновений. Кроме того, частицы, которые обычно ударяются с достаточно низкой энергией, остаются внутри ФЭП и имеют профиль повреждения с пиком в конце диапазона, называемым «пиком Брэгга», где находится наибольшее повреждение (рисунок 5в). Например, в ФЭП на основе *GaAs* низкоэнергетические протоны (с энергиями менее 300 кэВ) останавливаются в активной области (каскаде) ФЭП, тогда как высокоэнергетические протоны (с энергиями более 1 МэВ) будут пролетать через всю структуру ФЭП [25]. Это указывает на

неравномерное распределение времени жизни ННЗ в каскаде и, следовательно, на неравномерную деградацию [18].

Свойства ФЭП в результате радиационного облучения в основном зависят от поведения материалов, на основе которых изготовлены эти приборы. Воздействие ионизирующих частиц может привести к следующим эффектам [18], [26]:

- увеличение тока насыщения, за исключением очень низких температур [27] – [29];

- увеличение последовательного сопротивления из-за сокращения диффузионной длины ННЗ (или уменьшения их времени жизни), расширение ОПЗ и уменьшение концентрации основных носителей заряда [30] – [32];

- изменение электропроводности в результате возникновения нейтральных и заряженных дефектов, которые выступают в роли центров рассеяния носителей заряда. Такие дефекты могут изменить концентрацию и природу основных носителей заряда [28], [30];

- увеличение скорости поверхностной рекомбинации (на поверхности и границах раздела) [33] – [35];

- снижение электрических параметров ФЭП [36];

- изменение наклона ВАХ (от нуля до напряжения точки максимальной мощности ($U_{\text{макс}}$) становится более крутым) [37], [38];

- снижение ВКВФ, особенно в длинноволновой области [3], [27], [38];

- снижение интенсивности электролюминесценции (ЭЛ) [39];

- радиационное разбухание облученных образцов в зависимости от концентрации и типов дефектов;

- изменение оптических свойств радиационно-стойкого стекла – в различных областях спектра поглощения возникают новые области поглощения, так называемые центры окраски;

- образование на поверхности материалов не характерные структуре полупроводника объемные дефекты, меняющие, например, кинетику адсорбции и окисления.

Учитывая негативное воздействие радиации в процессе эксплуатации БС, современные производители ФЭП изготавливают устройства с применением различных способов повышения радиационной стойкости.

1.3 Способы повышения радиационной стойкости ФЭП и БС

Немаловажной задачей перед разработчиками и изготовителями ФЭП и БС является достижение максимальных значений КПД на протяжении всего САС на эксплуатируемой орбите. Для этого необходимо оптимизировать конструкцию ФЭП в зависимости от дозы структурных повреждений частицами, повреждающих его в процессе эксплуатации БС КА.

Несмотря на высокую эффективность многокаскадных ФЭП, комбинация E_g полупроводниковых материалов трехкаскадных ФЭП на основе соединений $AlInBV$ не дает оптимального разделения солнечного спектра и вызывает сильный избыточный ток в нижнем Ge каскаде. В литературе известны различные подходы по снижению рассогласования каскадов по току путем увеличения поглощения в двух верхних каскадах или интеграцией дополнительного каскада между $InGaAs$ и Ge каскадами.

Кроме того, в открытых источниках были найдены различные варианты конструктивных изменений ФЭП, позволяющие повысить его радиационную стойкость:

- оптимизация концентрации основных носителей заряда [4], [40];
- оптимизация толщины базы уязвимого к воздействию радиации каскада [4];
- использование наноструктур [41];
- использование токоограничивающего слоя из наиболее стойкого к излучению материала [42], [43];
- оптимизация толщины радиационно-стойкого стекла [44], [45], так, например, радиационно-стойкое стекло толщиной около 75 мкм способно останавливать электроны и протоны с энергиями ниже 200 кэВ и 2,8 МэВ соответственно, в то время как частицы с более высокой энергией замедляются [45], [46];
- использование i -слоев между p - n -переходами [47];
- увеличение доли In и P в каскаде [3], [36];
- использование двух тонких и сильно легированных конфигураций: база p -типа с мелким p - n -переходом и база n -типа с глубоким p - n -переходом [48];
- использование ультратонких и высоколегированных конструкций ФЭП [48];
- использование $GaInP$ вместо $AlGaAs$ для создания ТПБ [49];
- уменьшение толщины ТПБ [50];
- использование РБО для утонения базы среднего каскада [51] – [53] и другое.

Также для снижения эффекта негативного воздействия радиации могут применяться методы восстановления поврежденной полупроводниковой структуры, например, термический [3], фотоинжекционный [4], инжекционный [4] типы отжига.

1.3.1 Конструктивные изменения ФЭП

Ниже подробнее рассмотрены варианты конструкций ФЭП, применяемых современными производителями ФЭП.

Распределенные брэгговские отражатели

РБО – слоистая структура, которая состоит из двух и более чередующихся слоев, показатель преломления которых периодически и контрастно изменяется в одном пространственном направлении (перпендикулярно слоям).

Основное назначение РБО – отражение в каскад ФЭП части не поглощенных «длинноволновых» фотонов с энергией, близкой к E_g материала каскада, что позволяет увеличить фототок и КПД. В определенном диапазоне длин волн РБО может достичь почти 100 % отражения. Чем выше контраст показателя преломления слоев РБО, тем выше максимальная отражательная способность и больше спектральная ширина для того же количества используемых пар [54], [55].

Условия действия РБО определяются законом Брэгга: при перпендикулярно падающей электромагнитной волне отраженные от границ раздела сред (с показателями преломления n_1 и n_2) РБО волны находятся в одной фазе [56]:

$$\Lambda = \frac{l \cdot \lambda}{2 \cdot n_{\text{эфф}}}, \quad (1)$$

где Λ – период РБО, нм;

l – целое число, указывающее на порядок дифракции;

λ – длина волны, нм;

$n_{\text{эфф}}$ – эффективный показатель преломления РБО.

Коэффициент отражения РБО на длине волны λ будет равен [56]:

$$|R| = \left(\frac{1 - (n_1/n_2)^{2 \cdot m}}{1 + (n_1/n_2)^{2 \cdot m}} \right)^2, \quad (2)$$

где n_1, n_2 – коэффициент преломления 1-ого и 2-ого слоя соответственно;

m – число пар четвертьволновых слоев, из которых состоит РБО, шт.

Максимум коэффициента отражения РБО в спектре приходится на длину волны λ . Спектральная ширина максимума определяется из выражения [56]:

$$\Delta\lambda = \frac{2 \cdot \lambda \cdot \Delta n}{\pi \cdot n_{\text{эфф}}}, \quad (3)$$

где Δn – разница показателей преломления n_1 и n_2 .

Когда фотоны, образующиеся в каскаде с большей E_g в результате излучательной рекомбинации, поглощаются в соседнем каскаде с более узкой E_g , это позволяет сгенерировать дополнительный фототок в последнем из рассматриваемых каскадов [57], [58]. Этот процесс в многокаскадных ФЭП называется люминесцентным взаимодействием между фотоактивными p - n -переходами. Так в трехкаскадных ФЭП со структурой $GaInP/InGaAs/Ge$ РБО расположен между средним и нижним каскадами [54], [58] и отражает не поглощенные фотоны обратно в средний каскад, ограничивающий ФЭП по току, что позволяет увеличить фототок без значительных потерь в нижнем Ge -каскаде. РБО на основе пары $Al_{0,1}Ga_{0,9}As/Al_{0,8}Ga_{0,2}As$ в составе трехкаскадных ФЭП способствует увеличению радиационной стойкости более, чем на 10 % из-за более тонкого среднего каскада [54], [55].

Пример комбинаций материалов, подходящих в качестве РБО, согласованных с постоянной решетки $GaAs$, показан в таблице 1. Указаны характеристики РБО, подобранные таким образом, чтобы достичь максимальную отражательную способность на длине волны излучения $GaAs$ [55].

Таблица 1 – Комбинации полупроводниковых материалов РБО, подходящие для кристаллической решетки $GaAs$, для максимума $|R|$ при $\lambda = 880$ нм и нормальном падении света [55]

| Материалы | Соотношение коэффициентов преломления n_1/n_2 | Толщина слоя, нм | Спектральная ширина $\Delta\lambda$, нм | Количество пар для $ R > 0,9$ |
|---------------------------------------|---|------------------|--|--------------------------------|
| $AlAs/GaAs$ | 2,99/3,63 | 73/60 | 106,6 | 10 |
| $Ga_{0,5}In_{0,5}P/GaAs$ | 3,19/3,63 | 68/60 | 71,6 | 15 |
| $Al_{0,5}In_{0,5}P/GaAs$ | 2,78/3,63 | 78/60 | 147,1 | 7 |
| $Al_{0,5}In_{0,5}P/Ga_{0,5}In_{0,5}P$ | 2,78/3,19 | 78/68 | 75,8 | 13 |

На рисунках 6а и 6б схематически представлены конструкции многокаскадного ФЭП без РБО и с РБО соответственно. На рисунке 6в представлено поперечное сечение многокаскадного ФЭП со структурой $GaInP/GaInAs/Ge$ со встроенным РБО между

средним ($GaNAs$) и нижним (Ge) каскадами, полученное с помощью растровой электронной микроскопии.

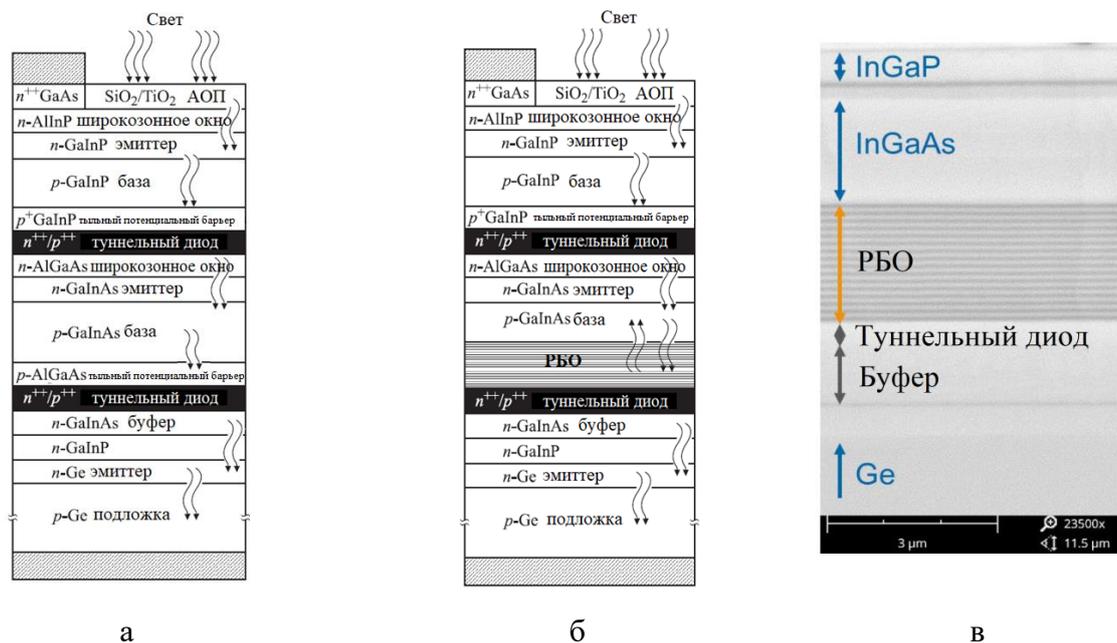


Рисунок 6 – Структуры многокаскадных ФЭП со структурой $GaN/P/GaInAs/Ge$ [6], [59]: а – без РБО; б – с РБО; в – поперечное сечение ФЭП с РБО, полученное с помощью растровой электронной микроскопии

РБО дает возможность уменьшить толщину среднего каскада ($GaInAs$), что позволяет смягчить эффект низкой диффузионной длины в материале и получить повышенную эффективность сбора ННЗ. Пример зонной диаграммы РБО с 10 периодами показан на рисунке 7.

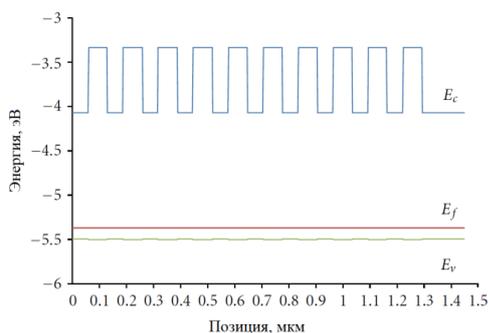


Рисунок 7 – Зонная диаграмма РБО $AlAs/GaAs$ [61]

Конструкция ФЭП с РБО имеет некоторые преимущества перед конструкцией ФЭП без РБО:

- РБО позволяет уменьшить толщину каскада и, как следствие, снизить объемную рекомбинацию ННЗ;

- увеличивается фототок каскада благодаря улучшению сбора ННЗ из базовой области;
- наличие РБО не приводит к снижению потенциальных барьеров на каскадах ФЭП и понижению U_{XX} ФЭП в отличие от слабо легированных слоев и тянущих полей [6];
- способствует росту КПД на (0,5 – 2) % при различных уровнях радиационного повреждения [6]. КПД такого типа ФЭП составляет 31 % [60].

Квантовые ямы

Структуры с квантовыми ямами (КЯ), представленные на рисунке 8а, позволяют поглощать фотоны с энергией ниже E_g материала каскада ФЭП, тем самым расширяя спектральный отклик.

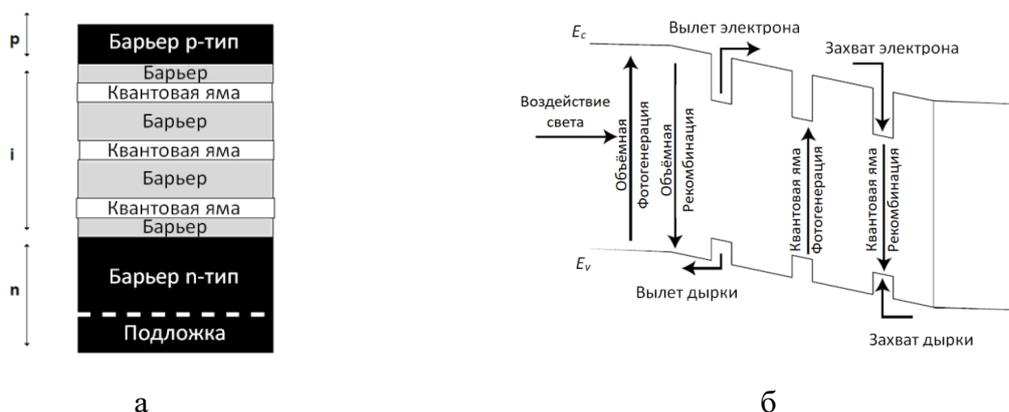


Рисунок 8 – Пример КЯ в конструкции ФЭП [62]: а – структура; б – зонная диаграмма

В КЯ поглощаемый свет генерирует электрон-дырочные пары. При сочетании тепловых и туннельных механизмов электроны и дырки покидают КЯ и вносят свой вклад в фототок, что схематично показано на рисунке 8б. Вылет носителей заряда эффективен при наличии достаточной тепловой энергии и достаточно сильного поперечного электрического поля. В большинстве ФЭП с КЯ при комнатной температуре процессы захвата и вылета носителей заряда протекают быстрее, чем конкурирующие процессы рекомбинации. Это приводит к уравниванию носителей заряда в E_c и E_v барьерного слоя и КЯ. Соответственно, все сгенерированные носители заряда в КЯ вылетают и вносят вклад в фототок [62].

Внедрение КЯ в средний каскад трехкаскадного ФЭП может быть реализовано путем чередования тонких слоев $GaAs_yP_{1-y}$ и $Ga_xIn_{1-x}As$ [63]. КЯ с E_g ниже 1,4 эВ расширяют поглощение среднего каскада в сторону длинноволновой области спектра [64], [65]. Таким

образом, ток среднего каскада увеличивается за счет уменьшения избыточного тока в нижнем *Ge* каскаде. Однако $U_{\text{ХХ}}$ ФЭП с КЯ ниже, чем у структуры без КЯ [64], что компенсируется повышенной плотностью тока. Теоретические расчеты показали, что общий выигрыш в эффективности сбора энергии от (3 – 9) % по сравнению с ФЭП без КЯ [64]. КПД современных однокаскадных ФЭП с КЯ достигло 27,3 %, двухкаскадных – 30,4 % [62], для трехкаскадного – 32 % [60]. Такие элементы имеют большую устойчивость к радиации в сравнении с ФЭП без КЯ.

Инвертированный метаморфный рост

В подходе, основанном на инвертированном метаморфном росте (ИМР) (рисунок 9) создание эпитаксиальной структуры осуществляется в обратном порядке – сначала на подложке *GaAs* (или *Ge*) выращивают верхний каскад, а затем каскады с более низкой E_g . Позже *GaAs* подложка удаляется с верхнего каскада с помощью химического травления или методом эпитаксиального отрыва.



Рисунок 9 – Схематическое изображение концепции ИМР многокаскадных ФЭП на основе полупроводниковых материалов *АІІІВV* [66]

Этот подход позволяет выращивать каскады с большой E_g , согласованные по решетке с *GaAs*. При этом нижний каскад выращивается эпитаксиально, а не создается диффузией легирующей примеси в *Ge* подложку, что обеспечивает большую вариативность E_g нижнего каскада. КПД трехкаскадного ФЭП, полученного методом ИМР, производства *Spectrolab* достигло 33 % [66], [67]. Коэффициент деградации для трехкаскадной структуры по мощности составляет 0,86 и 0,83 при облучении электронами с энергией 1 МэВ и флюенсом $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ и $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ соответственно [66]. Здесь верхний каскад на основе

$Ga_{0,51}In_{0,49}P$ (1,83 эВ) выращивался с согласованной решеткой на подложке $GaAs$. Затем для среднего каскада $Ga_{0,96}In_{0,04}As$ (1,34 эВ) с целью увеличения постоянной решетки на 0,3 % использовался буфер, аналогичное было и для нижнего каскада на основе $Ga_{0,63}In_{0,37}As$ (0,89 эВ), в этом случае несоответствие решеток составило 2,6 %. Подход ИМР также применим для создания четырёх- и более каскадных структур. В качестве недостатка ИМР можно выделить более высокую сложность обработки каскадов, включая удаление подложки, и необходимость механического переноса тонких слоев на подложку, если сравнивать со структурами, выращенными на Ge подложке. Следует отметить, что две метаморфные буферные структуры (в случае четырехкаскадного ФЭП) образуют относительно толстые эпитаксиальные структуры и, следовательно, влияют на стоимость устройства. Однако это может быть частично компенсировано более низкими затратами на изготовление ФЭП в случае повторного использования подложки.

Увеличение числа каскадов

КПД многокаскадного ФЭП в стандартных условиях увеличивается с количеством каскадов: для четырехкаскадного КПД ожидается 35 %, для пятикаскадного – (35 – 36) %; для шестикаскадного – (38 – 39) %, для семикаскадного – (40 – 41) %. На рисунке 10 схематически показаны структуры многокаскадных ФЭП.

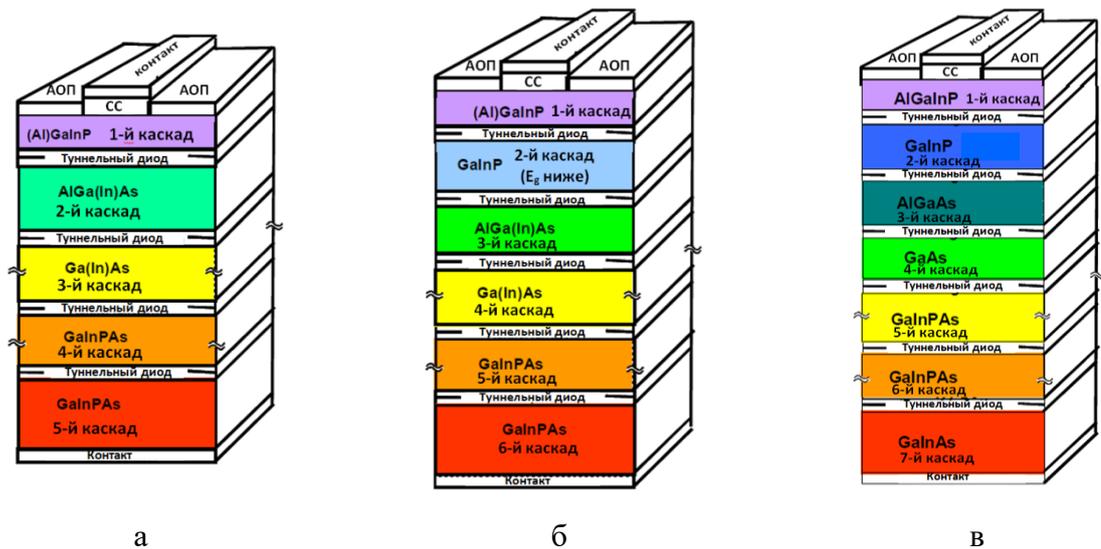


Рисунок 10 – Схематическое изображение многокаскадных структур ФЭП на основе полупроводниковых материалов $АІІІВУ$ [66] (СС – сильнолегированный слой; АОП – антиотражающее покрытие)

ВАХ ФЭП с шестью каскадами при АМ0 сравнивается с характеристикой трех- и четырехкаскадного ФЭП на рисунке 11. По ВАХ можно видеть, что $U_{\text{ХХ}}$ ФЭП растет с увеличением количества каскадов, а $J_{\text{КЗ}}$ снижается.

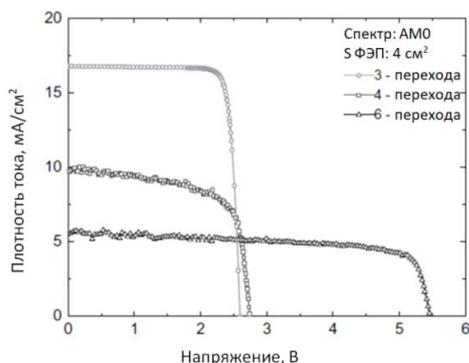


Рисунок 11 – ВАХ в спектре АМ0 шестикаскадного ФЭП со структурой $AlGaInP/GaInP/AlGaInAs/GaInAs/GaInNAs/Ge$, трехкаскадного ФЭП со структурой $GaInP/GaAs/Ge$ и четырехкаскадного ФЭП со структурой $AlGaInP/GaInAs/GaInNAs/Ge$ [69]

Несмотря на рост эффективности преобразования энергии солнечного излучения многокаскадными ФЭП, рост КПД снижается с увеличением числа каскадов: добавление четвертого каскада относительный прирост КПД в среднем составляет 5 %, при добавлении пятого каскада – 3 %. Таким образом, вопрос о возможности получения выигрыша в преобразовании энергии для ФЭП с более чем четырьмя каскадами остается открытым.

Наиболее успешный пример с четырехкаскадного ФЭП для концентрированного солнечного излучения был получен путем присоединения верхнего каскада многокаскадного ФЭП на основе $Ga_{0,51}In_{0,49}P/(Al)GaAs$ к нижнему каскаду ФЭП со структурой $GaInAsP/GaInAs$. Последний выращивается на специальной подложке, которая реализуется путем переноса тонкого слоя InP на $GaAs$ [68]. Этот ФЭП сочетает в себе четыре материала, которые выращены с согласованной решеткой на соответствующей подложке $GaAs$ или InP , что позволяет получить низкую плотность дислокаций и материал высокого качества.

Пятикаскадный ФЭП, получают аналогичным методом [69]. Здесь три верхних каскада: $AlGaInP$ (2 эВ), $AlGaInAs$ (1,7 эВ) и $GaInAs$ (1,4 эВ), выращены в обратном порядке на $GaAs$, а два нижних каскада: $GaInPAs$ (1,1 эВ) и $GaInAs$ (0,8 эВ), выращены в прямом порядке на InP . В дальнейшем слои $GaAs$ и InP соединяются, а подложка $GaAs$ удаляется.

Благодаря утонению каскадов уменьшается скорость деградации ФЭП и обеспечивается производительность большей величины.

1.3.2 Анализ литературных данных степени деградации современных многокаскадных ФЭП на основе полупроводниковых материалов *АИВВ* для космического назначения

При оценке эффективности конструктивных изменений для повышения радиационной стойкости ФЭП необходимо исключить факторы, связанные с технологическими особенностями изготовления приборов, а также с возможным различием в условиях определения основных характеристик. Для этого сравнение конструкций ФЭП проводилось на образцах, промышленно выпускаемых в рамках одной компании.

ФЭП производства *Azur Space Solar Power GmbH*

Компания *Azur Space Solar Power GmbH* (Германия), основанная в 1964 году, является одним из мировых лидеров в области разработки и производства многокаскадных ФЭП на основе полупроводниковых материалов *АИВВ* космического применения со средним КПД 30 % [70]. В таблице 2 представлены основные электрические параметры ФЭП, выпускаемых *Azur Space Solar Power GmbH* [70]. На рисунке 12 представлен внешний вид этих ФЭП.

Таблица 2 – Основные электрические параметры многокаскадных ФЭП производства *Azur Space Solar Power GmbH* [70]

| Название | S , см ² | $J_{кз}$, мА/см ² | $U_{ХХ}$, В | $J_{макс}$, мА/см ² | $U_{макс}$, В | КПД, % |
|--|-----------------------|-------------------------------|--------------|---------------------------------|----------------|--------|
| <i>TJ Solar Cell 3G28C (8 см × 4 см)</i> | 30,18 | 16,77 | 2,667 | 16,14 | 2,37 | 28,00 |
| <i>TJ Solar Cell 3G30C – Advanced (8 см × 4 см) с 3 контактными площадками</i> | 30,18 | 17,24 | 2,700 | 16,71 | 2,41 | 29,50 |
| <i>TJ Solar Cell 3G30C – Advanced (8 см × 8 см)</i> | 60,36 | 17,25 | 2,700 | 16,68 | 2,41 | 29,40 |
| <i>TJ Solar Cell 3G30C – Advanced (12 см × 6 см)</i> | 68,76 | 17,25 | 2,700 | 16,68 | 2,41 | 29,40 |
| <i>TJ Solar Cell 3G30C – Advanced (8 см × 4 см) с 2 контактными площадками</i> | 30,18 | 17,24 | 2,700 | 16,71 | 2,41 | 29,50 |
| <i>TJ Solar Cell 3G30C – Advanced (8 см × 4 см) утоненные (80 мкм)</i> | 30,18 | 17,24 | 2,700 | 16,71 | 2,41 | 29,50 |
| <i>TJ Solar Cell 3G30C – Advanced (7 см × 4 см)</i> | 26,51 | 17,24 | 2,700 | 16,70 | 2,41 | 29,50 |
| <i>QJ Solar Cell 4G32C – Advanced</i> | 30,18 | 15,16 | 3,451 | 14,36 | 3,02 | 31,80 |

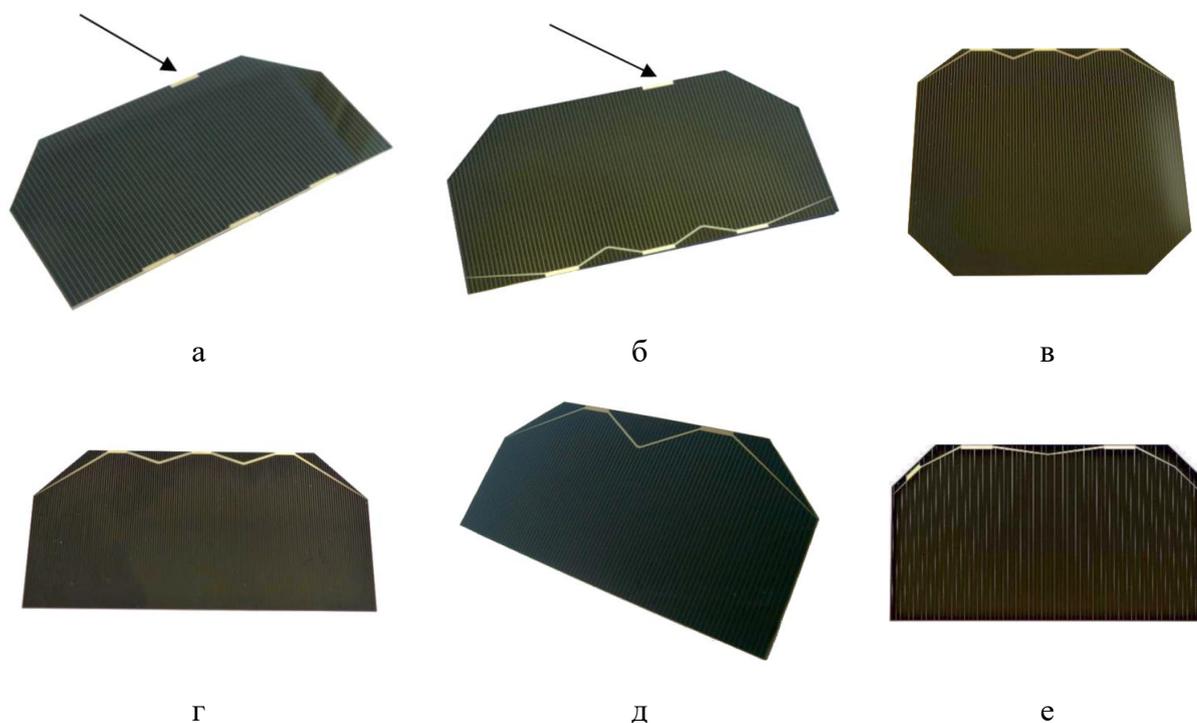


Рисунок 12 – ФЭП производства *Azur Space Solar Power GmbH* (стрелкой отмечено расположение шунтирующего диода) [70]: а – *TJ Solar Cell 3G28C* (8 см × 4 см); б – *TJ Solar Cell 3G30C – Advanced* (8 см × 4 см) с 3 контактными площадками; в – *TJ Solar Cell 3G30C – Advanced* (8 см × 8 см); г – *TJ Solar Cell 3G30C – Advanced* (12 см × 6 см) и *QJ Solar Cell 4G32C – Advanced*; д – *TJ Solar Cell 3G30C – Advanced* (8 см × 4 см) с 2 контактными площадками и *TJ Solar Cell 3G30C – Advanced* (8 см × 4 см) утоненный (80 мкм); е – *TJ Solar Cell 3G30C – Advanced* (7 см × 4 см)

На рисунке 13 представлены аппроксимационные деградационные кривые, полученные методом наименьших квадратов по формуле [71], [72]:

$$f(\Phi_e) = 1 - C \cdot \lg \left(1 + \frac{\Phi_e}{\Phi_x} \right), \quad (4)$$

где Φ_e – флюенс электронов, см⁻²;

C и Φ_x – параметры аппроксимации.

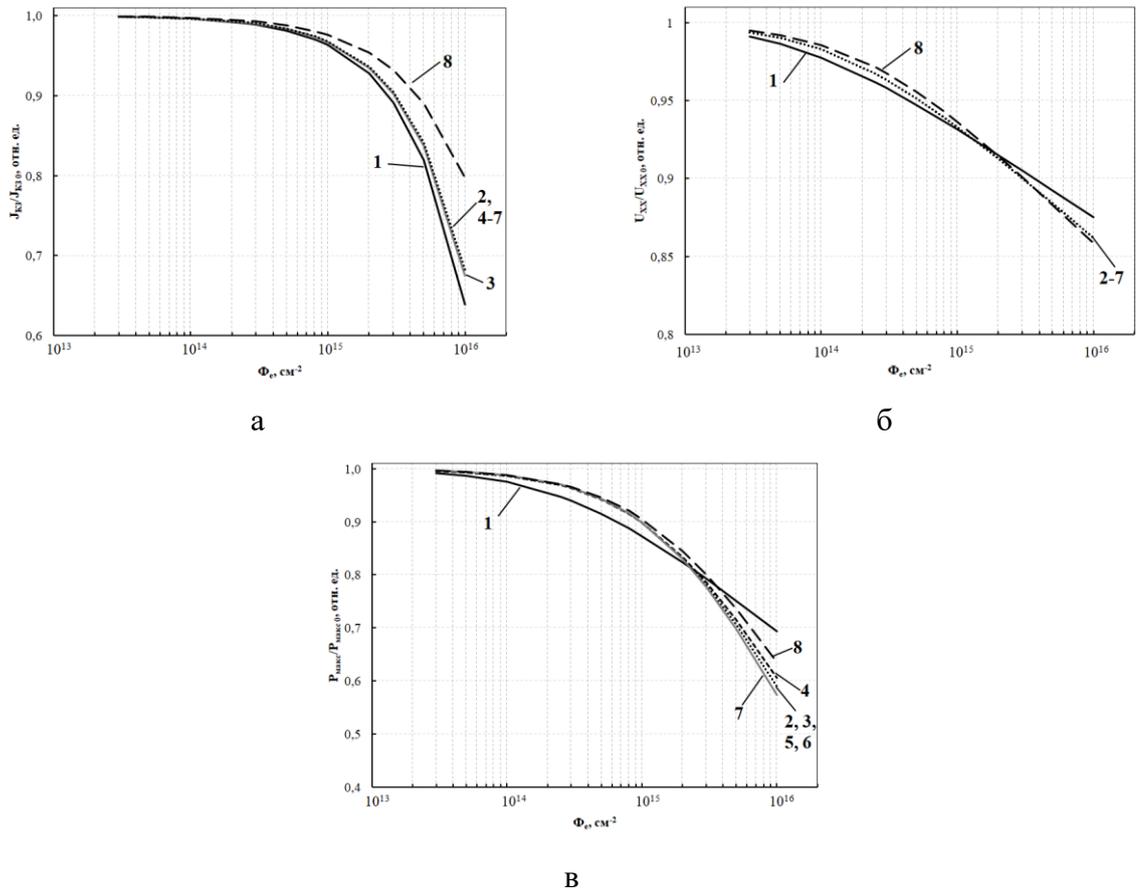


Рисунок 13 – Дegrадационные кривые электрических параметров ФЭП производства *Azur Space Solar Power GmbH* в зависимости от воздействующего флюенса электронов с энергией 1 МэВ (1 – *TJ Solar Cell 3G28C* (8 см × 4 см); 2 – *TJ Solar Cell 3G30C – Advanced* (8 см × 4 см) с 3 контактными площадками; 3 – *TJ Solar Cell 3G30C – Advanced* (8 см × 8 см); 4 – *TJ Solar Cell 3G30C – Advanced* (12 см × 6 см); 5 – *TJ Solar Cell 3G30C – Advanced* (8 см × 4 см) с 2 контактными площадками; 6 – *TJ Solar Cell 3G30C – Advanced* (8 см × 4 см) утоненные (80 мкм); 7 – *TJ Solar Cell 3G30C – Advanced* (7 см × 4 см); 8 – *QJ Solar Cell 4G32C – Advanced*) [70]:
 а – $J_{кз}$; б – U_{XX} ; в – P_{\max}

Как видно из рисунка 13 четырехкаскадный ФЭП типа *QJ Solar Cell 4G32C – Advanced* имеет радиационную стойкость, превосходящую соответствующие величины у трехкаскадных ФЭП до уровня флюенса 10^{15} см², что соответствует 15 годам эксплуатации БС КА на ГСО [70]. Самый худший результат показал ФЭП типа *TJ Solar Cell 3G28C* (8 см × 4 см), который отличается от остальных структур отсутствием РБО, преимущества которого было описано ранее в настоящей главе.

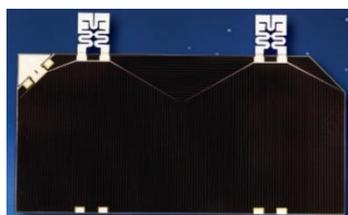
ФЭП производства *SolAero Technologies Corp.*

Компания *SolAero Technologies Corp.* (США) является ведущим поставщиком высокоэффективных ФЭП, солнечных панелей и композитных конструкционных изделий

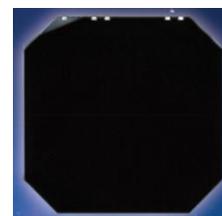
космического назначения. В таблице 3 представлены основные электрические параметры ФЭП, выпускаемых *SolAero Technologies Corp.* На рисунке 14 представлен внешний вид этих ФЭП.

Таблица 3 – Основные электрические параметры многокаскадных ФЭП производства *SolAero Technologies Corp.* [73]

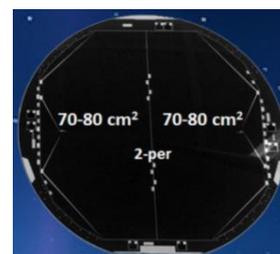
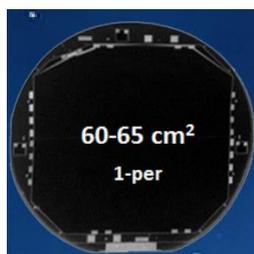
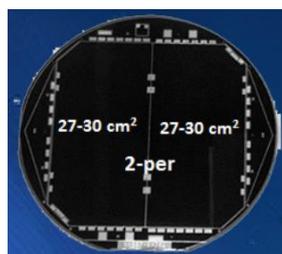
| Тип ФЭП | $J_{КЗ}$, мА/см ² | $U_{ХХ}$, В | $J_{макс}$, мА/см ² | $U_{макс}$, В | КПД, % |
|---|-------------------------------|--------------|---------------------------------|----------------|--------|
| <i>IMM-α Inverted Metamorphic Space Solar Cell</i> | 10,66 | 4,78 | 10,12 | 4,28 | 32,00 |
| <i>ZTJM Triple-Junction Solar Cells with Monolithically Integrated Protection Diode</i> | 17,10 | 2,72 | 16,50 | 2,38 | 29,50 |
| <i>ZTJ + Triple-Junction Solar Cell</i> | 17,11 | 2,69 | 16,65 | 2,39 | 29,40 |
| <i>ZTJ Standard Triple-Junction Solar Cell</i> | 17,40 | 2,73 | 16,50 | 2,41 | 29,50 |
| <i>Z4J - SolAero's Newest Space Solar Cell</i> | 12,00 | 3,95 | 11,50 | 3,54 | 30,00 |



а



б



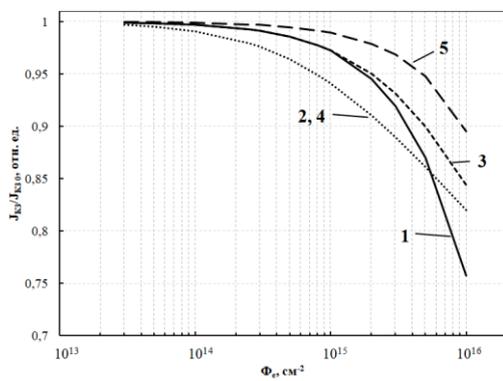
г

Рисунок 14 – ФЭП производства *SolAero Technologies Corp.*:

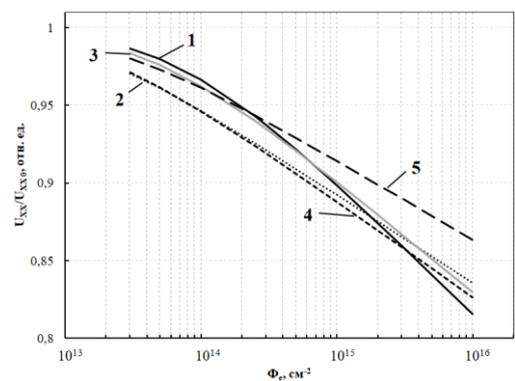
а – *IMM-α Inverted Metamorphic Space Solar Cell*;

б – *ZTJM Triple-Junction Solar Cells with Monolithically Integrated Protection Diode* (слева – один из двух ФЭП со 100 мм подложки; в центре – один из двух ФЭП со 150 мм подложки; справа – один ФЭП со 100 мм подложки); в – *ZTJ + Triple-Junction Solar Cell* (слева – два ФЭП на подложке 100 мм; в центре – один ФЭП на подложке 100 мм; справа – два ФЭП на подложке 150 мм) [73]

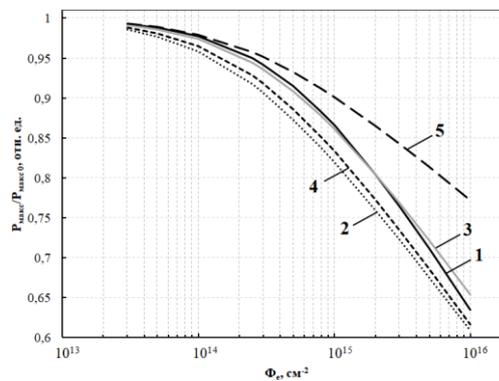
Деградиционная кривая ФЭП типа *ZAJ - SolAero's Newest Space Solar Cell*, представленная на рисунке 15 подтверждает увеличенную радиационную стойкость четырехкаскадной структуры. Деградиционные кривые электрических параметров, полученные с помощью формулы (4), представлены на рисунке 15. ФЭП этого типа оптимизирован для миссий на ГСО. Производительность такого типа ФЭП на 7 % больше, чем у *ZTJ Standard Triple-Junction Solar Cell* в конце САС (аналогично воздействию электронами с энергией 1 МэВ и флюенсом 10^{15} см^{-2}). ФЭП типа *IMM- α Inverted Metamorphic Space Solar Cell* с инвертированной метаморфной структурой также имеет высокую радиационную стойкость и уступает только четырехкаскадной структуре.



а



б



в

Рисунок 15 – Деградиционные кривые электрических параметров ФЭП производства *SolAero Technologies Corp* в зависимости от воздействующего флюенса электронов с энергией 1 МэВ (1 – *IMM- α Inverted Metamorphic Space Solar Cell*; 2 – *ZTJM Triple-Junction Solar Cells with Monolithically Integrated Protection Diode*; 3 – *ZTJ + Triple-Junction Solar Cell*; 4 – *ZTJ Standard Triple-Junction Solar Cell*; 5 – *ZAJ - SolAero's Newest Space Solar Cell*) [73]: а – J_{k3} ; б – U_{XX} ; в – $P_{\text{макс}}$

ФЭП производства *Spectrolab, Inc.*

Компания *Spectrolab, Inc.* (США) предлагает широкий спектр ФЭП на основе полупроводниковой структуры *GaInP/GaAs/Ge*, КПД которых достигает 32 %. В таблице 4 представлены основные электрические параметры ФЭП, производимых *Spectrolab, Inc.* [74].

Таблица 4 – Основные электрические параметры многокаскадных ФЭП производства *Spectrolab, Inc.* (S – площадь ФЭП) [74]

| Тип ФЭП | $J_{кз}$, мА/см ² | $U_{ХХ}$, В | $J_{макс}$, мА/см ² | $U_{макс}$, В | КПД, % | Примечание |
|---|-------------------------------|--------------|---------------------------------|----------------|--------|--------------------------|
| <i>XTE-HF</i> | 17,40 | 2,782 | 18,00 | 2,490 | 32,1 | $S = 27 \text{ см}^2$ |
| | | | | | | $S = 77 \text{ см}^2$ |
| <i>XTE-LILT</i> | 18,10 | 2,755 | 17,40 | 2,459 | 31,6 | $S = 27 \text{ см}^2$ |
| | | | | | | $S = 77 \text{ см}^2$ |
| <i>XTE-SF</i> | 18,60 | 2,750 | 17,80 | 2,435 | 32,2 | $S = 27 \text{ см}^2$ |
| | | | | | | $S = 77 \text{ см}^2$ |
| <i>UTJ</i> | 17,14 | 2,660 | 16,38 | 2,350 | 28,4 | $S < 32 \text{ см}^2$ |
| | 17,22 | 2,660 | 16,46 | 2,300 | 27,9 | $S > 50 \text{ см}^2$ |
| 29,5% <i>NeXt Triple Junction (XTJ)</i> | 17,76 | 2,633 | 17,02 | 2,348 | 29,5 | 2 ФЭП на подложке 100 мм |
| | 17,76 | 2,633 | 17,02 | 2,300 | 28,9 | 1 ФЭП на подложке 100 мм |
| | 17,76 | 2,633 | 17,02 | 2,323 | 29,5 | 2 ФЭП на подложке 150 мм |
| <i>30,7% XTJ Prime</i> | 18,00 | 2,720 | 17,50 | 2,406 | 30,7 | - |

На рисунке 16 представлен внешний вид этих ФЭП.

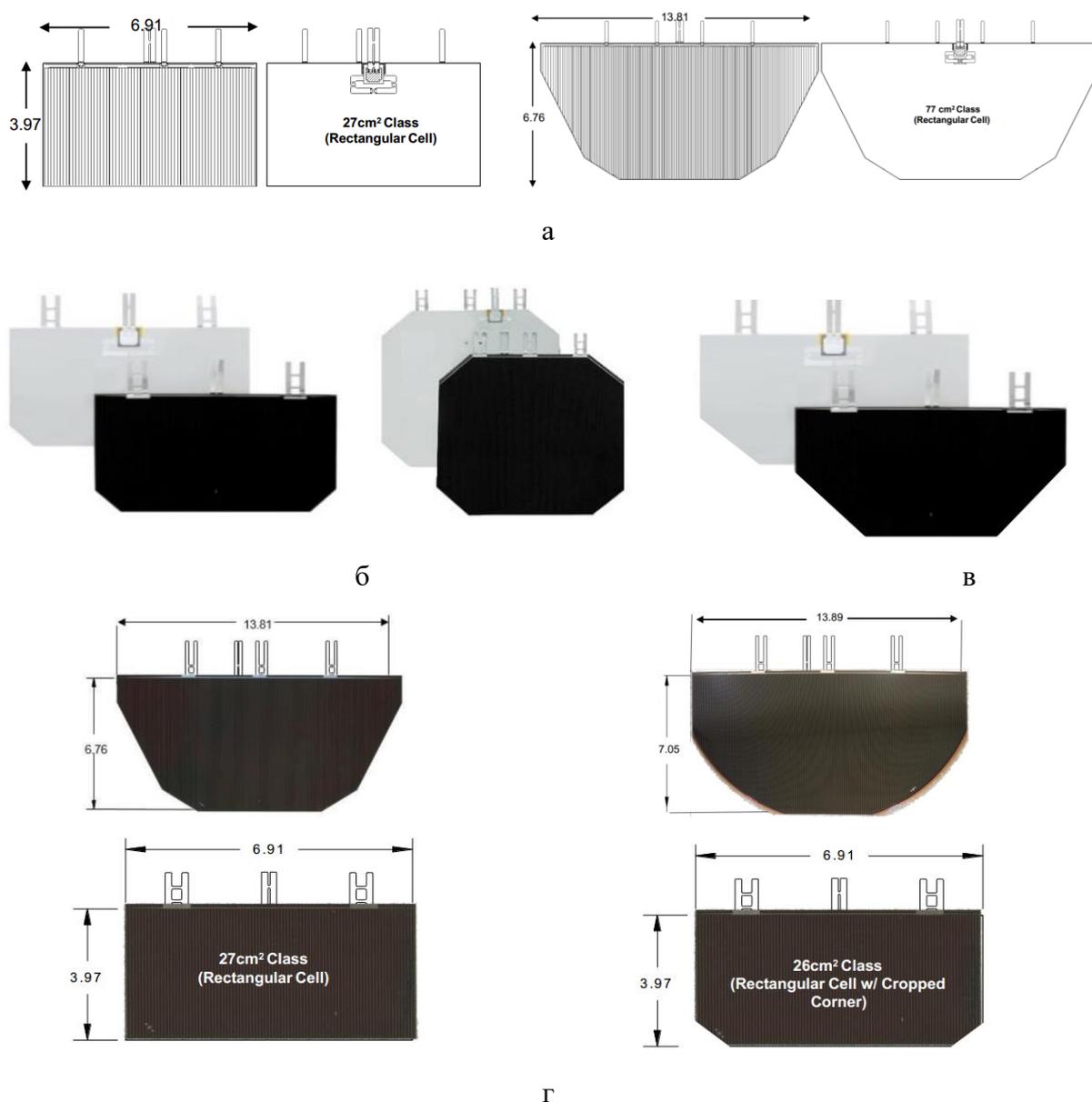


Рисунок 16 – ФЭП производства *Spectrolab, Inc.*: а – *XTE-HF*, *XTE-LILT* и *XTE-SF* (слева – 27 см²; справа – 77 см²); б – *UTJ* (слева – 26,6 см²; справа – 59,6 см²); в – 29.5% *NeXt Triple Junction*; г – 30.7% *XTJ Prime* [74]

Деградационные кривые электрических параметров рассмотренных ФЭП представлены на рисунке 17 [74]. ФЭП типа *XTE-HF* с трехкаскадной структурой является устойчивым к воздействию электронов ЕРПЗ высокого флюенса за счет использования РБО. САС таких ФЭП может достигать более 20 лет. Величина КПД составляет 32,1 % и 23,7 % на начало и конец (воздействие электронов с энергией 1 МэВ при флюенсе 10¹⁶ см⁻²) САС соответственно. ФЭП типа *UTJ* с трехкаскадной структурой толщиной 140 мкм (толщина традиционных трехкаскадных ФЭП составляет около 155 мкм без учета контактной структуры) имеют максимальную скорость деградации по J_{K3} (относительно остальных типов ФЭП), тогда как U_{XX} и P_{\max} снижаются незначительно, что оптимально для эксплуатации на низкой околоземной орбите (НОО) и ГСО.

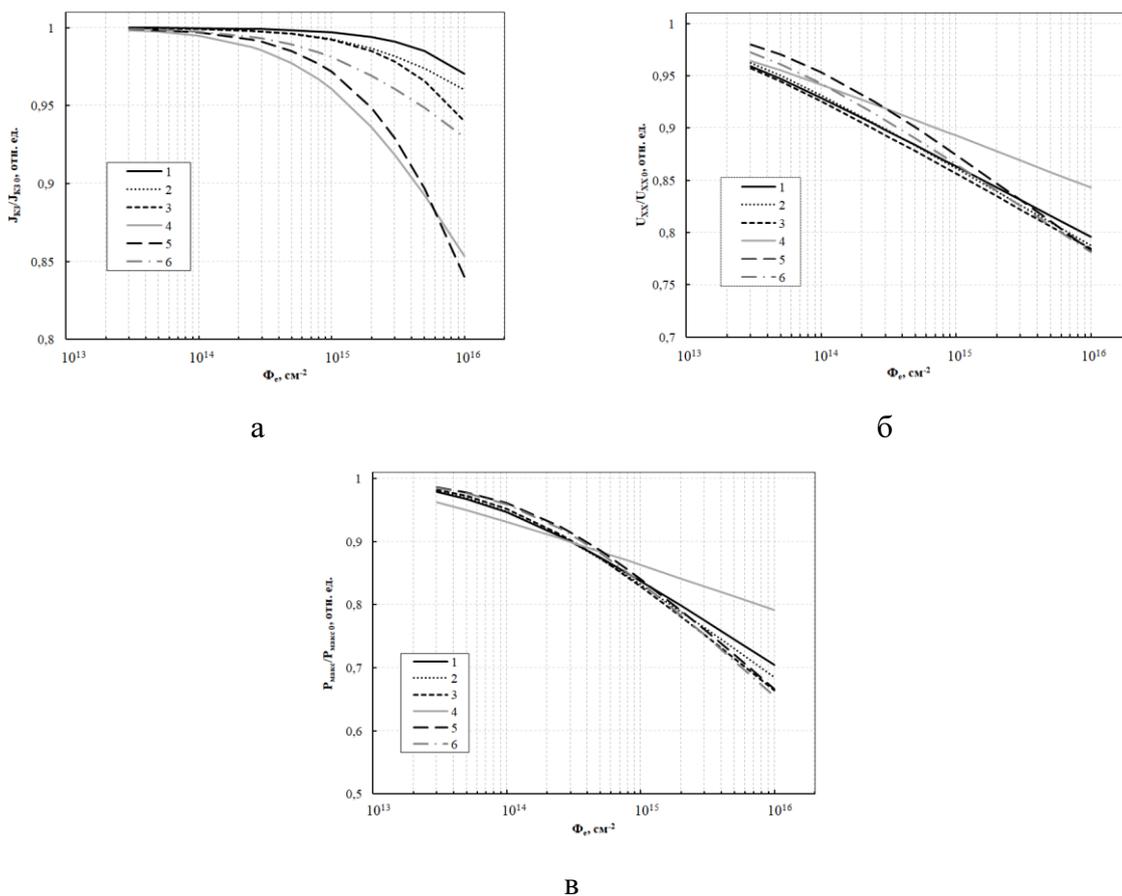


Рисунок 17 – Дegradационные кривые электрических параметров трехкаскадных ФЭП производства *Spectrolab, Inc.* в зависимости от воздействующего флюенса электронов с энергией 1 МэВ (1 – *XTE-HF*; 2 – *XTE-LILT*; 3 – *XTE-SF*; 4 – *UTJ*; 5 – 29.5% *NeXt Triple Junction (XTJ)*; 6 – 30.7% *XTJ Prime*) [74]: а – J_{k3} ; б – U_{XX} ; в – P_{max}

ФЭП производства *CESI SpA*

Компания *CESI SpA* (Италия) обладает 30-летним опытом в исследованиях, разработке и производстве высокоэффективных многпереходных ФЭП космического назначения. КПД преобразования солнечного излучения в электрическую энергию трехкаскадных ФЭП на основе *AlInBV* может достигать более 30 %. Многокаскадные ФЭП производства *CESI SpA* оптимальны для спутников НОО и ГСО. В таблице 5 представлены основные электрические параметры ФЭП, выпускаемых *CESI SpA* [75].

Таблица 5 – Основные электрические параметры многокаскадных ФЭП производства *CESI SpA* [75]

| Тип | S , см ² | $J_{кз}$, мА/см ² | $U_{ХХ}$, В | $J_{макс}$, мА/см ² | $U_{макс}$, мВ | КПД, % | $P_{макс}$ мВт/см ² |
|--------------------|-----------------------|-------------------------------|--------------|---------------------------------|-----------------|--------|--------------------------------|
| <i>СТJ30</i> | 26,50 | 17,85 | 2,60 | 17,17 | 2,32 | 29,50 | 39,83 |
| | 30,15 | 17,84 | 2,61 | 17,15 | 2,33 | 29,50 | 39,96 |
| <i>СТ J30-Thin</i> | 26,50 | 17,47 | 2,64 | - | - | 28,60 | 38,87 |

На рисунке 18а представлен трехкаскадный ФЭП на основе *InGaP/GaAs/Ge* типа *СТJ30*. Толщина такого ФЭП составляет (150 ± 20) мкм без учета контактов при массе на 1 см^2 (81 – 89) мг. ФЭП *СТJ30* имеют высокую радиационную стойкость и актуальны для применения на ВЭО и ГСО (рисунок 19). Площадь ФЭП типа *СТJ30* может быть 8 см^2 , $26,5 \text{ см}^2$, $27,5 \text{ см}^2$ и $30,15 \text{ см}^2$. Толщина металлических контактов (5 – 10) мкм [75].

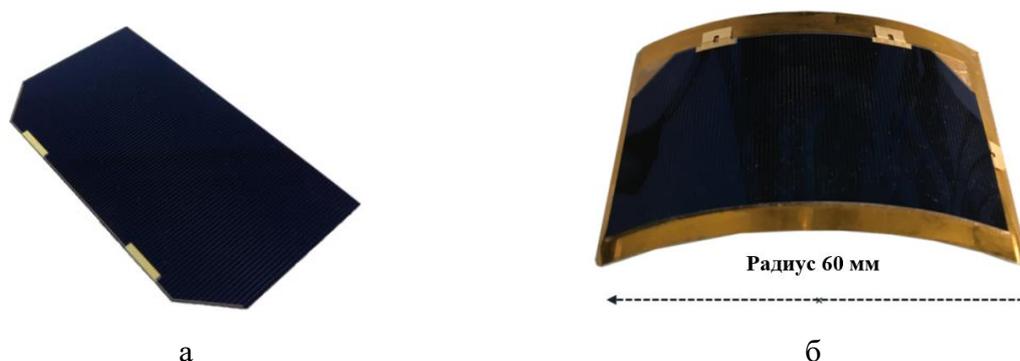


Рисунок 18 – Внешний вид ФЭП производства *CESI SpA*: а – *СТJ30*; б – *СТ J30-Thin* [75], [76]

На рисунке 18б представлен трехкаскадный ФЭП на основе *InGaP/GaAs/Ge* типа *СТJ30-Thin*, который схож по конструкции с ФЭП *СТJ30*, однако имеет толщину 80 мкм без учета контактов. ФЭП такого типа актуальны для эксплуатации на НОО. Масса 1 см^2 ФЭП 50 мг. Стандартные размеры ФЭП типа *СТJ30-Thin* имеют площадь $26,5 \text{ см}^2$, $27,5 \text{ см}^2$, $30,15 \text{ см}^2$. ФЭП *СТJ30-Thin* имеют высокую радиационную стойкость (рисунок 19) [75], [76].

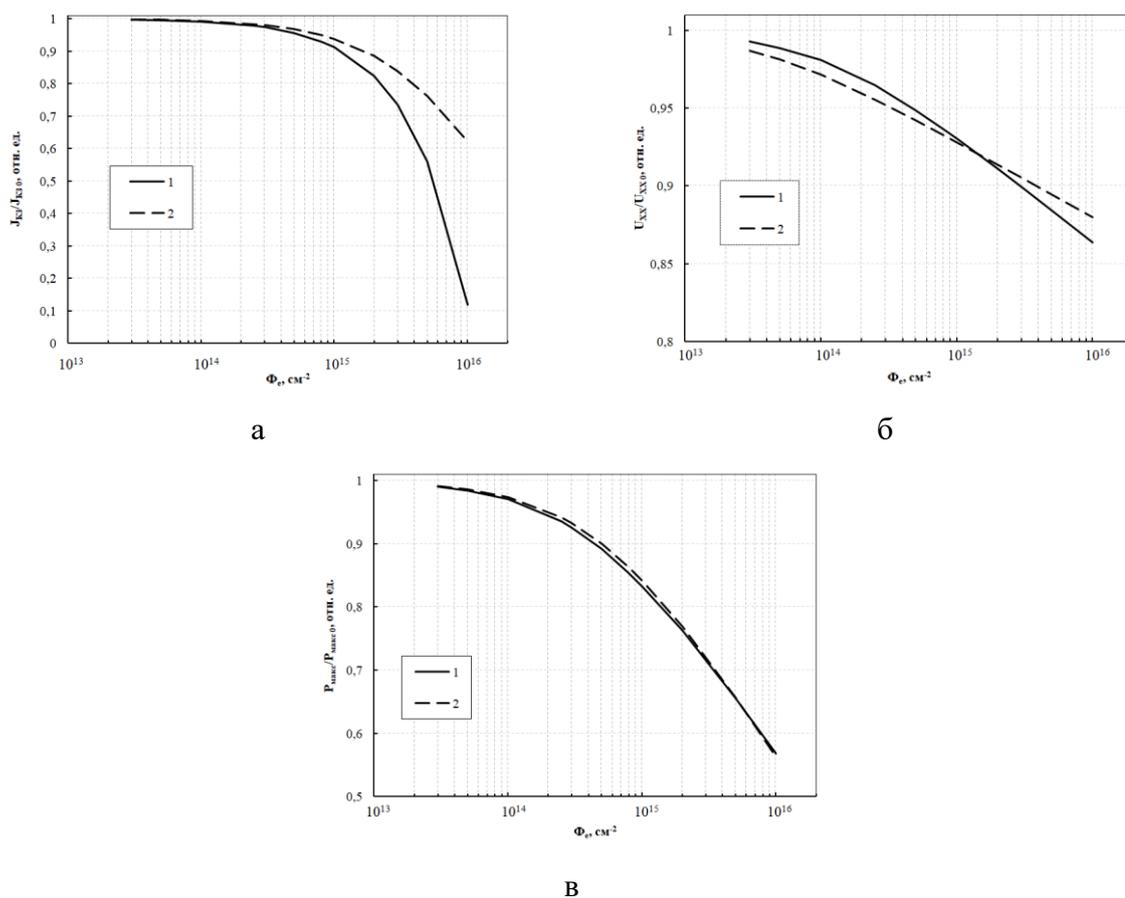
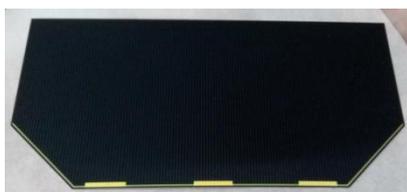


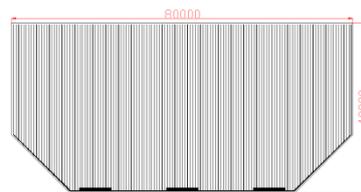
Рисунок 19 – Дegradационные кривые электрических параметров трехкаскадных ФЭП производства *CESI SpA* в зависимости от воздействующего флюенса электронов с энергией 1 МэВ (1 – *CTJ30*; 2 – *CT J30-Thin*) [75]: а – J_{K3} ; б – U_{XX} ; в – P_{max}

ФЭП производства *San'an Optoelectronics Co. Ltd.*

Компания *San'an Optoelectronics Co. Ltd.* (Китай), основанная в 2000 г., изготавливает трехкаскадные ФЭП космического назначения со структурой *GaN/InGaAs/Ge* на *Ge* подложке с КПД порядка 30 % (рисунок 20). Изготавливаемые ФЭП имеют двухслойное АОП – *TiO_x/Al₂O₃*, для металлизации используется серебро и золото. При общей толщине (145 ± 10) мкм размер производимых ФЭП составляет $(40 \pm 0,2)$ мм × $(80 \pm 0,2)$ мм. Средний вес на 1 см² – менее 75 мг. Основные электрические характеристики ФЭП: $J_{K3} = 17,4$ мА/см², $U_{XX} = 2,75$ В, $J_{max} = 16,7$ мА/см², $U_{max} = 2,5$ В, КПД = 30,8 %. Коэффициенты деградации электрических параметров для J_{K3} – 0,96, U_{XX} – 0,9, J_{max} – 0,94, U_{max} – 0,9, КПД – 0,85 [77].



а



б

Рисунок 20 – Трехкаскадный ФЭП производства *San'an Optoelectronics Co. Ltd.*:
а – внешний вид; б – чертеж контактной сетки [77]

ФЭП производства *Sharp Global Corporation*

Компания *Sharp Global Corporation* (Япония) с 1959 года занимается исследованиями и разработками в области ФЭП космического назначения. На рисунке 21 представлен утоненный ФЭП [78]. Данных по электрическим параметрам традиционных трехкаскадных ФЭП (*SHARP 502*) космического назначения производства *Sharp Global Corporation* в открытом доступе обнаружено не было. Электрические параметры тонкопленочных многокаскадных ФЭП (рисунок 21) производства *Sharp Global Corporation* представлены в таблице 6.



Рисунок 21 – ФЭП *IMM-3J* производства *Sharp Global Corporation* [79]

Таблица 6 – Основные электрические параметры тонкопленочных многокаскадных ФЭП производства *Sharp Global Corporation* [75]

| Тип | S , см ² | $J_{КЗ}$, мА/см ² | U_{XX} , В | $J_{макс}$, мА/см ² | $U_{макс}$, мВ | КПД, % | $P_{макс}$ мВт/см ² |
|---------------------------|-----------------------|-------------------------------|--------------|---------------------------------|-----------------|--------|--------------------------------|
| <i>IMM-3J Type A cell</i> | 27,4 | 16,24 | 3,05 | 15,84 | 2,66 | 30,8 | 41,97 |
| <i>IMM-3J Type B cell</i> | 27,4 | 16,68 | 3,10 | 16,17 | 2,71 | 32,1 | 43,80 |

Тонкопленочные ФЭП производства *Sharp Global Corporation* разработаны в двух конфигурациях:

- *IMM-3J Type A cell*, который имеет довольно высокую радиационную стойкость;
- *IMM-3J Type B cell*, который предназначен для миссий, где не требуется высокой радиационной стойкости.

Эти ФЭП изготавливаются путем инвертированного выращивания верхнего каскада на основе *InGaP*, среднего каскада – *GaAs* и нижнего каскада – *InGaAs* методом газофазной эпитаксии. Следует отметить, что ФЭП типа *IMM-3J Type B cell* имеет нижний каскад на основе *InGaAs* с более широкой E_g (более низким содержанием *In*) по сравнению с аналогичным каскадом ФЭП типа *IMM-3J Type A cell*. Далее слои каскадов монтировались на пленку толщиной (10 – 20) мкм после удаления подложек на основе *GaAs*, затем осуществлялся процесс изготовления ФЭП.

Деграционные кривые электрических параметров представлены на рисунке 22 [79].

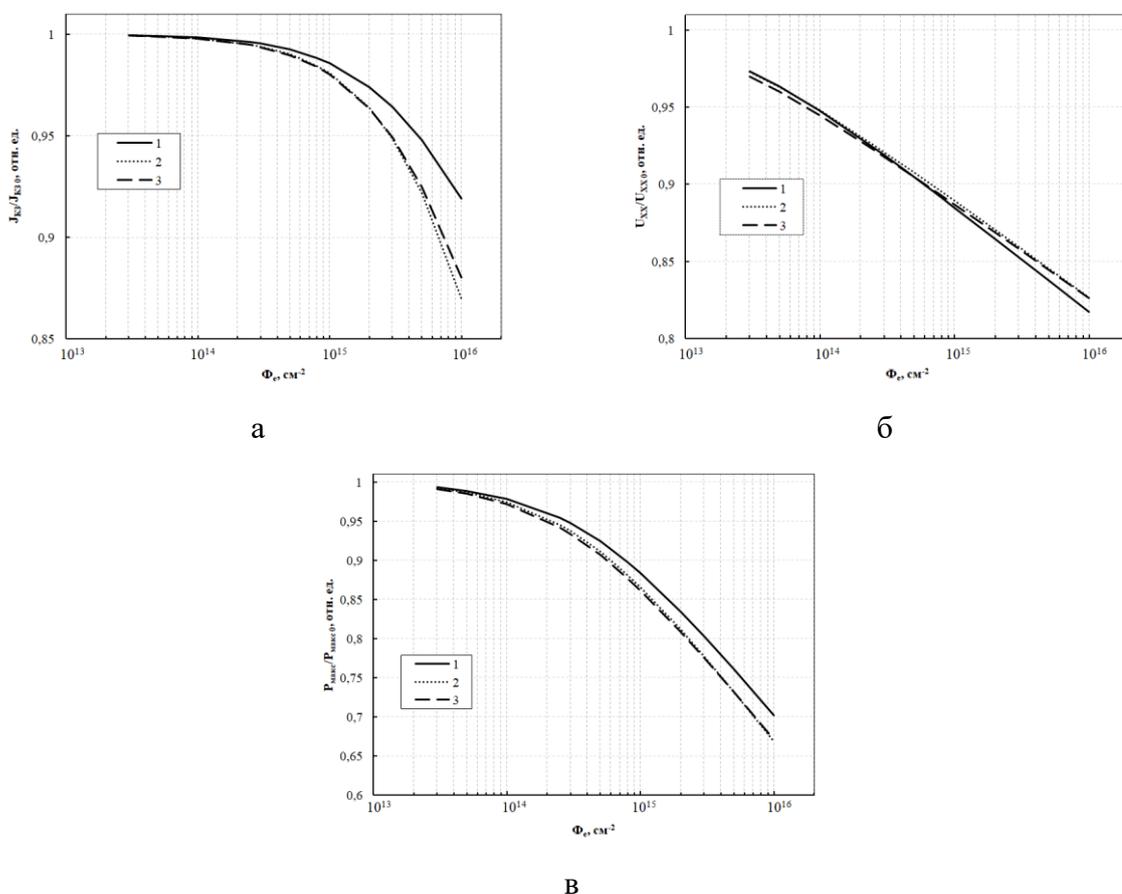


Рисунок 22 – Деграционные кривые электрических параметров трехкаскадных ФЭП производства *Sharp Global Corporation* в зависимости от воздействующего флюенса электронов с энергией 1 МэВ (1 – *IMM-3J Type A*; 2 – *IMM-3J Type B*; 3 – *SHARP 502*) [79]: а – $J_{КЗ}$; б – U_{XX} ; в – P_{max}

При сравнении тонкопленочных структур с традиционными трехкаскадными ФЭП космического назначения (*SHARP 502*) можно сделать вывод, что ФЭП типа *IMM-3J Type A* имеет высокую радиационную стойкость несмотря на то, что электрические параметры в начале САС ниже, чем у ФЭП типа *IMM-3J Type B*.

ФЭП производства ПАО «Сатурн»

Публичное акционерное общество «Сатурн» (ПАО «Сатурн») (Россия) занимается разработкой и изготовлением ФЭП и БС космического назначения с 1971 года. На рисунке 23 представлен внешний вид ФЭП производства ПАО «Сатурн». В таблице 7 представлены основные электрические параметры ФЭП производства ПАО «Сатурн» [80].

Таблица 7 – Основные электрические параметры многокаскадных ФЭП производства ПАО «Сатурн» [80]

| Тип ФЭП | $J_{кз}$, мА/см ² | $U_{ХХ}$, В | $J_{макс}$, мА/см ² | $U_{макс}$, мВ | КПД, % |
|-------------------------------|-------------------------------|--------------|---------------------------------|-----------------|--------|
| <i>GaInP/GaAs/Ge</i> серия 28 | 16,8 | 2,667 | 16,1 | 2,371 | 28,0 |
| <i>GaInP/GaAs/Ge</i> серия 30 | 17,44 | 2,685 | 16,82 | 2,394 | 29,5 |

Можно предположить, что ФЭП *серии 28* изготавливается без включения в полупроводниковую структуру РБО, и обратное, для ФЭП *серии 30*.

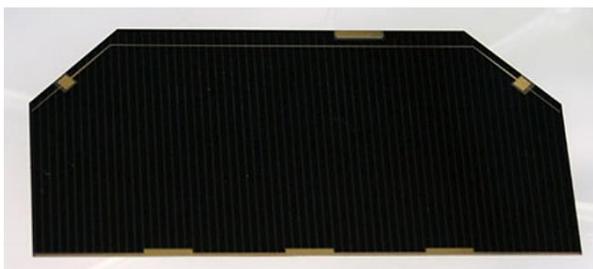


Рисунок 23 – Трехкаскадный ФЭП производства ПАО «Сатурн» [80]

На рисунке 24 представлены деградационные кривые основных электрических параметров ФЭП производства ПАО «Сатурн». Ввиду отсутствия данных о радиационных испытаниях в открытом доступе сложно провести анализ ФЭП различных серий производства ПАО «Сатурн».

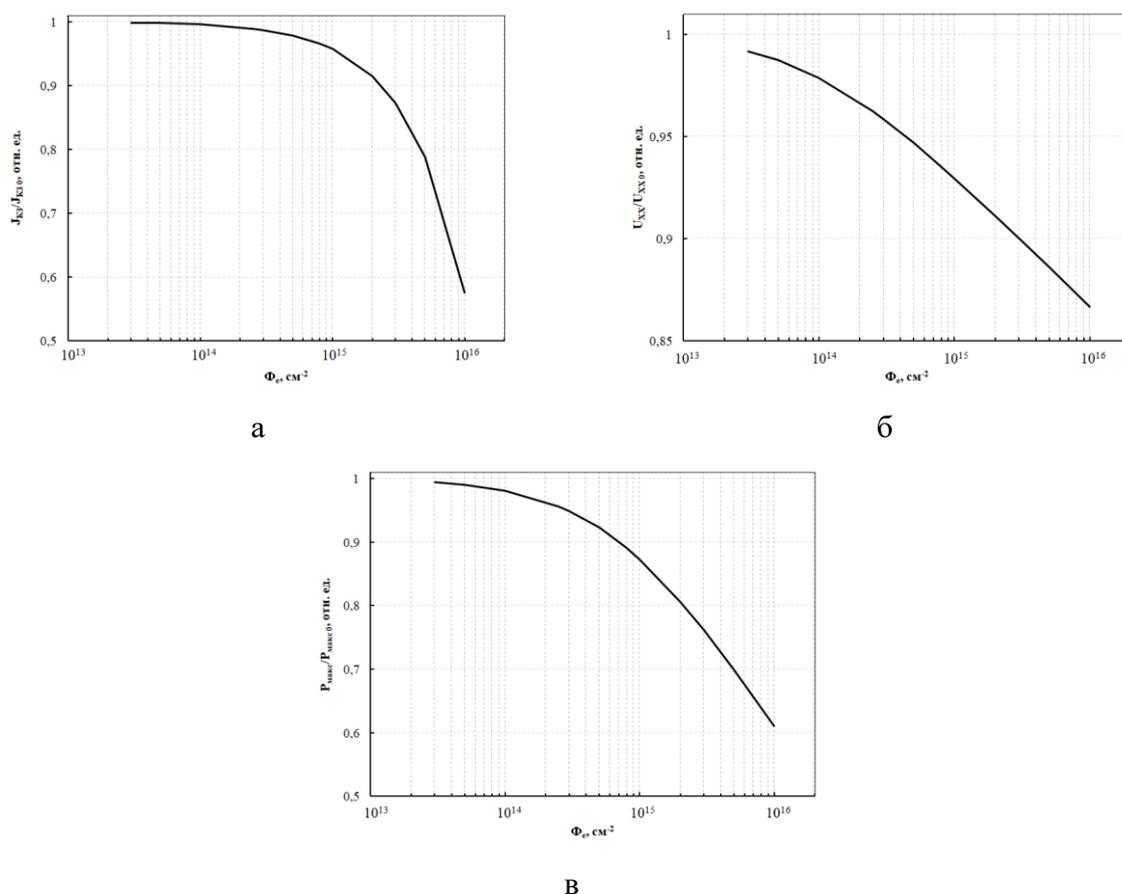


Рисунок 24 – Дegradационные кривые электрических параметров трехкаскадных ФЭП производства ПАО «Сатурн» в зависимости от воздействующего флюенса электронов с энергией 1 МэВ [80]: а – $J_{кз}$; б – U_{xx} ; в – P_{max}

ФЭП производства АО «НПП «Квант»

АО «НПП «Квант» является ведущим предприятием ракетно-космического комплекса в России в части создания средств автономной энергетики космического назначения. Одним из основных научно-технических направлений деятельности АО «НПП «Квант» является изготовление ФЭП и создание на их основе автономных источников электропитания бортовой аппаратуры КА. Внешний вид ФЭП, изготавливаемый на предприятии, представлен на рисунке 25. Электрические параметры ФЭП производства АО «НПП «Квант»: $J_{кз} = 17,51 \text{ mA/cm}^2$, $U_{xx} = 2,71 \text{ В}$, $J_{max} = 16,57 \text{ mA/cm}^2$, $U_{max} = 2,45 \text{ В}$, $P_{max} = 40,53 \text{ мВт/cm}^2$, КПД = 30,36 %. На рисунке 26 представлены коэффициенты деградации электрических параметров.



Рисунок 25 – Трехкаскадный ФЭП производства АО «НПП «Квант» [1]

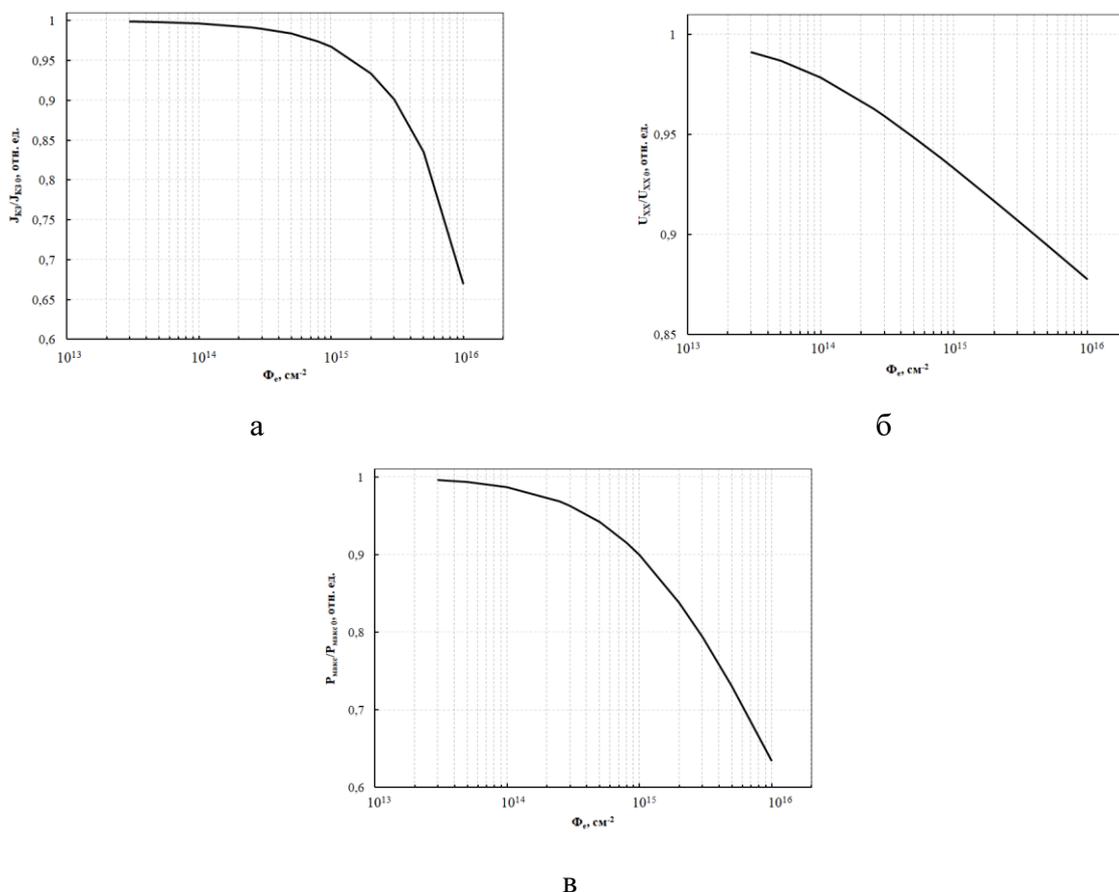


Рисунок 26 – Дegradационные кривые электрических параметров трехкаскадных ФЭП производства АО «НПП «Квант» в зависимости от воздействующего флюенса электронов с энергией 1 МэВ [1]: а – $J_{кз}$; б – $U_{хх}$; в – $P_{макс}$

1.3.3 Отжиг радиационных дефектов ФЭП

Применение отжига позволяет частично удалить радиационные повреждения, которые генерируются в результате облучения ФЭП и, как следствие, частично восстановить электрические параметры поврежденного устройства.

Условно отжиг можно разделить на пять стадий [81]:

- рекомбинация пар Френкеля за счет движения междоузельных атомов;
- междоузельные атомы уходят на более дальние стоки дефектов;
- температура нагрева достигает величины, при которой кластеры дефектов начинают распадаться (например, междоузельные атомы уходят из примесных ловушек);

– вакансии начинают мигрировать к стокам дефектов и возникают скопления вакансий;

– дефекты интенсивно выходят на поверхность материала и другие изменения в кристаллической решетке.

Для отжига любого дефекта ему требуется сообщить энергию активации отжига (E_a) определенной величины. Для кластеров из дефектов (если нет ограничения миграцией частиц в кристалле) E_a является энергией связи дефектов в кластере. Вероятность накопления энергии E_a зависит от температуры полупроводника. В случае низкой температуры вероятность накопления E_a будет весьма низкой и отжига проходить не будет. В данных условиях дефекты не находятся в условиях равновесия, однако при такой температуре они устойчивы. Чем больше температура, тем выше вероятность накопления E_a , достаточной для отжига дефектов. Поэтому чаще всего для аннигиляции дефектов используют высокотемпературный отжиг. Результат отжига будет зависеть от исходного набора дефектов, примесного состава материала, температуры и времени отжига [81].

Параметры процесса отжига обычно определяются дозой и типом заряженных частиц. Наиболее распространенные методы отжига: термический и инжекционный. Однако, чтобы реализовать данный способ в космосе, необходимо преодолеть ряд технических трудностей [82].

Изохорный отжиг

Изохорный отжиг – отжиг радиационных дефектов ФЭП, при котором температура устанавливается диапазонами. На рисунке 27а представлен пример графика режима изохорного отжига [83].

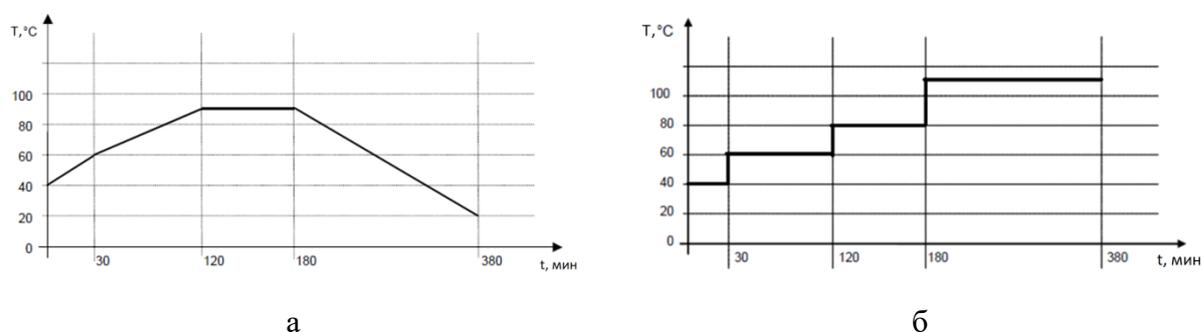


Рисунок 27 – Характерный график зависимости температуры от времени отжига [83]: а – при изохорном отжиге; б – при изотермическом отжиге

При изотермическом отжиге убрать из полупроводникового материала дефекты всех типов в течение продолжительного времени невозможно. Чем больше E_a , тем в большем температурном диапазоне дефект (кластер) будет устойчивым. Поэтому в литературе предлагается использовать изохронный отжиг [84].

Для понимания эффективности применения изохорного отжига ниже рассмотрено его влияние на ФЭП на основе полупроводниковых материалов $АІІІВV$ на примере литературных источников.

В работе [9] представлены результаты отжига ФЭП со структурой $In_{0,48}Ga_{0,52}P/In_{0,01}Ga_{0,99}As/Ge$ без радиационно-стойкого стекла, облученные электронами энергией 1 МэВ флюенсом в диапазоне от $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ до $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Нагрев образцов осуществлялся в диапазоне от 100 °С до 300 °С в течении 20 минут. Основные дефекты, возникающие в $p\text{-}AllnGaP$ при облучении электронами энергией 1 МэВ были $H1$ и $H2$, которые действуют как центры рекомбинации и вызывают деградацию свойств ФЭП. Концентрация дефекта $H1$ постепенно уменьшается при температурах выше 100 °С и отжигается при температуре около 250 °С. Концентрация дефекта $H2$ остается практически неизменной при температуре отжига до 100 °С и уменьшается при температуре выше 100 °С. В работе [85] было отмечено, что в облученных электронами с энергией 1 МэВ ФЭП на основе $GaAs$ n -типа образуются ловушки $E1 - E5$ (рисунок 28). При отжиге в течение 10 минут при температуре 197 °С концентрация ловушек $E3, E4, E5$ уменьшается в 2 раза, ловушка $E2$ также отжигается, но при более высокой температуре (227 °С). В результате отжига в структуре ФЭП могут возникать ловушки $P1 - P3$, аналогичным частым собственным дефектом в эпитаксиальных слоях либо маскирующихся ловушками $E4$ и $E5$.

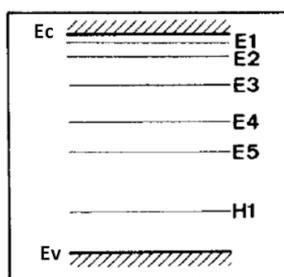


Рисунок 28 – Схематическая диаграмма расположения уровней энергии ловушек, вызванных электронным облучением в $GaAs$ в E_g [85]

Изотермический отжиг

Изотермический отжиг – отжиг радиационных дефектов ФЭП, при котором температура отжига фиксируется, но параметры процесса устанавливаются общим

временем нагрева [83]. На рисунке 27б представлен пример графика режима изотермического отжига.

Эффективность рассматриваемого типа отжига подтверждается литературными данными для ФЭП на основе полупроводниковых материалов *АІІІВV*. Так, например, в работе [86] представлены результаты экспериментального отжига ФЭП со структурой *GаInP/GаAs/Ge* без радиационно-стойкого стекла, облученных протонами энергией 0,75 МэВ, 2,0 МэВ и 6,5 МэВ флюенсом в диапазоне от $5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ до $5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Изотермический отжиг проводился при следующих условиях: без освещения в печи; при *АМО* в режиме холостого хода на нагревательном элементе; при *АМО* в режиме короткого замыкания на нагревательном элементе; при трехкратной концентрации спектра *АМО* в режиме короткого замыкания. Элементы нагревались в течение 24 часов на каждом шаге температур: 100 °С, 150 °С, 180 °С, 230 °С, 250 °С. При облучении и отжиге доминирует средний каскад на основе *GаAs*, поскольку вклад в мощность от *Ge* каскада минимален, а верхний каскад *InGaP* менее подвержен радиации. При этом каскад на основе *Ge* восстанавливается в два раза сильнее, чем средний каскад на основе *GаAs*, и достигает после изотермического отжига почти его первоначального значения. Авторами [86] было отмечено, что относительное восстановление всех каскадов ФЭП не зависит значительно от энергии воздействующих частиц. При этом некоторые дефекты в ФЭП не восстанавливаются после отжига, так называемые «необратимые» дефекты. Количество «необратимых» дефектов меньше в ФЭП, облученных более низким флюенсом.

При нагреве ФЭП с аналогичной структурой, облученного электронами с энергией 1 МэВ [87], в течение 24 часов до 150 °С восстановление электрических характеристик очень мало, в пределах погрешности. Если же нагрев идет в течение 528 часов, то $U_{\text{ХХ}}$ восстанавливается на 0,16. При нагреве до 180 °С на протяжении 390 часов уже через 140 часов величина $I_{\text{КЗ}}$ восстанавливается полностью и устойчива даже при повышении температуры отжига до 230 °С. После отжига 200 °С более 2000 часов ФЭП имеют стабильные электрические свойства.

Предполагается, что в процессе отжига относительная концентрация ловушки *E2*, имеющей большое влияние на электрические характеристики ФЭП, уменьшается с 68 % до 41 % с увеличением температуры при режиме отжига: 190 °С (300 минут), 200 °С (270 минут), 210 °С (140 минут), 220 °С (140 минут) [85].

Инжекционный отжиг

Инжекционный отжиг – это отжиг радиационных дефектов ФЭП, который представляет собой инъекцию ННЗ при пропускании тока через ФЭП в прямом направлении [83].

Считается, что в $InGaP$ и $InGaAsP$ при инъекции ННЗ в результате процесса безызлучательной рекомбинации происходит усиление отжига дефектов за счет механизма Бургоина – миграции дефекта, вызванной альтернативным изменением его зарядового состояния [88]. При этом скорость отжига возрастает с увеличением плотности тока инъекции и температуры.

По литературным данным [88] для ФЭП на основе полупроводниковых материалов $AIII BV$, облученных протонами энергией 3 МэВ флюенсом 10^{11} см^{-2} , 10^{12} см^{-2} , 10^{13} см^{-2} максимальное восстановление мощности после инжекционного отжига с плотностью тока 100 мА/см^2 :

- составляет 1,8 % для $In_{0,5}Ga_{0,5}P$;
- составляет 1,2 % для $In_{0,72}Ga_{0,28}As_{0,62}P_{0,38}$;
- для $In_{0,53}Ga_{0,47}As$ восстановления не наблюдалось, поскольку требуется более высокая плотность тока инъекции чем 100 мА/см^2 или более высокая температура отжига относительно комнатной.

Авторы работы [89] утверждают, что скорость отжига при инъекции ННЗ в условиях прямого смещения для облученных электронами энергией 1 МэВ при флюенсе в диапазоне от $3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ до $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ ФЭП со структурой $InGaP/GaAs$ в 2 раза ниже, чем для ФЭП с одним каскадом $InGaP$.

При одновременном воздействии температурного ($25 \text{ }^\circ\text{C}$, $55 \text{ }^\circ\text{C}$ и $70 \text{ }^\circ\text{C}$) и инжекционного (100 мА/см^2) типов отжига [9] на ФЭП со структурой $In_{0,48}Ga_{0,52}P/In_{0,01}Ga_{0,99}As/Ge$, облученных электронами с энергией 1 МэВ при флюенсе в диапазоне от $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ до $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ отжигаются дефекты $H1$ и $H2$, которые выступают в качестве центров рекомбинации.

Также на эффективность инжекционного отжига сказывается его продолжительность. Для ФЭП на основе $(Al_{0,20}Ga_{0,8})_{0,52}In_{0,48}P$, облученных протонами с энергией 30 кэВ с флюенсом в диапазоне от $1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ до $1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, концентрация ловушек $HP1$ уменьшается с увеличением времени инъекции [88].

Выводы по литературному обзору и постановка задач исследования

Современные трехкаскадные ФЭП на основе полупроводниковых материалов *AIII BV* способны обеспечивать электропитанием бортовую аппаратуру КА на протяжении минимум 15 лет. Одним из основных ФКП, определяющих САС КА, является воздействие радиации на БС, что в первую очередь негативно сказывается на электрических характеристиках ФЭП БС.

Увеличение радиационной стойкости возможно за счет изменения конструкции современных ФЭП, например, включение РБО, увеличение числа каскадов и другое. Однако при внесении изменений в технологию изготовления ФЭП в первую очередь следует учитывать:

- сложность технологических операций, поскольку необходимо вырастить структуры с требуемыми оптическими свойствами – четкие границы раздела между слоями, хорошая морфология, низкое последовательное сопротивление и другое;

- дороговизну технологии изготовления;

- наличие высокопрецизионного оборудования;

- длительное время, требуемое на отработку технологии и ее внедрение в серийное производство и другое.

Другой способ повышения электрических параметров облученных полупроводниковых приборов, известный в мировой практике – отжиг. Несмотря на то, что большую эффективность имеет термический отжиг, наиболее приемлемым для применения в КП является инжекционный отжиг. Для реализации инжекционного отжига необходим только внешний источник питания, которым могут быть сами ФЭП, подключенные определенным образом, что будет рассмотрено в работе далее. Тогда как для температурного отжига необходима соответствующая оснастка, которая может располагаться с фронтальной и тыльной сторон БС, для получения наибольшего восстановления структуры, что приведет к затенению ФГЧ БС. Кроме того, оснастка значительно утяжелит конструкцию самого КА, что недопустимо [90].

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:

- исследование деградации каскадов на основе *InGaP*, *InGaAs*, *Ge* в составе полупроводниковой структуры ФЭП при воздействии ионизирующего излучения;

– разработка схемы подключения ФГЧ БС с возможностью применения инжекционного отжига многокаскадных ФЭП за счет стимулированной люминесценции полупроводниковой структуры *InGaP/InGaAs/Ge*;

– исследование степени восстановления каскада на основе *InGaAs* в составе полупроводниковой структуры ФЭП при воздействии инжекционного отжига;

– определение эффективного режима отжига многокаскадных ФЭП на основе полупроводниковых материалов *AlInBV/Ge* в зависимости от радиационных условий, в которых эксплуатируется БС КА.

Глава II. Комплексные методы анализа степени деградации полупроводниковой структуры многокаскадных ФЭП на основе полупроводниковых материалов *AlInBV/Ge*

Неравномерное влияние радиации на полупроводниковую структуру и, как следствие, на выходные характеристики ФЭП побуждает к исследованию этого воздействия. Однако существенные ограничения на возможности анализа вносит сложная многокаскадная структура современного ФЭП. Для решения этой проблемы, некоторые исследователи используют специально созданные элементы, аналогичные каскадам ФЭП [71], [93], что требует дополнительных затрат. Кроме того, исключение из структуры каких-либо слоев может оказывать влияние на результат. Например, как показано в работах [6], [92], в самой структуре многокаскадного ФЭП может возникать переотражение падающего излучения, что способно увеличить генерацию тока в верхних каскадах. К тому же, разработчикам при формировании отдельных слоев структуры необходимо учитывать их взаимное влияние, которое возникает в процессе эпитаксиального роста, например, размытие границ между слоями.

В настоящей главе рассматривается методика расчета электрических параметров каскадов облученного ФЭП, основанная на широко известных методах исследования полупроводниковых приборов. При использовании этой методики отсутствует необходимость изготовления дополнительных элементов, аналогичных каскадам ФЭП, и учитывается взаимное влияние слоев структуры.

2.1 Объект исследования

В ходе эксперимента исследовались ФЭП площадью $2,5 \text{ см}^2$ с трехкаскадной структурой *InGaP/InGaAs/Ge* производства АО «НПП «Квант» (рисунок 29).



Рисунок 29 – ФЭП со структурой *InGaP/InGaAs/Ge* производства АО «НПП «Квант»

В рассматриваемом типе полупроводникового прибора эпитаксиально выращенные каскады сформированы на основе функциональных материалов: верхний – *InGaP* ($E_g = 1,9 \text{ эВ}$), средний – *InGaAs* ($E_g = 1,4 \text{ эВ}$), нижний – *Ge* ($E_g = 0,66 \text{ эВ}$), – и

отвечают требованиям согласования по параметру решетки. В силу природы материалов верхний и средний каскады преобразуют малые диапазоны длин волн фотонов, что ведет к генерации плотности фототока малой величины – около $(17 - 19) \text{ мА/см}^2$, а величина $U_{\text{ХХ}}$ составляет около 1,41 В и 1,01 В соответственно [93]. Каскад на основе *Ge* генерирует фототок величиной около 27 мА/см^2 , при этом величина $U_{\text{ХХ}}$ в среднем составляет 0,2 В [93].

2.2 Описание эксперимента

Целью эксперимента является исследование деградации каскадов на основе *InGaP*, *InGaAs*, *Ge* в составе полупроводниковой структуры ФЭП при воздействии ионизирующего излучения.

Исследование деградации отдельных каскадов в составе современного ФЭП, традиционно применяемого в КП, основана на косвенных методах и включает в себя следующую последовательность действий:

- исследование электрических и спектральных характеристик ФЭП: ВАХ (спектр *АМ0*, концентрация излучения 3 крат, температура 25 °С), спектры ВКВФ (спектр *АМ0*, температура 25 °С) и ЭЛ (температура 25 °С);
- облучение ФЭП электронами с энергией 7 МэВ и флюенсом 10^{15} см^{-2} ;
- повторное исследование электрических и спектральных характеристик ФЭП;
- приведение ВАХ до и после облучения ФЭП к 1 крат;
- построение зависимости пиков интенсивности ЭЛ от плотности тока инжекции каскадов до и после облучения ФЭП;
- построение теоретических ВАХ каскадов до и после облучения ФЭП;
- расчет основных электрических параметров каскадов ФЭП и оценка степени их деградации.

2.3 Оборудование

Облучение ФЭП проводилось электронами с энергией 7 МэВ и флюенсом 10^{15} см^{-2} на линейном резонансном ускорителе электронов «Электроника У-003» (рисунок 30). В таблице 8 представлены основные технические характеристики ускорителя.

Измерение ВАХ проводилось с помощью имитатора концентрированного солнечного излучения – установки для измерения электрических характеристик ФЭП с системой концентрированного (от 3 крат до 1000 крат) импульсного излучения с

измерительным блоком регистрации характеристик ФЭП. Спектральный состав излучения – $AM0$, интегральная плотность потока – $1366 \text{ Вт/м}^2\text{с}$ погрешностью 2%. Внешний вид импульсного имитатора солнечного излучения представлен на рисунке 31. Технические характеристики установки представлены в таблице 9.

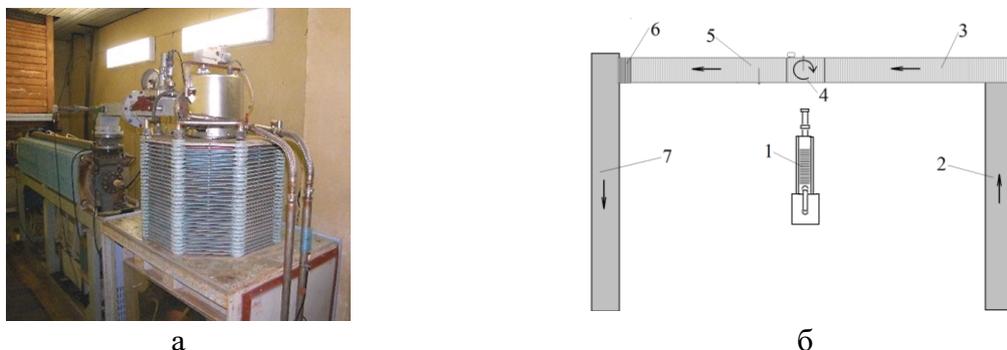


Рисунок 30 – Линейный резонансный ускоритель электронов «Электроника У-003»: а – внешний вид [94]; б – схема конвейерной линии, вид сверху (1 – ускоритель электронов; 2, 7 – ленточный конвейер; 3, 5 – цепной конвейер; 4 – карусельный транспортер; 6 – рольганг) [95]

Таблица 8 – Основные технические характеристики ускорителя электронов «Электроника У-003» [94]

| № п/п | Техническая характеристика | Значение |
|-------|--|--|
| 1 | Диапазон регулирования энергии, МэВ | 4 – 8 |
| 2 | Длительность импульса тока, с | $1 \cdot 10^6, 2 \cdot 10^6, 4 \cdot 10^6$ |
| 3 | Импульсный ток (плавно регулируемый) при длительности (1 – 4) мкс, А | 0 – 1 |
| 4 | Частота следования импульсов тока, с^{-1} | 300, 200, 100, 50, 10, 1 |
| 5 | Максимальная средняя мощность пучка, кВт | ≥ 5 |
| 6 | Диаметр пучка, мм | 5 – 10 |
| 7 | Длина строки развертки, мм | 400 |

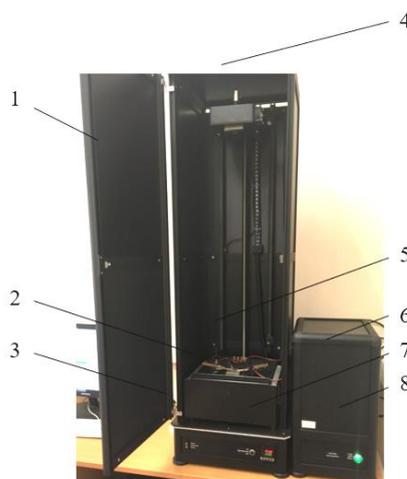


Рисунок 31 – Внешний вид имитатора концентрированного солнечного излучения для измерения ВАХ ФЭП: 1 – светозащитный кожух; 2 – измерительная система и система регистрации характеристик ФЭП; 3 – кнопка регулятора положения осветителя; 4 – осветитель; 5 – терморегулируемое основание для ФЭП; 6 – блок питания; 7 – лицевая панель термоконтроллера; 8 – кнопка включения установки

Таблица 9 – Основные технические характеристики импульсного имитатора солнечного излучения для измерения ВАХ ФЭП

| № п/п | Техническая характеристика | Значение |
|-------|--|-----------|
| 1 | Спектральный состав излучения | АМ0 |
| 2 | Интегральная плотность потока (с погрешностью 2 %), Вт/м ² | 1366 |
| 3 | Длительность плоской части импульса излучения (при отклонениях не более ± 3 %), мс | 1,0 – 1,2 |
| 4 | Напряжение, прикладываемое к исследуемому ФЭП от активной нагрузки, В | ± 8 |
| 5 | Неравномерность распределения освещенности, % | ± 3 |
| 6 | Регистрируемый ток, А | 0 – 10 |
| 7 | Точность измерения напряжения и тока, % | 0,2 |
| 8 | Время записи световой или темновой ВАХ, мс | 1 |
| 9 | Концентрация солнечного излучения, крат | 3 – 1000 |

ВАХ получают в результате измерения значения величин тока и напряжения на подключенной к ФЭП нагрузке при изменении сопротивления нагрузки за время светового импульса. При этом управление установкой осуществляется специальным программным комплексом и регистрируется на персональном компьютере (ПК), который в результате измерения выдает полный график ВАХ, а также выводит рассчитанные из ВАХ электрические параметры исследуемого ФЭП (рисунок 32):

- $I_{КЗ}$ или фототок – ток, который протекает через внешнюю цепь, когда внешние контакты ФЭП закорочены;
- $U_{ХХ}$ – напряжение, при котором ток не протекает через внешнюю цепь;
- $P_{\text{макс}}$ – максимальное значение произведения напряжения и тока, вырабатываемые ФЭП;
- FF – отношение между $P_{\text{макс}}$, вырабатываемой ФЭП, и произведением $U_{ХХ}$ и $I_{КЗ}$;
- $КПД$ – отношение $P_{\text{макс}}$ к мощности внешнего источника излучения $P_{\text{ист}}$.

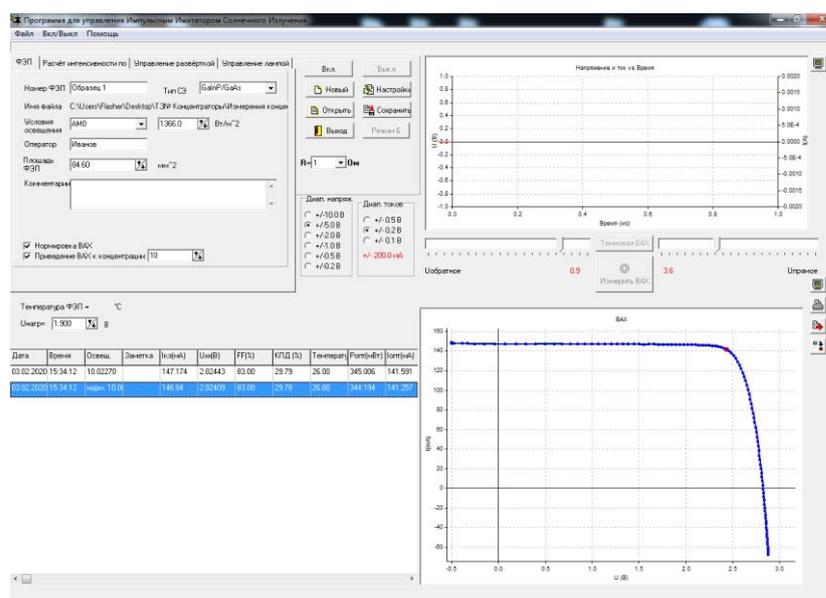


Рисунок 32 – Общий вид окна специального программного комплекса с результатами измерения ВАХ

Для измерения ВАХ на применяемом типе имитатора солнечного излучения необходимо задать в управляющей программе значение фототока ФЭП при 1 крат, которое было получено расчетным путем из спектров ВКВФ ФЭП.

Съемка спектров ВКВФ проводилась с помощью установки для исследования спектральных зависимостей ВКВФ ФЭП в диапазоне длин волн от 320 нм до 1840 нм (рисунок 33).

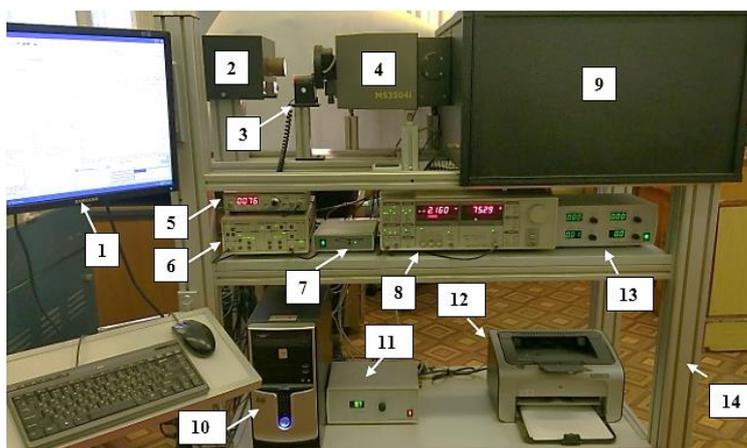


Рисунок 33 – Общий вид установки для исследования спектральных зависимостей ВКВФ ФЭП: 1 – монитор с управляющей программой; 2 – осветитель с галогенной лампой; 3 – модулятор с шаговым двигателем и зонными светофильтрами лабораторный; 4 – монохроматор; 5 – преобразователь ток-напряжение; 6 – предоусилитель тока; 7 – блок контроля и управления оптической схемой; 8 – селективный вольтметр; 9 – защитный кожух блока образцов; 10 – ПК; 11 – источник питания осветителя; 12 – принтер; 13 – источник светового смещения; 14 – лабораторный стол с кронштейном для крепления периферийного устройства ПК

Установка оснащена дополнительными монохроматическими осветителями – светодиодами повышенной яркости с длинами волн 460 нм и 840 нм соответственно, лазерным диодом – 1060 нм. Дополнительные монохроматические осветители осуществляют искусственное увеличение токов каскадов, не исследуемых в момент съемки, что позволяет получить значение плотности фототока для каждого каскада ФЭП в отдельности. Технические характеристики установки представлены в таблице 10.

Управление установкой осуществляется специальным программным комплексом, который по результатам съемки формирует массив данных в виде графика ВКВФ для каждого каскада ФЭП и таблицу, в которой выводятся рассчитанные из спектров ВКВФ значения плотности фототоков исследуемых каскадов ФЭП (рисунок 34).

ВКВФ определяется как отношение количества собранных (дошедших до контакта) носителей заряда в ФЭП к количеству падающих на него фотонов. Эта величина совокупно характеризует оптические и рекомбинационные потери. К оптическим потерям относятся отражение части потока солнечного излучения от фоточувствительной поверхности ФЭП,

частичное затенение фоточувствительной поверхности контактной сеткой и прохождение излучения через фотоактивные слои без поглощения. Рекомбинационные потери в ФЭП определяются спектральной зависимостью показателя поглощения полупроводникового материала, шириной ОПЗ, глубиной залегания *p-n*-перехода, уровнем легирования фотоактивных слоев, скоростью поверхностной рекомбинации, наличием встроенных электрических полей и ТПБ [92].

Таблица 10 – Основные технические характеристики установки для исследования спектральных зависимостей ВКВФ ФЭП

| № п/п | Техническая характеристика | Значение |
|-------|--|-------------|
| 1 | Спектр излучения | АМ0 |
| 2 | Интегральная плотность потока, Вт/м ² | 1366,1 |
| 3 | Спектральный диапазон, нм | 340 – 1840 |
| 4 | Размер освещаемой монохроматическим излучением поверхности в диаметре, мм | 1 – 8 |
| 5 | Напряжение прямого смещения на тестируемом образце, В | 0 – 3 |
| 6 | Длина волны излучения источника светового смещения для синего светодиода, нм | 460 |
| 7 | Длина волны излучения источника светового смещения для красного светодиода, нм | 840 |
| 8 | Длина волны излучения источника светового смещения для инфракрасного лазера (ИК), нм | 1060 |
| 9 | Мощность излучения синего и красного светодиодов, Вт | 3 |
| 10 | Оптическая мощность ИК лазера, Вт | 0,5 |
| 11 | Диапазон спектральной чувствительности контрольного фотоприемника на основе Si, нм | 340 – 1100 |
| 12 | Диапазон спектральной чувствительности контрольного фотоприемника на основе GaSb, нм | 800 – 1840 |
| 13 | Количество дифракционных решеток монохроматора, шт. | 3 |
| 14 | Ширина спектральных щелей, мм | 0 – 2 |
| 15 | Обратная линейная дисперсия в диапазоне (340 – 1100) нм, нм / мм | 2,4 |
| 16 | Обратная линейная дисперсия в диапазоне (1100 – 2000) нм, нм / мм | 7,1 |
| 17 | Точность установки длины волны, нм | 0,12 – 0,34 |

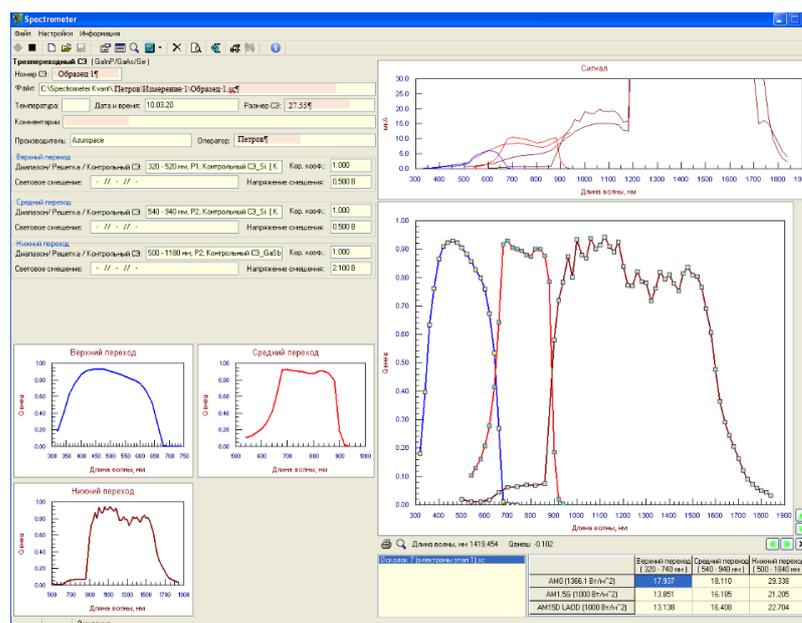


Рисунок 34 – Общий вид диалогового окна специального программного комплекса с результатами съемки спектров ВКВФ

Измерительный стенд для проведения электролюминесцентной спектроскопии схематически представлен на рисунке 35. Общий вид диалогового окна специального программного комплекса с результатами съемки спектров ЭЛ представлен на рисунке 36.

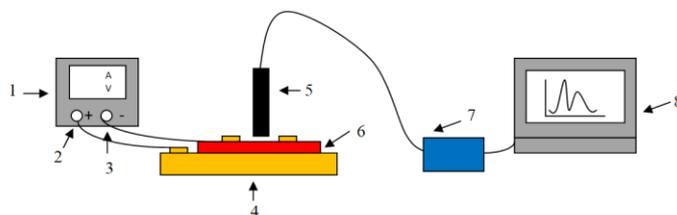


Рисунок 35 – Измерительный стенд электролюминесцентной спектроскопии:
 1 – внешний источник мощности; 2 – положительная клемма; 3 – отрицательная клемма;
 4 – контактный столик; 5 – светочувствительный элемент; 6 – исследуемый ФЭП;
 7 – спектрометр; 8 – ПК с рабочей программой

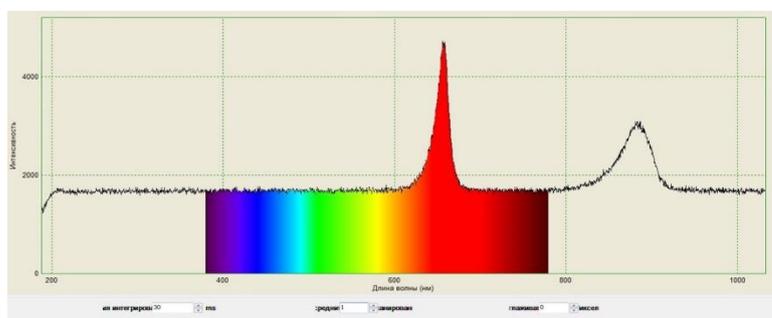


Рисунок 36 – Общий вид диалогового окна специального программного комплекса с результатами съемки спектров ЭЛ

С концентрацией безызлучательных центров рекомбинации напрямую связана интенсивность ЭЛ ФЭП. ЭЛ представляет собой процесс перехода атомов в полупроводниковом материале в возбужденное состояние под воздействием пропущенного электрического тока или приложенного электрического поля. Измерение данным методом требует подключения к прибору (ФЭП) с омическими контактами, которые необходимо сформировать заранее.

При смещении *p-n*-перехода в прямом направлении инжектированные носители заряда рекомбинируют в самом *p-n*-переходе или в узкой области вблизи *p-n*-перехода, определяемой диффузионной длиной ННЗ. Рекомбинация ННЗ может сопровождаться либо передачей выделяющейся энергии кристаллической решетке (безызлучательная рекомбинация) – испускание фононов, либо излучением квантов света (фотонов) с энергией, близкой к E_g полупроводника (излучательная рекомбинация).

Для детектирования интенсивности свечения полупроводникового материала исследуемого ФЭП применяется спектрометр, которым является аналого-цифровой преобразователь с матрицей на основе прибора с зарядовой связью. В данной работе в

качестве спектрометра использовался *Ocean Optics «USB 2000+»*, устройство которого схематически представлено на рисунке 37. Технические характеристики установки представлены в таблице 11.

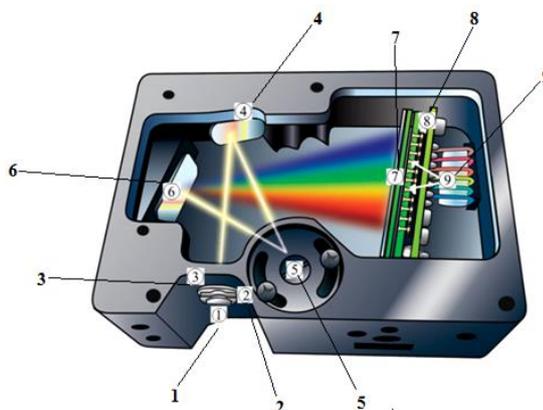


Рисунок 37 – Схематический вид внутреннего устройства спектрометра *Ocean Optics «USB 2000+»*: 1 – разъем для подключения оптоволоконного кабеля; 2 – щель; 3 – фильтр; 4 – коллиматорное зеркало; 5 – дифракционная решетка; 6 – фокусирующее зеркало; 7 – собирающая линза детектора; 8 – детектор; 9 – дополнительные световые фильтры

Таблица 11 – Основные технические характеристики спектрометра использовался *Ocean Optics «USB 2000+»*

| № п/п | Техническая характеристика | Значение |
|-------|--|---------------|
| 1 | Спектральный диапазон, нм | 200 – 1100 |
| 2 | Количество пикселей, шт. | 2048 |
| 3 | Размер пикселя, мкм | 14 x 200 |
| 4 | Емкость пикселя, электронов | ~ 62 500 |
| 5 | Отношение сигнал/шум (при полном сигнале) | 250:1 |
| 6 | Разрешение аналого-цифрового преобразователя, разрядов | 16 |
| 7 | Чувствительность на 400 нм, фотонов/отсчет | 75 |
| 8 | Чувствительность на 600 нм, фотонов/отсчет | 41 |
| 9 | Фокусное расстояние входное, мм | 42 |
| 10 | Фокусное расстояние выходное, мм | 68 |
| 11 | Время интегрирования, мс | 1,000 – 0,065 |
| 12 | Рассеянное излучение на 600 нм, % | < 0,05 |
| 13 | Рассеянное излучение на 435 нм, % | < 0,10 |
| 14 | Погрешность измерения длины волны, нм | 1,3 |
| 15 | Погрешность измерения длины волны, пиксель | 3 |

Спектрометр оснащен оптоволоконным кабелем с датчиком на конце, который позволяет получать спектральное распределение интенсивности свечения полупроводникового материала в диапазоне длин волн от 190 нм до 1100 нм. Такой диапазон длин волн позволяет исследовать отклик от верхнего и среднего каскадов в ФЭП со структурой *GaInP/GaAs/Ge*. При съемке спектров ЭЛ на ФЭП подавался постоянный ток в прямом направлении (тыльный металлический контакт ФЭП соединен с положительной клеммой источника питания, а фронтальный – с отрицательной клеммой источника

питания) в диапазоне (0,03 – 0,54) А с шагом 0,03 А, при этом напряжение на источнике питания не превышало 3,2 В. В таком случае ФЭП работал в режиме светодиода.

Моделирование энергетической зависимости величины потери энергии на образование структурных повреждений ($L_{стр}$) полупроводниковых материалов каскадов ФЭП проводилось в среде *SPENVIS* (*Space Environment Information System*) [11]. *SPENVIS* представляет собой специальное программное обеспечение Европейского космического агентства, разработанное и поддерживаемое Бельгийским институтом космической астрономии с 1996 года. Специальное программное обеспечение позволяет оценить воздействие различных ФКП на БС КА. Система используется разработчиками БС с целью прогнозирования характеристик приборов на протяжении САС КА. Кроме того, *SPENVIS* включает обширную справочную информацию о космической среде и моделях окружающей среды.

Моделирование ВАХ каскадов ФЭП осуществлялось в среде *Mathcad*. Данное специальное программное обеспечение включает в себя систему компьютерной алгебры из класса систем автоматизированного проектирования, ориентированной на подготовку интерактивных документов с вычислениями и визуальным сопровождением.

2.4 Описание методики исследования

Для измерения ВАХ задавалось значение фототока ограничивающего каскада ФЭП для концентрации солнечного излучения 1 крат, которое рассчитывалось на основе данных, полученных из спектров ВКВФ согласно формуле:

$$I_i = S \cdot \frac{q}{h \cdot c} \int (Q_{внеш\ i}(\lambda) \cdot AM0(\lambda) \cdot \lambda) d\lambda, \quad (5)$$

где S – площадь ФЭП, см²;

q – заряд электрона, Кл;

h – постоянная Планка, Дж · с;

c – скорость света в вакууме, м/с;

$Q_{внеш\ i}(\lambda)$ – ВКВФ i -ого каскада, отн. ед.;

$AM0(\lambda)$ – спектральное распределение плотности потока солнечного излучения спектра $AM0$, Вт·м⁻²·мкм⁻¹;

λ – длина волны, мкм.

Для приведения измеренной ВАХ (при концентрации солнечного излучения 3 крат) к концентрации 1 крат использовались следующие формулы:

$$I_{\text{кз}} = \frac{I_{\text{кз}}^{X \text{ крат}}}{X}, \quad (6)$$

где $I_{\text{кз}}$ – ток короткого замыкания ФЭП при концентрации падающего излучения 1 крат, мА;

$I_{\text{кз}}^{X \text{ крат}}$ – ток короткого замыкания ФЭП при концентрации падающего излучения X крат, мА;

X – концентрация солнечного излучения, крат,

$$U_{\text{ХХ}} = U_{\text{ХХ}}^{X \text{ крат}} - \varphi_{\text{тепл}} \cdot \ln X, \quad (7)$$

где $U_{\text{ХХ}}$ – напряжение холостого хода ФЭП при концентрации падающего излучения 1 крат, В;

$U_{\text{ХХ}}^{X \text{ крат}}$ – напряжение холостого хода ФЭП при концентрации падающего излучения X крат, В;

$\varphi_{\text{тепл}}$ – тепловое напряжение, В,

$$P_{\text{ист}} = \frac{P_{\text{ист}}^{X \text{ крат}}}{X}, \quad (8)$$

где $P_{\text{ист}}$ – мощность падающего излучения на ФЭП при концентрации 1 крат, Вт/м²;

$P_{\text{ист}}^{X \text{ крат}}$ – мощность падающего излучения на ФЭП при концентрации X крат, Вт/м²,

$$I_{\text{макс}} = \frac{I_{\text{макс}}^{X \text{ крат}}}{X}, \quad (9)$$

где $I_{\text{макс}}$ – ток в точке $P_{\text{макс}}$ ФЭП при концентрации падающего излучения 1 крат, мА;

$I_{\text{макс}}^{X \text{ крат}}$ – ток в точке $P_{\text{макс}}$ ФЭП при концентрации падающего излучения X крат, мА,

$$U_{\text{макс}} = U_{\text{макс}}^{X \text{ крат}} - \varphi_{\text{тепл}} \cdot \ln X, \quad (10)$$

где $U_{\text{макс}}$ – напряжение в точке $P_{\text{макс}}$ ФЭП при концентрации падающего излучения 1 крат, В;

$U_{\text{макс}}^{X \text{ крат}}$ – напряжение в точке $P_{\text{макс}}$ ФЭП при концентрации падающего излучения X крат, В,

$$\text{КПД} = \frac{U_{\text{макс}} \cdot I_{\text{макс}}}{P_{\text{ист}}} \cdot 100 \%, \quad (11)$$

$$FF = \frac{U_{\text{макс}} \cdot I_{\text{макс}}}{U_{\text{ХХ}} \cdot I_{\text{КЗ}}} \cdot 100 \%. \quad (12)$$

Далее на основе полученных электрических и спектральных характеристик ФЭП, описанных выше, проводился расчет электрических параметров для каждого из каскадов ФЭП до облучения. Величина $U_{\text{ХХ}}$ каскадов ФЭП рассчитывалась с помощью формулы (13), выраженной из соотношения спектральной взаимности [93], [96], [97], которая связывает спектры ВКВФ и ЭЛ:

$$U_i(J_{\text{инж}}) = \varphi_{\text{тепл}} \cdot [\varphi_{\text{ЭЛ}i}(J_{\text{инж}})] + \frac{E_{\text{макс}i}}{q} - 2 \cdot \varphi_{\text{тепл}} \cdot \ln(E_{\text{макс}i}) - \varphi_{\text{тепл}} \cdot Q_{\text{внеш}i} - \delta U, \quad (13)$$

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

$J_{\text{инж}}$ – плотность тока инжекции при съемке спектра ЭЛ ФЭП, мА/см²;

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

δU – поправка по напряжению, В.

При условии, что

$$U_i^*(J_{\text{инж}}) = \varphi_{\text{тепл}} \cdot [\varphi_{\text{ЭЛ}i}(J_{\text{инж}})] + \frac{E_{\text{макс}i}}{q} - 2 \cdot \varphi_{\text{тепл}} \cdot \ln(E_{\text{макс}i}) - \varphi_{\text{тепл}} \cdot Q_{\text{внеш}i}, \quad (14)$$

следует

$$U_i(J_{\text{инж}}) = U_i^*(J_{\text{инж}}) - \delta U. \quad (15)$$

Поправка по напряжению:

$$\delta U = \frac{1}{3} \left[\sum_{i=3}^3 U_i^*(J_{\phi i}) - U_{\text{ХХ ФЭП}} \right], \quad (16)$$

где $J_{\phi i}$ – плотность фототока i -каскада, полученного из спектров ВКВФ, мА/см²;

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

Основную сложность представляет исследование нижнего каскада (*Ge*), который ввиду своей природы – непрямозонный полупроводник и не способен люминесцировать в видимом диапазоне, следовательно для его изучения необходимо специализированное оборудование. Ввиду малого вклада в суммарное напряжение ФЭП от *Ge* каскада – (0,1 – 0,2) В [93], тогда как значение напряжения от каждого из остальных *InGaP* и *InGaAs* каскадов не менее (1,0 – 1,4) В [93], то и потери по напряжению в *Ge* каскаде не значительно скажутся на общем суммарном напряжении ФЭП. Основываясь на этом допущении, данные по интенсивности ЭЛ для *Ge* каскада необлученного ФЭП были взяты из работы [98], авторы которой получили спектры ЭЛ для *Ge* каскада из аналогичных полупроводниковых структур ФЭП.

Расчет $U_{\text{ХХ}}$ каскадов после облучения проводился аналогичным образом. Однако для расчета $U_{\text{ХХ}}$ *Ge* каскада необходимо определить значение диффузионной длины ННЗ после облучения по формуле [98], [101]:

$$\frac{1}{L_{\phi}^2} = \frac{1}{L_0^2} + K_L \cdot \Phi, \quad (17)$$

где L_0 – диффузионная длина ННЗ до облучения, см;

L_{ϕ} – диффузионная длина ННЗ после облучения, см;

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

Φ – флюенс воздействующих частиц, см⁻².

Для использованного в работе уровня воздействия электронов величина K_L для *Ge* была найдена из рисунка 38 [99] с учетом величины потери энергии на образование структурных повреждений ($L_{\text{стр}}$).

Данные $L_{\text{стр}}$ были взяты из смоделированной в среде *SPENVIS* [11] энергетической зависимости. При этом, согласно [91], [100], энергия смещения для материалов задавалась следующей: *In* – 43 эВ; *Ga*, *P*, *As* – 21 эВ; *Ge* – 40 эВ. Полученные спектры представлены на рисунке 39.

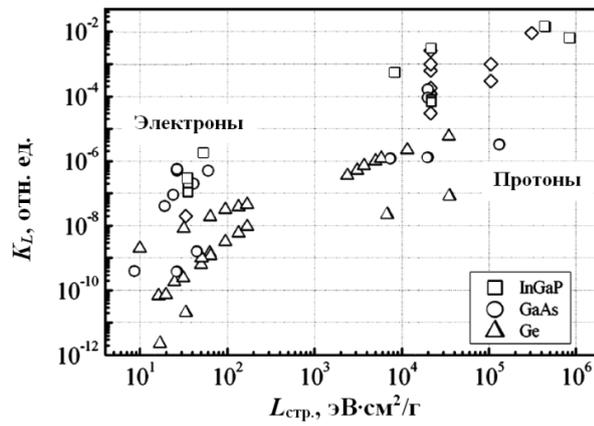


Рисунок 38 – Зависимость коэффициента деградации диффузионной длины НЗ от потерь энергии на образование структурных повреждений при воздействии электронов и протонов [99]

Для расчета напряжения, вырабатываемого *Ge* каскадом после облучения, необходимо использовать формулу (18), в которой применены данные до облучения, а также изменение диффузионной длины НЗ [6]:

$$U_{XX\phi}^{Ge} = U_{XX0}^{Ge} - 2 \cdot \varphi_{\text{тепл}} \cdot \ln \left(\frac{L_{n0}^{Ge} \cdot L_{p0}^{Ge}}{L_{n\phi}^{Ge} \cdot L_{p\phi}^{Ge}} \right), \quad (18)$$

где $U_{XX\phi}^{Ge}$ – напряжение холостого хода *Ge* каскада после облучения, В;

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.

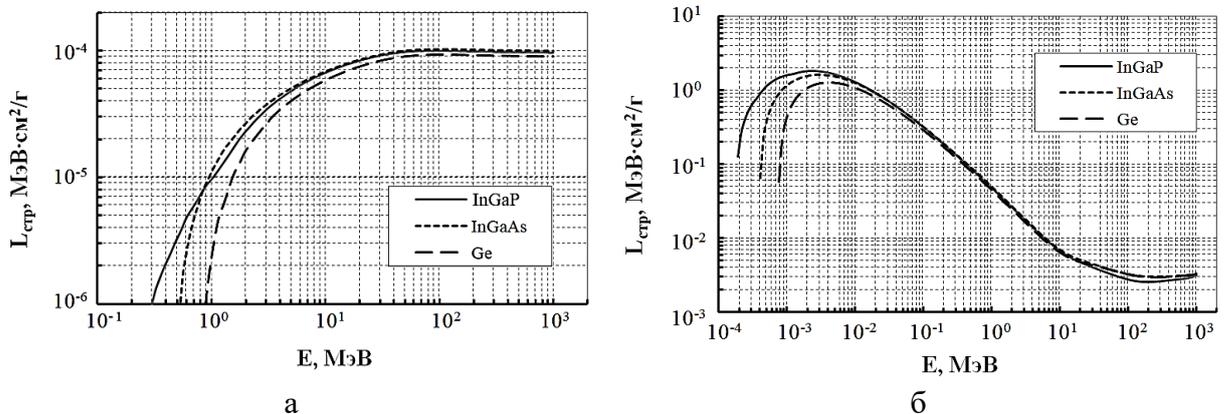


Рисунок 39 – Энергетическая зависимость $L_{\text{стр}}$: а – для электронов; б – для протонов

Затем по формуле (15) были рассчитаны напряжения каскадов *InGaP* и *InGaAs* после облучения. В настоящей работе для определения δU после облучения была получена следующая формула:

$$\delta U = \frac{1}{2} \left[\sum_{i=2}^2 U_i^*(J_{\phi i}) + U_{XX\phi}^{Ge} - U_{XX \text{ ФЭП}} \right]. \quad (19)$$

В формуле (19) учитывается напряжение, вырабатываемое *Ge* каскадом после облучения ФЭП, рассчитанное по формуле (18) а также U_{XX} всей структуры, полученное из ВАХ облученного ФЭП.

Степень деградации информативных параметров ФЭП определяется из формулы:

$$\Delta X_{\phi} = \left(1 - \frac{X_{\phi}}{X_0} \right) \cdot 100 \%, \quad (20)$$

где X_{ϕ} – электрический параметр ФЭП после облучения;

X_0 – электрический параметр ФЭП до облучения.

В основе моделирования ВАХ каскадов ФЭП до и после облучения было использовано уравнение:

$$I = I_{\phi} - I_0 \left[\exp \left(\frac{U}{A \cdot \varphi_{\text{тепл}}} \right) - 1 \right], \quad (21)$$

где I_{ϕ} – генерируемый фототок, А;

U – падение напряжения на нагрузке, В;

I_0 – ток насыщения диода, А;

A – диодный коэффициент.

2.5 Результаты эксперимента и их анализ

На рисунке 40 представлены усредненные электрические и спектральные характеристики до и после облучения электронами с энергией 7 МэВ и флюенсом 10^{15} см^{-2} , по которым можно определить, что воздействие заряженных частиц приводит к ухудшению производительности ФЭП. Данный эффект возникает в результате возникновения атомных смещений в структуре кристаллической решетки ФЭП. Эти смещенные атомы и связанные с ними вакансии будут формировать постоянные устойчивые дефекты в кристаллической решетке – вакансии, междоузельные узлы, примесные атомы, дефектные комплексы. Создание этих дефектов в кристаллической решетке приносит дополнительные энергетические состояния, которые локализуются в E_g . Далее дефекты могут действовать

как дополнительные центры рекомбинации, вызывая уменьшение времени жизни и диффузионной длины НЗ, либо как дополнительные примеси, изменяя основную концентрацию примесей в ФЭП.

Анализируя спектры ВКВФ (рисунок 40б), можно сделать вывод, что воздействие электронного излучения с энергией 7 МэВ на верхний каскад на основе *InGaP* было незначительным. Поскольку толщина рассматриваемого каскада мала (около 0,5 мкм [104]), то снижение диффузионной длины НЗ в базе существенного влияния на деградацию фототока каскада не оказывает (таблица 12). Величина диффузионной длины является достаточной для обеспечения полного сбора фотогенерированных носителей заряда [6].

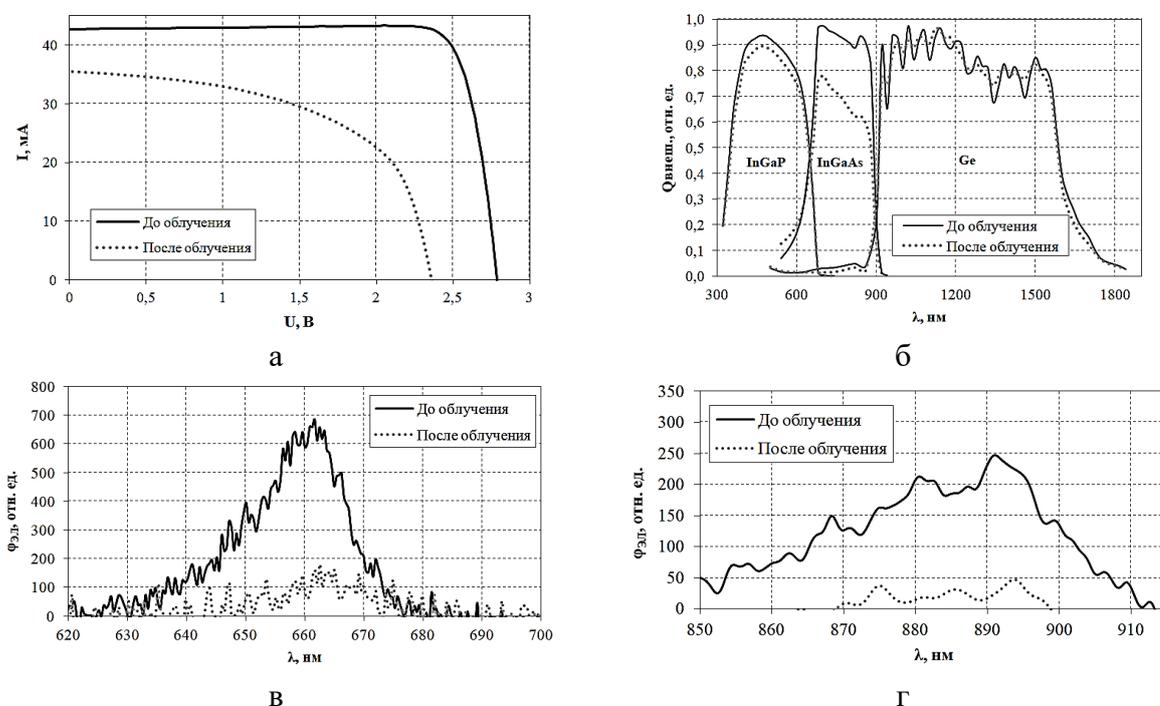


Рисунок 40 – Электрические и спектральные характеристики ФЭП (сплошная линия – до облучения; точечная линия – после облучения электронами с энергией 7 МэВ и с флюенсом 10^{15} см $^{-2}$): а – ВАХ; б – ВКВФ; в – ЭЛ каскада *InGaP*; г – ЭЛ каскада *InGaAs*

Электроны с энергией 7 МэВ имеют большую глубину проникновения в полупроводниковую структуру, формируя области разупорядочения, в основном в диапазоне длин волн действия среднего каскада на основе *InGaAs*. Это показано спадом ВКВФ в базе каскада на основе *InGaAs* (рисунок 40б). При этом, изменения в спектре ВКВФ *Ge* каскада не наблюдалось. Отсюда логично предположить, что по дозе структурных повреждений и характеру повреждения полупроводниковой структуры воздействие электронов с энергией 7 МэВ и флюенсом 10^{15} см $^{-2}$ на объект исследования можно сопоставить с воздействием протонов с энергией 0,93 МэВ при флюенсе 10^{12} см $^{-2}$.

Воздействие протонов с энергией до 1 МэВ является наиболее губительным уровнем воздействия радиации в условиях КП, поскольку наносит наибольший ущерб ограничивающему по току каскаду на основе *InGaAs*, что показано на рисунке 5 [18]. Уменьшение диффузионной длины после облучения (таблица 12) ведет к снижению глубины сбора неравновесных носителей заряда, которые появляются при поглощении энергии солнечного излучения. Все это ведет к уменьшению фоточувствительности ФЭП. В результате деградации диффузионная длина в *InGaAs* каскаде толщиной 3,5 мкм [6] оказывается недостаточной для наиболее эффективного сбора сгенерированных носителей заряда [102], [103].

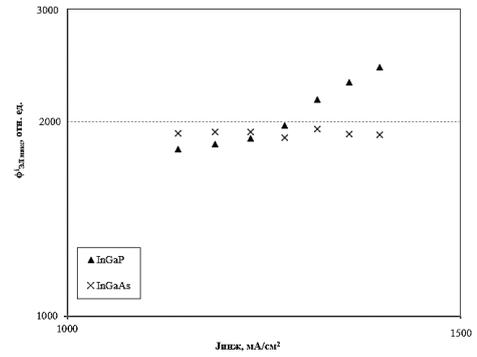
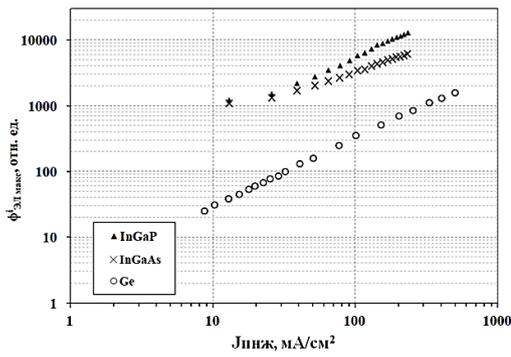
Таблица 12 – Значения электрических параметров ФЭП до и после облучения электронами с энергией 7 МэВ и флюенсом 10^{15} см^{-2}

| Область ФЭП | До облучения | | | После облучения | | | ΔX_{ϕ} , % | | |
|---|--------------|-------------------------------|--------------|------------------|-------------------------------|--------------|-----------------------|----------|----------|
| | L_0 , мкм | $J_{кз}$, мА/см ² | $U_{хх}$, В | L_{ϕ} , мкм | $J_{кз}$, мА/см ² | $U_{хх}$, В | L | $J_{кз}$ | $U_{хх}$ |
| <i>n-InGaP</i> | 0,054 | 18,54 | 1,345 | 0,052 | 17,56 | 1,100 | 3,7 | 5,3 | 18,2 |
| <i>p-InGaP</i> | 2,000 | | | 0,214 | | | 89,3 | | |
| <i>n-InGaAs</i> | 0,300 | 18,46 | 1,318 | 0,299 | 15,32 | 1,115 | 0,3 | 17,2 | 12,7 |
| <i>p-InGaAs</i> | 7,000 | | | 4,041 | | | 42,3 | | |
| <i>n-Ge</i> | 0,500 | 28,48 | 0,089 | 0,500 | 28,30 | 0,085 | 0,0 | 0,6 | 10,1 |
| <i>p-Ge</i> | 50,000 | | | 30,885 | | | 38,2 | | |
| ФЭП (расчетное) | - | 18,46 | 2,766 | - | 15,32 | 2,347 | - | 17,0 | 15,1 |
| ФЭП (экспериментально полученное) | - | 18,53 | 2,788 | - | 15,38 | 2,360 | - | 17,0 | 15,4 |
| Погрешность моделирования электрических параметров ФЭП, % | - | 0,37 | 0,79 | - | 0,37 | 0,55 | - | - | - |

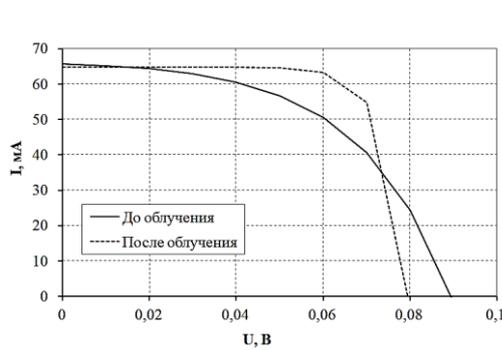
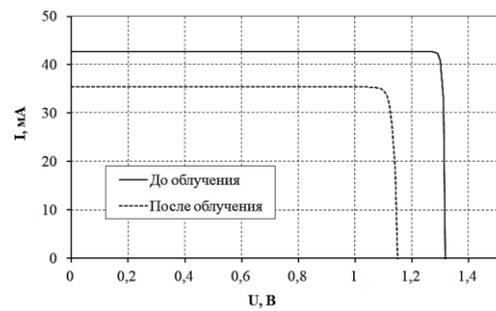
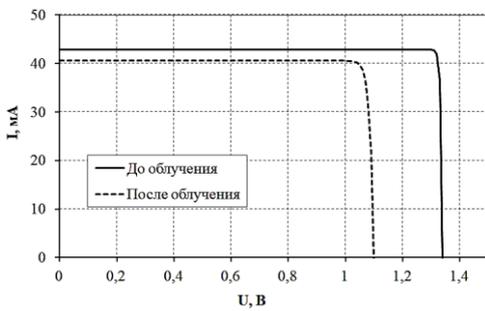
Структурные дефекты, которые возникают в полупроводниковых материалах каскадов, создают разрешенные уровни в E_g . Следовательно, растет вероятность безызлучательной рекомбинации носителей заряда – рассеяния на дефектах и фононах кристаллической решетки [96]. Поскольку в основе ЭЛ лежит излучательная рекомбинация ННЗ полупроводникового материала, то по полученным спектрам (рисунки 40в, 40г) видно, что в результате облучения интенсивность люминесценции падает почти до уровня минимально различимого спектрометром сигнала. Это может свидетельствовать о большем количестве возникших дефектов в структуре ФЭП.

На рисунке 41 представлена зависимость пика интенсивности ЭЛ от плотности тока инжекции каскадов ФЭП до облучения, необходимые для расчета. Затем по графикам, представленным на рисунках 38 и 39, для *Ge* каскада при энергии электронов 7 МэВ были найдены величины $K_L - 6,5 \cdot 10^{-11}$ отн. ед. и $L_{стр} - 49,1 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{Г}$ соответственно.

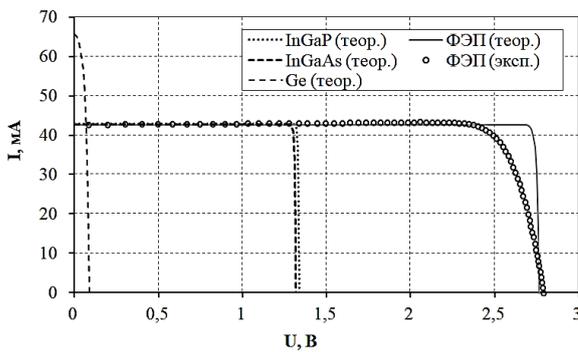
На основе формул (14), (15), (17) – (19), (21) в программе *Mathcad* были смоделированы ВАХ каскадов ФЭП до и после облучения (рисунок 42).



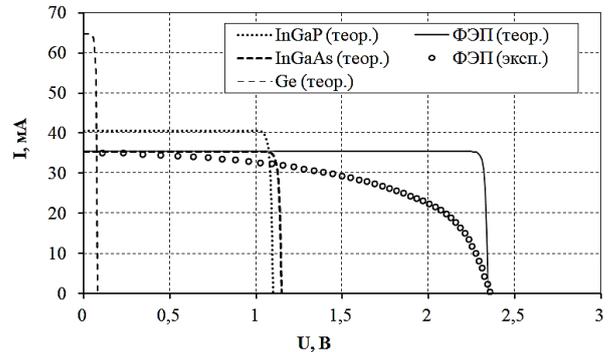
а
 б
 Рисунок 41 – Зависимость интенсивности ЭЛ от плотности тока инжекции ФЭП:
 а – до облучения; б – после облучения электронами с энергией 7 МэВ и
 флюенсом 10^{15} см⁻²



в



г



д

Рисунок 42 – Результаты моделирования ВАХ:
 а – *InGaP* каскада; б – *InGaAs* каскада; в – *Ge* каскада; г – до облучения;
 д – после облучения электронами с энергией 7 МэВ и флюенсом 10^{15} см⁻²

В таблице 12 представлены результаты моделирования. Величина $J_{кз}$ *InGaAs* каскада снижается от исходного значения на 17,2 %, *InGaP* каскада – на 5,3 % и *Ge* каскада –

на 0,6 %. Изменение U_{XX} обусловлено возрастанием темнового тока под влиянием уменьшения диффузной длины ННЗ, а также увеличением генерационной составляющей в ОПЗ [6]. Величина U_{XX} *InGaP* каскада упала на 18,2 %, *InGaAs* каскада – на 12,8 %, *Ge* каскада – на 10,1 %.

При сравнении теоретической и экспериментальной ВАХ также была рассчитана погрешность моделирования электрических параметров. Для I_{K3} и U_{XX} погрешность составила менее 1 %, что говорит об адекватности модели расчета для рассматриваемых параметров. Для P_{\max} , КПД, FF до облучения погрешность составила 11,3 %, 11,2 %, 11,9 % соответственно. Для P_{\max} , КПД, FF после облучения погрешность составила 37,2 %, 41,6 %, 41,9 % соответственно. В связи с этим по полученным данным можно лишь отдаленно оценить деградацию мощности каждого каскада: *InGaP* – 25,3 %, *InGaAs* – 35,1 %, *Ge* – деградация не обнаружена. Вклад в деградацию ФЭП по мощности дает деградация U_{\max} каждого из каскадов, а также изменение I_{\max} , генерируемого ограничивающим каскадом.

Для снижения погрешности оценки деградации P_{\max} , КПД и FF необходимо учитывать изменение шунтирующего и последовательного сопротивлений, что требует дополнительных исследований. Первая величина обусловлена обратным сопротивлением *p-n*-перехода (в запиорном направлении) и наличием загрязнений и проводящих пленок, шунтирующих *p-n*-переход. Шунтирующее сопротивление характеризует величина наклона линейной части обратной ветви ВАХ ФЭП к оси напряжений. Вторая величина состоит из сопротивления контакта металл – полупроводник на фронтальной поверхности, сопротивления растекания в легированном слое, сопротивления базового слоя, сопротивления контакта металл–полупроводник на тыльной поверхности. Последовательное сопротивление характеризует величина наклона линейной части прямой ветви ВАХ ФЭП к оси токов.

Следует отметить, что в результате воздействия радиации на ФЭП увеличивается ток насыщения, генерируемый на краю или внутри ОПЗ. В результате флуктуаций плотности ННЗ, вызванных спонтанными изменениями скорости их генерации и рекомбинации, возникает генерационно-рекомбинационный шум. Также может увеличиться диффузионный шум вследствие локализованных флуктуаций плотности ННЗ и скорости их диффузии. В обоих случаях эти шумы влияют на уровень сгенерированного тока [23]. Вследствие различной скорости деградации каскадов ФЭП требование согласования постоянных решеток нарушается, что ведет к снижению общего выходного фототока и соответственно КПД [6]. Различная скорость деградации каскадов ФЭП также подтверждается деградационными кривыми для U_{XX} и I_{K3} каскадов рассматриваемого типа

ФЭП в зависимости от флюенса электронов с энергией 1 МэВ, что представлено на рисунке 43 [105]. Для нижнего каскада на основе *Ge* радиационная стойкость величины U_{XX} важнее, чем деградация I_{K3} , поскольку фототок, генерируемый этим каскадом примерно в два раза больше, чем у верхнего и среднего каскадов. Считается, что высокая радиационная стойкость величины U_{XX} каскада на основе *Ge*, что также можно увидеть в таблице 12, обусловлена высокой концентрацией носителей заряда в *Ge*-подложке ($\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$) [105].

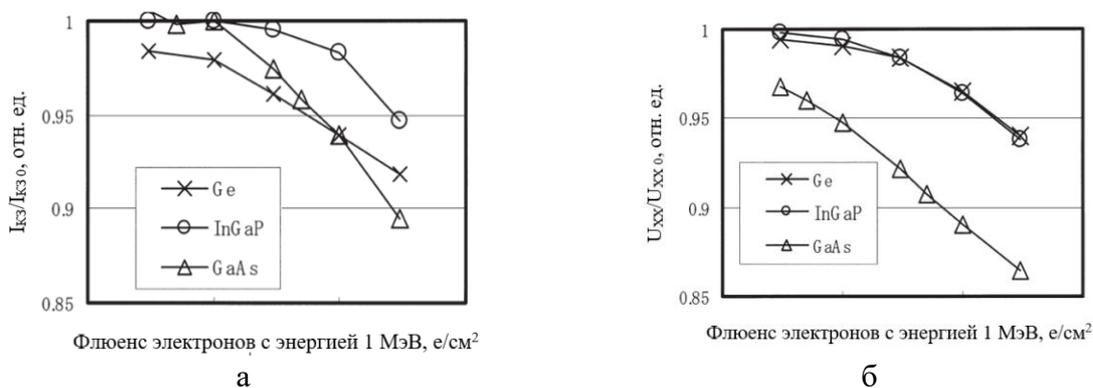


Рисунок 43 – Радиационная стойкость каскадов в ФЭП со структурой *InGaP/InGaAs/Ge* [105]: а – I_{K3} ; б – U_{XX}

По значениям плотности фототока каскадов ФЭП до и после облучения (таблица 12) можно сделать вывод, что в результате воздействия радиации роль ограничивающего каскада занимает средний каскад на основе твердого раствора *InGaAs* [105]. В связи с этим для оценки деградации ФЭП в целом необходимо оценивать деградацию материала ограничивающего по фототоку каскада – *InGaAs*.

Поскольку содержание *In* в твердом растворе *InGaAs* среднего каскада 1 %, тогда как *Ga* – 99 %, то в качестве материала среднего каскада рассмотрим *GaAs*. *GaAs* имеет кристаллическую решетку типа алмаза, которая получается путем трансляции гранцентрированной кубической ячейки на расстояние, равное $\frac{1}{4}$ пространственной диагонали. Элементарная ячейка, изображенная на рисунке 44, содержит четыре молекулы *GaAs*. Вокруг каждого атома *As* на разном расстоянии от него имеется четыре атома другого сорта – *Ga*, размещенных в углах правильного тетраэдра.

Падающий электрон может сместить только один атом при энергии облучения большей, чем пороговая энергия смещения (E_d) атома [25]. В *GaAs* E_d для *Ga* составляет 8 эВ вдоль направления $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$, что сравнимо с минимальным значением 8,5 эВ для *As* вдоль направления $[111]$ [71], [106]. При облучении *GaAs* электронами характерно образование электронных (акцепторных) ловушек – $EB3$, $EB4$, $EB6$, $EB9$, $EB10$, $EL15$, $EF11$, и дырочных (донорных) ловушек – $HF4$, $HF5$, $HF6$ и $HF10$. Большинство из этих ловушек связаны с вакансиями, междоузельными атомами и антиструктурными дефектами дефектов

в подрешетках галлия (*Ga*) и мышьяка (*As*) [107], а также с комплексами этих дефектов. При этом радиационные эффекты в полупроводнике почти полностью связаны с возникновением или аннигиляцией дефектов «пара Френкеля». Так, например, электроны с энергией 1 МэВ способны образовать от трех до четырех электронных ловушек захвата и от одной до четырех дырочных ловушек захвата в зависимости от флюенса и потока электронов.

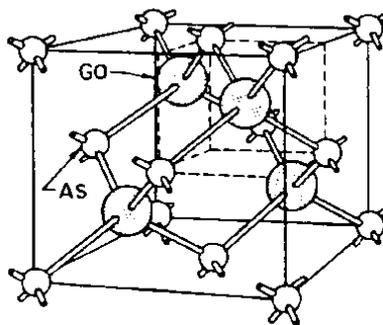


Рисунок 44 – Элементарная ячейка *GaAs* [24]

Следует отметить, что в бинарном полупроводниковом соединении смещение, возникающее на разных подрешетках, может быть идентифицировано по анизотропной E_d и по скорости введения конкретного дефекта. Так, например, в *GaAs* скорость введения дефектов для электронов с энергией 1 МэВ по атомам *Ga* выше, чем по атомам *As*. Основные дефекты, создаваемые электронным облучением в *GaAs* *n*-типа, вызваны атомными смещениями в подрешетке *As*.

На рисунке 45 представлена обобщенная картина дефектообразования в *GaAs* при облучении протонами и электронами. Здесь « V_{As-As} » – первичный дефект (вакансия-междоузлие в подрешетке *As*), « As_{Ga} » – антиструктурный дефект As_{Ga} и комплекс с примесями, « U » – неопределенные ловушки захвата ННЗ [108], [109].

Далее на примере результатов работы [110] было рассмотрено влияние уровней ловушек захвата на ВАХ однокаскадного ФЭП на основе *GaAs* (рисунок 46 и таблица 13).

Мелкие уровни $E1$ и $H0$ не оказывают существенного влияния на начальную ВАХ. Величина J_{K3} более чувствительна к мелким электронным ловушкам захвата типа $E2$ и $E3$. Однако на эту величину практически не влияют глубокие электронные ($E4$, $E5$) или дырочные ($H1$, $H2$, $H3$) ловушки захвата. Пассивность дырочных ловушек наблюдается, если они взаимодействуют со свободными дырками, которые имеют минимальный вклад в J_{K3} по сравнению со свободными электронами. Величина $U_{ХХ}$, напротив, уменьшается с увеличением глубины уровня ловушки захвата [110].

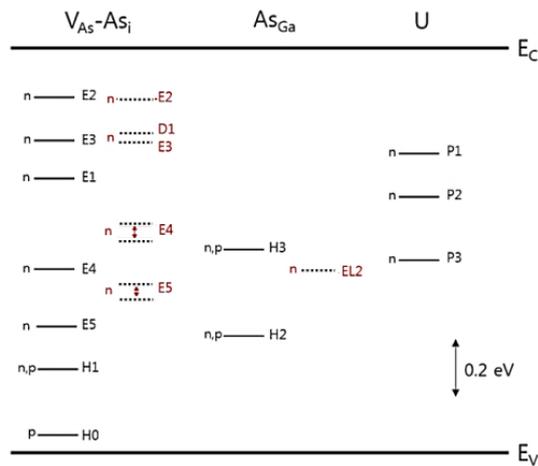


Рисунок 45 – Схематическое представление об идентификации радиационно-индуцированных ловушек в *GaAs* в результате облучения ионизирующими частицами (пунктирная линия – протонное облучение, сплошная линия – электронное облучение, *p* – *GaAs* *p*-типа, *n* – *GaAs* *n*-типа) [22], [25], [108]

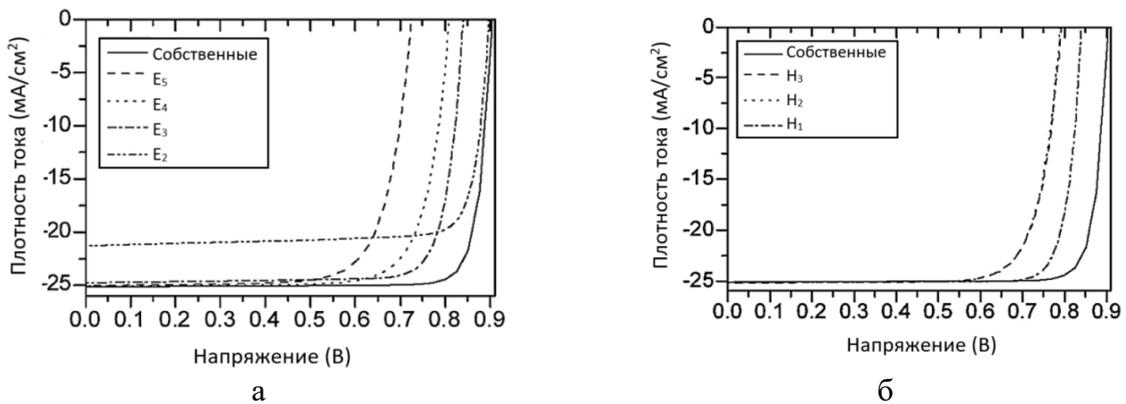


Рисунок 46 – Теоретическая ВАХ в зависимости от ловушек захвата в сравнении с ВАХ необлученного ФЭП [110]: а – электронные ловушки захвата ННЗ; б – дырочные ловушки захвата ННЗ

Таблица 13 – Влияние каждого уровня дефекта на электрические параметры ФЭП [110]

| Уровень | $J_{K3} \phi / J_{K3 0}$, отн. ед. | $U_{XX} \phi / U_{XX 0}$, отн. ед. | FF_{ϕ} / FF_0 , отн. ед. | $KПД_{\phi} / KПД_0$, отн. ед. |
|-----------|--|--|-------------------------------|------------------------------------|
| <i>E5</i> | 0,995 | 0,801 | 0,876 | 0,698 |
| <i>E4</i> | 0,999 | 0,894 | 0,905 | 0,808 |
| <i>E3</i> | 0,985 | 0,928 | 0,962 | 0,879 |
| <i>E2</i> | 0,847 | 0,991 | 0,961 | 0,806 |
| <i>H3</i> | 1,003 | 0,876 | 0,906 | 0,796 |
| <i>H2</i> | 1,002 | 0,874 | 0,911 | 0,797 |
| <i>H1</i> | 1,000 | 0,929 | 0,984 | 0,915 |

Таким образом, акцепторные ловушки влияют на все выходные параметры. Менее глубокие акцепторные уровни влияют главным образом на J_{K3} , а более глубокие – главным образом на U_{XX} . Чем глубже уровень акцептора, тем меньше влияние на J_{K3} и тем больше влияние на U_{XX} . Донорные уровни практически не влияют на J_{K3} . Чем глубже уровень донора, тем больше влияние на U_{XX} .

Согласно смоделированной ВАХ каскада на основе *InGaAs* (рисунок 42б) из деградации фототока можно сделать предположение о том, что при облучении электронами с энергией 7 МэВ и флюенсом 10^{15} см^{-2} в материале данного каскада возникают неглубокие электронные ловушки типа *E2* и *E3*. Снижение $U_{\text{ХХ}}$ может говорить о наличии как электронных ловушек типа *E5*, *E4*, *E3*, *E2*, так и дырочных ловушек типа *H3*, *H2*, *H1*. Для точного определения типа и концентрации возникающих дефектов необходимо проводить дополнительные исследования.

Рассмотренная в работе методика не ограничивается размером исследуемых образцов, поскольку учитывается величина $J_{\text{КЗ}}$, генерируемого каскадами и ФЭП. Кроме того, методика может быть применима для оценки деградации ФЭП в результате воздействия протонного облучения, что в дальнейшем может быть применимо при проектировании БС КА различного назначения, а также в области создания ФЭП и элементов последующей защиты от излучений различных энергий, что должно повысить надежность и САС энергоустановок КА.

Глава III. Комплексные методы анализа степени восстановления полупроводниковой структуры

Возникающие в *InGaAs* каскаде радиационные эффекты в основном связаны с образованием или аннигиляцией дефектов «пара Френкеля». Эти дефекты могут быть устранены или уменьшены в результате отжига. 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 [9]. Этот способ актуален для применения в условиях космоса, поскольку в качестве внешнего источника питания может выступать сама БС. Однако немаловажным вопросом является подбор наиболее эффективного режима отжига – времени и плотности тока инъекции.

В этой главе 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 КП ФЭП БС. Также приведено описание методики оценки степени восстановления полупроводниковой структуры многокаскадных ФЭП, основанной на широко известных методах исследования полупроводниковых приборов, в том числе ФЭП.

3.1 Объект исследования

В качестве объекта исследования рассматривались ФЭП (рисунок 29), облученные электронами с энергией 7 МэВ и накопленным флюенсом 10^{15} см^{-2} . Электрические параметры ФЭП представлены в таблице 12.

Для имитации процесса инжекционного отжига облученных ФЭП непосредственно в процессе эксплуатации БС была разработана ЭС с оптимизированной схемой коммутации ФЭП. Разработанная ЭС воспроизводит все основные функциональные части современной БС в том числе формирование цепочек, обеспечивающих набор требуемого значения напряжения и соединения этих цепочек далее параллельно для сбора требуемого тока. Новым в данной ЭС явилась дополнительная цепь, состоящая из параллельно соединенных элементов, обеспечивающих необходимое значение тока, требующегося для создания условий инжекционного отжига. При этом часть ЭС выступала в качестве внешнего источника питания.

Для обеспечения КА необходимым количеством электроэнергии, как правило, требуется создание БС больших площадей. Механическая прочность БС в первую очередь определяется каркасом, на которые крепятся ФЭП. Каркасы большинства современных БС выполняют в виде трансформируемых, раскрываемых в космосе конструкций. Каркас высоковольтных БС для КА, разрабатываемых в РФ, представляет собой плоскую трубчатую раму, на которой с лицевой стороны крепится подложка. Подложка панели БС состоит из сетчатого материала, изготовленного из струн на основе арамидного шнура, пропитанного связующим составом (например, кремнийорганическим лаком) и обезгаживанного в вакууме [111]. В зависимости от типа расположения струн различают струнную и сетчатую подложки. Также известны такие типы подложек, как сотовая подложка на основе углепластика, алюминия и из текстолита.

Разрабатываемая ЭС имеет небольшую площадь – около 100 см², поэтому для повышения прочности разрабатываемой конструкции в качестве подложки ЭС был использован текстолит (печатная плата).

Подготовку подложки ЭС на основе печатной платы можно условно разделить на несколько этапов:

- обезжиривание поверхности фольги с помощью ацетона или уайт-спирта;
- нанесение топографического рисунка контактных дорожек с помощью перманентного маркера;
- травление печатной платы травильным раствором на основе хлорного железа;
- тщательная промывка печатной платы под струей проточной воды
- удаление тонера с контактных дорожек ветошью, смоченной в ацетоне;
- обработка печатной платы мелкой наждачной бумагой;
- покрытие токоведущих дорожек печатной платы спирто-канифольным флюсом;
- лужение токоведущих дорожек печатной платы.

Поскольку многокаскадные ФЭП очень чувствительны к обратному смещению, то защита элементов от деструктивных обратных нагрузок в традиционных БС КА является обязательной, для чего в электрической схеме БС используется диодная защита.

Первым элементом такой защиты являются шунтирующие диоды, основная функция которых – снижение потерь выходной мощности БС за счет пропуска тока в случае [112] – [114]: затенения ФЭП, (рисунок 47) его разрушения и другое.

В случае, когда ФЭП прекращает генерировать фототок, он становится излучающим диодом, то есть нагрузкой для функционирующих последовательно соединенных с ним ФЭП. Эти излучающие диоды, поглощая электрический ток, вырабатываемый цепью, перегреваются и, вследствие этого, быстро деградируют, выходят из строя, обрывая

генерирующую цепь. Шунтирующий диод защищает каждый элемент и монтируется встречно-параллельно каскадам ФЭП в одной плоскости с элементом.

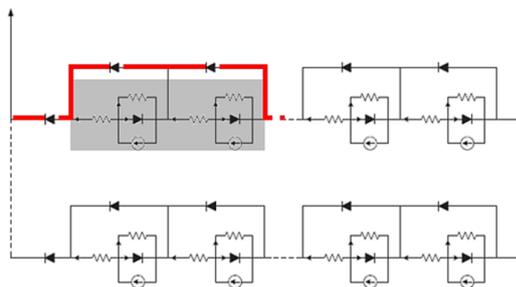


Рисунок 47 – Работа шунтирующего диода [115]

Шунтирующие диоды работают в двух режимах:

– на шунтирующие диоды подается обратное смещение (характерно для ситуации, когда ФЭП освещены);

– на шунтирующие диоды подается прямое смещение. ФЭП сместится в обратном направлении в результате несоответствия $I_{кз}$ (например, при частичном затенении) между несколькими последовательно соединенными ФЭП в цепочке (рисунок 47). В этом случае шунтирующий диод позволит току от нормально функционирующих ФЭП течь во внешней цепи, не изменяя напряжение на каждом из них. Максимальное обратное напряжение на затененном ФЭП уменьшается на величину напряжений на каждом из шунтирующих диодов, уменьшая ток и предотвращая перегрев [112] – [114].

Различные производители ФЭП предлагают несколько конструкций шунтирующих диодов, обеспечивающих снижение потери мощности БС, например, в случае пробоя и затенения ФЭП. Это *Si*-диоды в виде отдельных элементов, интегральные и монокристаллические шунтирующие диоды.

Шунтирующие диоды в виде отдельных элементов являются распространенным решением для защиты многокаскадных ФЭП. Такие диоды могут иметь разные конструкции: *n*- и *p*-контакты расположены на одной стороне (для упрощения коммутации с ФЭП в плоскости); *n*- и *p*-контакты расположены на противоположных сторонах диода (если используется та же коммутация, что и для соединения ФЭП). Основное преимущество шунтирующего диода в виде отдельного элемента заключается в том, что тепло, выделяемое диодом, распределяется по большей площади. *Si*-диоды рассматриваемого типа подходят для ряда космических приложений, работающих при более высоких температурах (например, *Herschel-Planck* или *Vepi-Colombo*), и могут быть интегрированы с использованием тех же методов, которые применяются для сборки

ФЭП [116], [117]. Такие шунтирующие диоды рассчитаны на обратное напряжение порядка 100 В и прямой ток – порядка 2 А [112] – [114]. На рисунке 48а показан пример внешнего вида и конструкции шунтирующего диода в виде отдельного элемента [117].

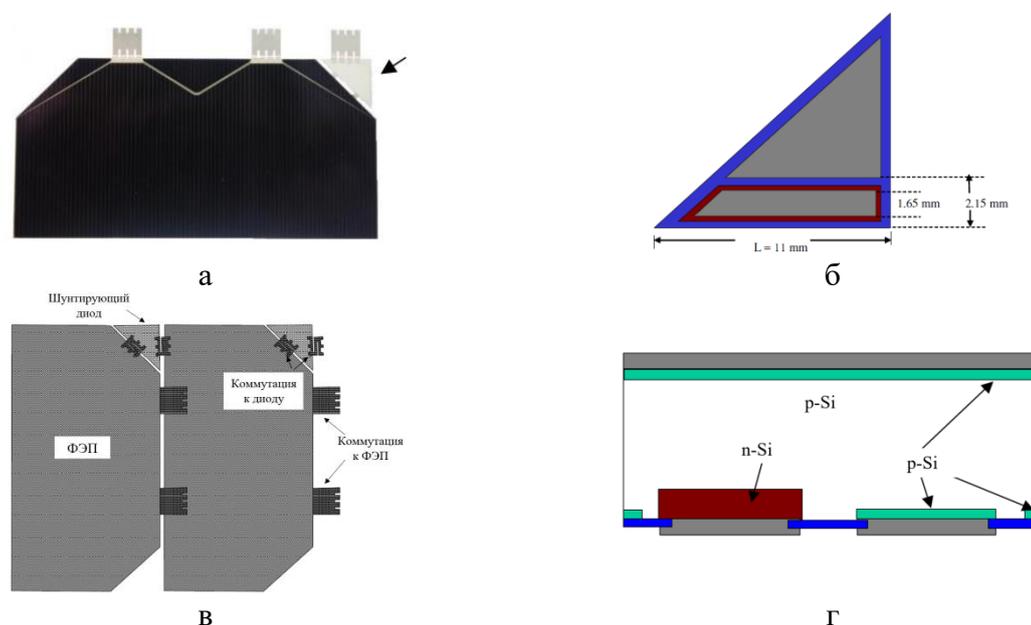


Рисунок 48 – ФЭП с шунтирующим диодом в виде отдельного элемента: а – внешний вид ФЭП *TJ Solar Cell Assembly 3G30A* производства *Azur Space Solar Power GmbH* (Германия), стрелкой отмечено расположение диода [70]; б – пример конструкции диода [117]; в – соединение ФЭП с диодом (тыльная сторона ФЭП) [117]; г – пример структуры диода [117]

Интегрированный диод, имеющий многопереходную структуру, путем мезатравления отделяют от фотоактивной области ФЭП [118]. Этот диод служит защитой для соседнего ФЭП, как показано на рисунке 49б. Согласно рисункам 49в и 49г, интегрированный диод может использовать все три перехода от верхнего, среднего и нижнего каскадов (тип *ID*) или только переходы среднего и нижнего каскадов (тип *ID2*) соответственно. Тип *ID2* имеет преимущество более низкого напряжения включения [117]. Применение интегрированного шунтирующего диода позволяет сократить количество операций при сборке ЭСЕ, однако это усложняет технологию изготовления эпитаксиальной структуры ФЭП. Увеличивается количество требуемых расходных материалов и количество контролируемых параметров, что усложняет в целом процесс создания контактов и как следствие, потенциально может привести к снижению процента выхода годных ФЭП.

Кроме того, вследствие перетрава структуры из-за применения капельного метода травления, что в свою очередь является ручной операцией, увеличивается вероятность выхода диода из строя. Наличие дефектного диода в структуре ФЭП также может привести к уменьшению выхода годных ФЭП. Как итог, происходит отбраковка годных ФЭП [119].

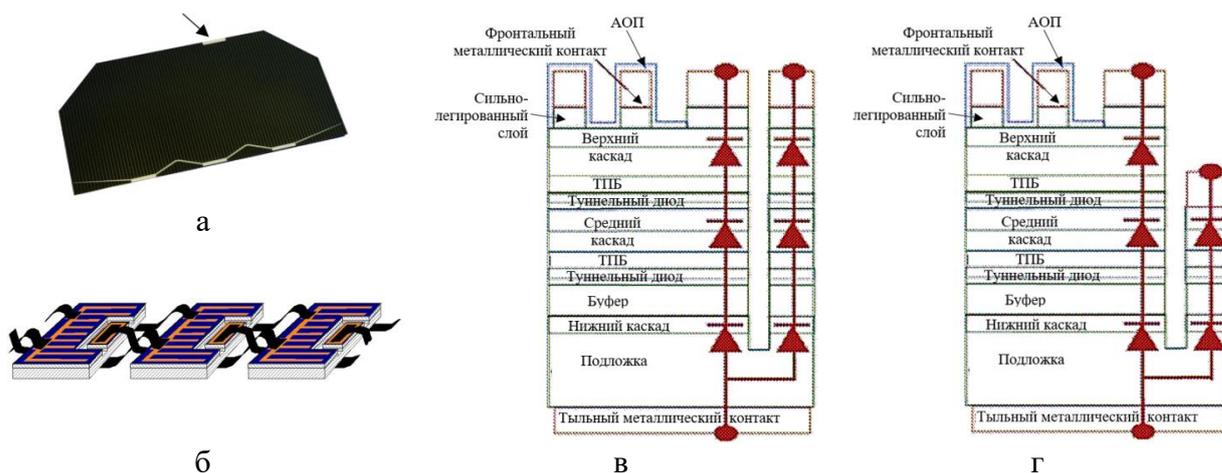


Рисунок 49 – ФЭП с интегрированным шунтирующим диодом: а – внешний вид ФЭП *TJ Solar Cell 3G30C – Advanced* производства *Azur Space Solar Power GmbH* (Германия), стрелкой отмечено расположение диода [70]; б – соединение ФЭП с диодом [119]; в – принцип работы *ID* диода; г – принцип работы *ID2* диода [119]

Основное преимущество монокристаллических шунтирующих диодов – простая технология соединения, когда одна из трех лицевых контактных площадок для сварки ФЭП с тройным спаем заменяется монокристаллическим диодом Шоттки и можно использовать стандартное межэлементное соединение. На рисунке 50в изображена запатентованная конструкция *RWE SSP* для монокристаллического диода [120]. Эти диоды разработаны для обеспечения высокой стабильности при напряжении электрического смещения, а также для функционирования при высоких температурах [116], [117].

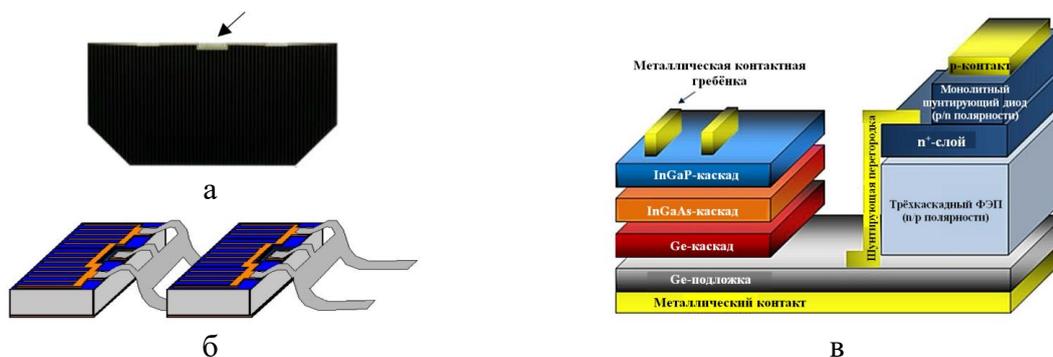


Рисунок 50 – ФЭП с монокристаллическим шунтирующим диодом: а – внешний вид ФЭП *RWE3G28-MD/4080* производства *Azur Space Solar Power GmbH* (Германия), стрелкой отмечено расположение диода [116]; б – соединение ФЭП с диодом [117]; в – пример структуры [116]

В настоящей работе для ЭС были использованы шунтирующие диоды в виде отдельного элемента, поскольку в этом случае не понадобится внесение изменений в технологию изготовления ФЭП.

Прежде чем стать ЭСЕ БС, к фронтальному и тыльному металлическим контактам ФЭП и шунтирующего диода методом точечной микросварки расщепленным электродом приваривают коммутирующие шины (рисунок 51а).

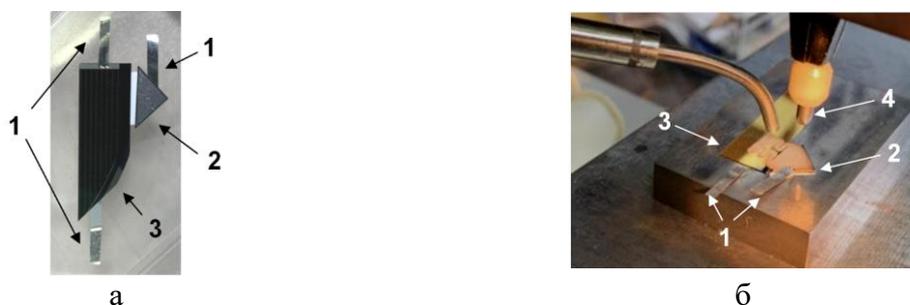


Рисунок 51 – ЭСЕ (1 – коммутирующие шины; 2 – шунтирующий диод; 3 – ФЭП; 4 – расщепленный электрод): а – внешний вид; б – приварка коммутирующих шин и шунтирующего диода к ФЭП

Кроме того, для защиты лицевой и тыльной сторон ФЭП от агрессивного воздействия ФКП, а также для повышения их механической прочности применяют радиационно-стойкое стекло. Фактически безальтернативным радиационно-стойким стеклом фронтальной (фотовосприимчивой) стороны ФЭП сейчас служит оптическое кварцевое стекло, например, *K-208* толщиной (75 – 150) мкм, легированное церием. Радиационно-стойкое стекло имеет площадь, незначительно превышающую площадь ЭСЕ, но повторяющее его форму. Для защиты тыльной поверхности существует три способа защиты:

- радиационно-стойким стеклом типа *K-208*,
- текстолитовой пластиной,
- каркасом (в случае применения каркасов из сотовых панелей [121] или гибкой подложки на основе полимерных материалов [122]).

Поскольку ЭС – это прототип БС, основная задача которого провести апробацию инжекционного отжига, то для защиты фронтальной ЭСЕ применение радиационно-стойкого стекла не целесообразно, а для повышения механической прочности ФЭП и ЭС, как было указано ранее, применяется текстолитовая пластина (подложка ЭС).

Далее ЭСЕ монтировалось на ЭС путем соединения между собой коммутирующими шинами с помощью пайки [123] по определенным схемам: последовательно – для увеличения напряжения и параллельно – для увеличения тока. В результате соединения ФЭП в БС возможны ситуации, рассмотренные ниже.

Первая ситуация – несоответствие тока и напряжения для последовательно соединенных ФЭП (рисунок 52а). Это влияет на мощность модуля в максимальной точке, которая снижается при наличии ФЭП, функционирующего не должным образом, из-за

низкого вклада его производительности. Несоответствие генерируемых токов при последовательном соединении ФЭП несет сильные негативные последствия для вырабатываемой мощности БС, поскольку ток ФЭП минимальной величины будет ограничивать выходной ток. А напряжение такого ФЭП не сильно скажется на выходной мощности цепочки, так как эта величина складывается из напряжений каждого ФЭП и не ограничивается минимальным значением. Если цепочка работает на низких напряжениях или в режиме короткого замыкания, то высокое рассеяние энергии в ФЭП, работающем не стандартно, может вызвать необратимые разрушения в цепочке [112], [124].

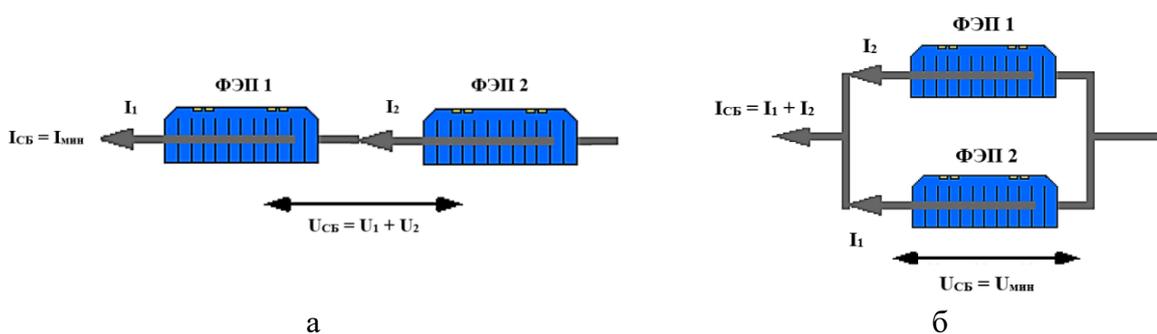


Рисунок 52 – Типы коммутации ФЭП [124]: а – последовательное соединение; б – параллельно соединении

Вторая ситуация – несоответствие напряжения и тока параллельно соединенных ФЭП (рисунок 52б). В БС, поскольку цепочки соединяются параллельно, то напряжение определяется цепочкой с минимальным напряжением. Поэтому цепочки подбирают с максимально приближенными значениями $U_{ХХ}$. Величина $I_{КЗ}$ уже не будет иметь огромного влияния, поскольку при параллельном соединении величины складываются [112], [124].

Вид результирующей ВАХ нескольких соединенных идентичных ФЭП схематически показан на рисунке 53. Значение $I_{КЗ}$ БС составляет сумму $I_{КЗ}$ ФЭП соединенных параллельно, а значение $U_{ХХ}$ БС – сумму $U_{ХХ}$ ФЭП, соединенных последовательно.

Для получения максимально эффективной ЭС образцы ФЭП подбирались таким образом, чтобы электрические параметры были схожи между собой, что позволило минимизировать потери по току и напряжению из-за ограничения электрических параметров БС при последовательном и параллельном соединениях ФЭП.

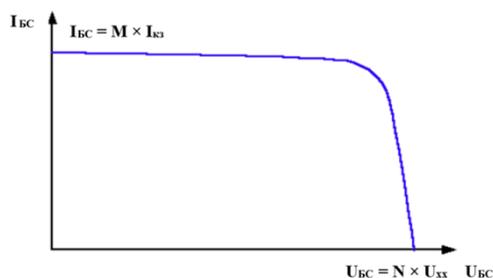


Рисунок 53 – ВАХ БС [124] (M – количество цепочек, N – количество элементов в цепи)

Следует отметить, что традиционно в электрической цепи БС между цепочками ФЭП и выходными шинами устанавливается второй элемент диодной защиты – развязывающие диоды [125], которые обеспечивают защиту БС от потерь по мощности в случае пробоя и затенения цепочки ФЭП. Развязывающий диод пропускает электрический ток от освещаемых ФЭП к нагрузке и блокирует ток, идущий в обратном направлении (от выходных шин к цепочкам ФЭП). Такой диод позволяет избежать утечки тока, сгенерированного нормально функционирующими цепочками, в затененной цепочке [112] – [114]. Развязывающий диод защищает каждую цепочку, что снижает нагрузку на отдельный шунтирующий диод. Монтируется развязывающий диод встречно-параллельно ФЭП в цепочках (рисунок 54).

Существует два режима работы развязывающего диода.

– Смещение развязывающего диода в обратном направлении – режим холостого хода. ФЭП освещены, следовательно, каждый ФЭП будет смещен в прямом направлении.

– Смещение развязывающего диода в прямом направлении, диод становится проводящим. В случае полного или частичного затенения БС, развязывающие диоды работают как последовательно соединенные диодные выпрямители, которые включены между контактами цепочек ФЭП и выходными шинами в прямом направлении по отношению к генерируемому БС току. Значение тока в БС, где отсутствует блокирование цепочек в период затенения или выхода из строя, зависит от напряжения на выходных шинах и крутизны ВАХ ФЭП. Развязывающие диоды сохраняют энергию, когда цепочки оказываются неосвещенными и когда напряжение на них падает ниже суммы рабочего напряжения на диодах.

Для БС космического назначения обычно применяют комплекс развязывающих диодов. Вид одного развязывающего диода и комплекса представлены на рисунках 55 и 56 соответственно [112] – [114].

Применение развязывающих диодов в ЭС не видится целесообразным, поскольку в макете не предполагается воздействие деструктивных нагрузок на ФЭП, аналогичным условиям КП, например, частичное затенение, воздействие микрометеоритов и другое.

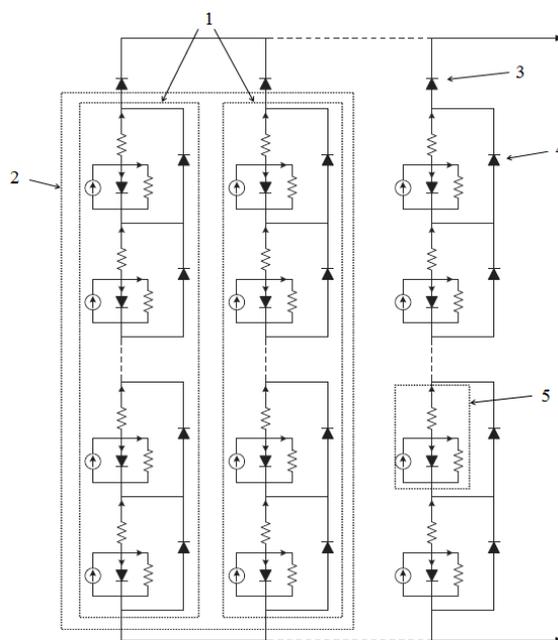


Рисунок 54 – Эквивалентная схема ФГЧ БС [115]: 1 – цепочка; 2 – секция; 3 – развязывающий диод; 4 – шунтирующий диод; 5 – ЭСЕ



Рисунок 55 – Развязывающий диод БС КА [112]: а – вид в разрезе (1 – кристалл диода; 2 – компенсаторы; 3 – коммутирующие шины); б – вид с тыла

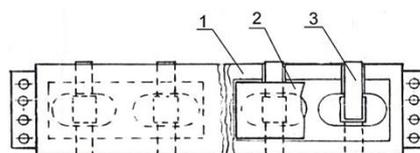


Рисунок 56 – Модуль развязывающих диодов БС КА (1 – каркас модуля; 2 – радиационно-стойкое стекло; 3 – развязывающий диод) [112]

Для инъекционного отжига радиационных дефектов ФЭП необходимо обеспечить инъекцию ННЗ при пропускании тока через облученный элемент в прямом направлении [83].

Поэтому ЭС состоит из цепочки с тремя отжигаемыми ФЭП – область «1» на рисунке 57а, а также из источника питания (ИП). ИП в данной работе состоял из трех идентичных цепочек (область «2» на рисунке 57а) и последовательно коммутированную к ним область с тремя параллельно соединенными ФЭП (область «3» на рисунке 57а). Следует отметить, что количество ФЭП в области «3» соответствует количеству цепочек, входящих в область «2». Таким образом, инъекционный отжиг области «1» осуществляется за счет ресурса ИП ЭС, вырабатываемого при воздействии спектра АМО.

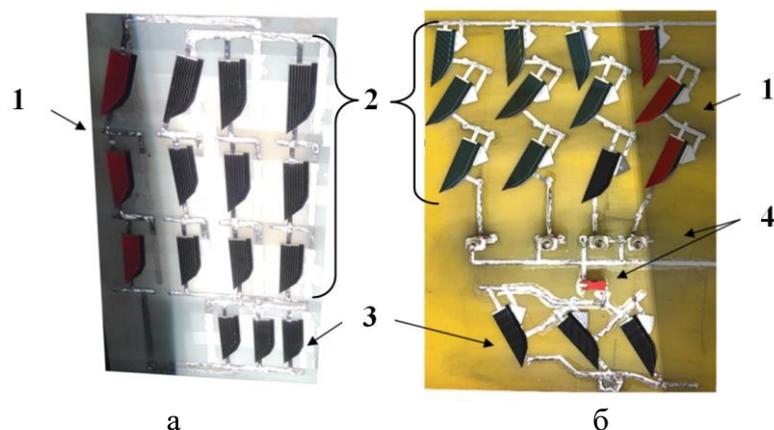


Рисунок 57 – ЭС с инжекционным отжигом: а – без переключателей; б – с переключателями: 1 – цепочка отжигаемых ФЭП; 2 – область для набора тока инжекции; 3 – область для набора напряжения; 4 – переключатели

Для апробации ЭС, представленная на рисунке 57а, была помещена под спектр $AM0$, излучаемый имитатором постоянного излучения. При засветке ИП ЭС (области «2», «3») наблюдалась ЭЛ отжигаемых ФЭП (область «1»), что говорит о наличии инжекционного отжига. На рисунке 57 цепочка с отжигаемыми ФЭП затенена для лучшей видимости эффекта ЭЛ.

С целью оптимизации ЭС были использованы переключатели (рисунок 57б), а также использовались ФЭП с шунтирующими диодами – ЭСЕ. Переключатели дают возможность отжига всех цепочек ЭС поочередно и позволяют при необходимости отключить область «3», тогда области «1» и «2» будут работать в активном режиме и генерировать энергию для питания, например, бортовой аппаратуры КА.

Итоговый вариант разрабатываемой конструкции был аналогичен ЭС, представленной на рисунке 57а. Однако для повышения $J_{инж}$, вырабатываемого ИП, в ЭС было увеличено количество цепочек в области «2» – до четырех цепочек, и количество элементов в области «3» – до четырех ЭСЕ.

3.2 Описание эксперимента

Целью эксперимента является исследование степени восстановления каскада на основе $InGaAs$ в составе полупроводниковой структуры ФЭП при воздействии инжекционного отжига.

Исследование восстановления каскада на основе $InGaAs$ в составе полупроводниковой структуры ФЭП, традиционно применяемого в КП, основана на косвенных методах и включает в себя следующую последовательность действий:

- инжекционный отжиг образцов ФЭП в составе ЭС при воздействии спектра $AM0$ в течение 38,5 часов;
- исследование ВАХ отдельных областей ЭС (спектр $AM0$, концентрация излучения 1 крат, температура 25 °С);
- исследование электрических и спектральных характеристик образцов ФЭП: ВАХ (спектр $AM0$, концентрация излучения 3 крат, температура 25 °С), спектры ВКВФ (спектр $AM0$, температура 25 °С) и ЭЛ (температура 25 °С);
- приведение ВАХ ФЭП после инжекционного отжига к 1 крат;
- расчет основных электрических параметров каскадов ФЭП и оценка степени их восстановления;
- определение скорости инжекционного отжига $InGaAs$ в составе полупроводниковой структуры ФЭП;
- определение эффективного времени инжекционного отжига облученных ФЭП.

3.3 Оборудование

Отжиг ЭС проводился с помощью имитатора постоянного излучения (рисунок 58) со спектром $AM0$ в течение 38,5 часов. В таблице 14 представлены основные технические характеристики имитатора.



Рисунок 58 – Внешний вид имитатора постоянного солнечного излучения для инжекционного отжига облученных ФЭП

Таблица 14 – Основные технические характеристики имитатора постоянного солнечного излучения для отжига облученных ФЭП

| № п/п | Техническая характеристика | Значение |
|-------|--|------------|
| 1 | Спектральный состав излучения | <i>AM0</i> |
| 2 | Интегральная плотность потока, Вт/м ² | 1366,1 |
| 3 | Площадь рабочей зоны, см ² | 225 |
| 4 | Однородность потока излучения, % | ± 2 |
| 5 | Максимальный предел измерения по току, А | ± 1 |
| 6 | Максимальный предел измерения по напряжению, В | ± 10 |

Поскольку задача настоящей работы – определить режим отжига, то в ходе эксперимента для ФЭП областей «1» и «2» ЭС поддерживалась рабочая температура (25 – 30) °С с помощью воздушного охлаждения. Температура фиксировалась термопарой. При этом область с отжигаемыми ФЭП была защищена перегородкой от воздушного охлаждения, температура данной области держалась в пределах (48 – 50) °С. На рисунке 59 представлен внешний вид конструкции.

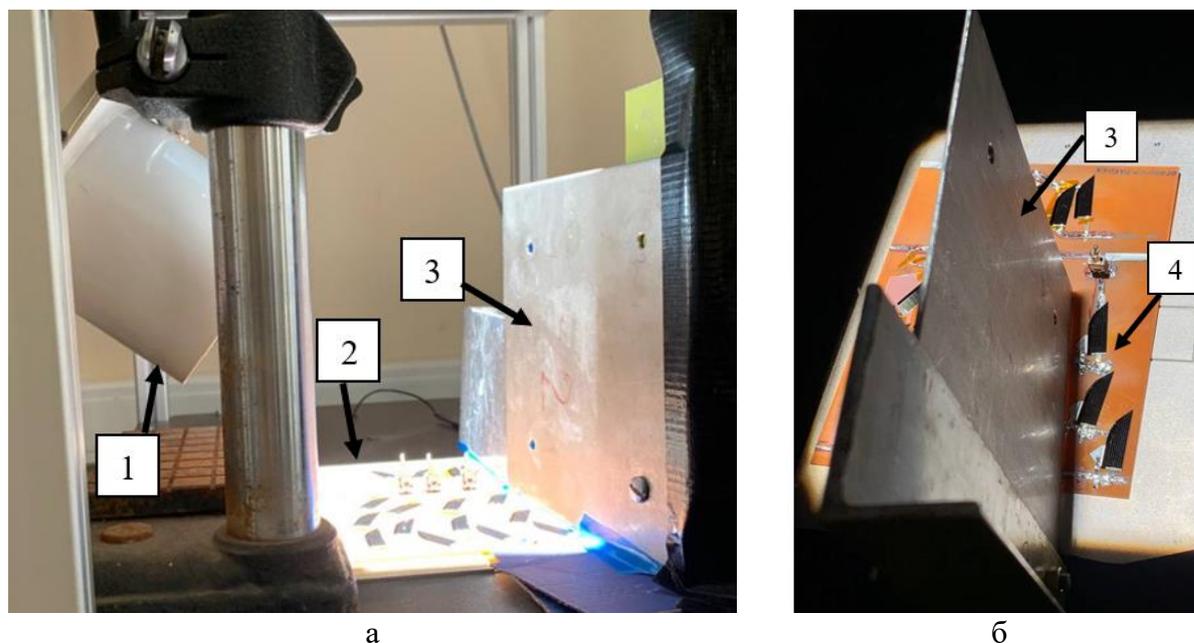


Рисунок 59 – Инжекционный отжиг ЭС в спектре *AM0* при $J_{инж}$ 14,9 мА/см²:
 1 – воздушное охлаждение; 2 – области «2» и «3» ЭС; 3 – перегородка;
 4 – отжигаемая область (область «1» ЭС)

Измерение электрических параметров областей ЭС проводилось на имитаторе постоянного излучения (рисунок 60). В таблице 15 представлены основные технические характеристики имитатора.

Управление установкой осуществляется программой на ПК, которая в результате измерения выдает график ВАХ, а также таблицу, в которой выводятся рассчитанные из ВАХ электрические параметры исследуемого ФЭП, аналогично имитатору импульсного излучения (рисунок 31).



Рисунок 60 – Имитатор постоянного солнечного излучения для измерения ВАХ ЭС: а – внешний вид; б – основные элементы имитатора

Таблица 15 – Основные технические характеристики имитатора постоянного солнечного излучения для измерения ВАХ ЭС

| № п/п | Техническая характеристика | Значение |
|-------|--|----------|
| 1 | Спектральный состав излучения | АМ0 |
| 2 | Интегральная плотность потока, Вт/м ² | 1366,1 |
| 3 | Неравномерность распределения освещенности, % | ± 2 |
| 4 | Площадь рабочей зоны, см ² | 169 |

Измерение электрических и спектральных характеристик ФЭП осуществлялось с помощью оборудования, представленного во II главе настоящей работы:

- имитатора концентрированного солнечного излучения для измерения ВАХ ФЭП (рисунок 31);
- установки для исследования спектральных зависимостей ВКВФ для съемки спектров ВКВФ ФЭП (рисунок 33);
- спектрометра *Ocean Optics «USB 2000+»* для съемки спектров ЭЛ ФЭП (рисунок 35).

Моделирование коэффициентов β и γ осуществлялось в *Mathcad*.

3.4 Описание методики исследования

3.4.1 Оценка электрических параметров ИП ЭС

Для оценки $J_{инж}$ ИП ЭС с целью упрощения расчетов было предположено, что ЭС формируется из n ФЭП путем соединения m идентичных цепочек ФЭП и одной области с параллельно соединенными ФЭП. Как было обозначено ранее (рисунок 57), область «1» – область с отжигаемыми ФЭП. Область «2» обозначена как область с $(m - 1)$ цепочками.

Количество ФЭП в области «3» соответствует количеству цепочек, входящих в область «2», то есть $(m - 1)$. Тогда каждая цепь содержит $((n + 1) / m - 1)$ ФЭП.

Допустим, что вся ЭС находится в активном режиме эксплуатации и постоянно подвергается воздействию потока солнечного излучения со спектром $AM0$. При этом $U_{ХХ}$ ФЭП составляет U , а $I_{кз}$ ФЭП – I . Тогда область «1» выступает в качестве нагрузки и подвергается инжекционному отжигу за счет протекания тока, сгенерированного ИП ЭС (области «2» и «3»).

Следовательно, область «1» вырабатывает ток и напряжение:

$$\begin{cases} I_1 = I; \\ U_1 = U \cdot \left(\frac{n + 1}{m} - 1 \right). \end{cases} \quad (22)$$

Область «2»:

$$\begin{cases} I_2 = I \cdot (m - 1); \\ U_2 = U \cdot \left(\frac{n + 1}{m} - 1 \right). \end{cases} \quad (23)$$

Область «3» вырабатывает ток и напряжение:

$$\begin{cases} I_3 = I \cdot (m - 1); \\ U_3 = U. \end{cases} \quad (24)$$

Область «2-3»:

$$\begin{cases} I_{2-3} = I \cdot (m - 1); \\ U_{2-3} = U \cdot \left(\frac{n + 1}{m} \right). \end{cases} \quad (25)$$

Тогда ток и напряжение области «2-3» в пересчете на область «1» составляют:

$$\begin{cases} I_{2-3} = I_1 \cdot (m - 1); \\ U_{2-3} = U_1 \cdot \left(\frac{n + 1}{n - m + 1} \right). \end{cases} \quad (26)$$

По формулам (26) можно рассчитать необходимое количество ФЭП и количество цепочек в ЭС, для осуществления инжекционного отжига.

3.4.2 Определение скорости отжига *InGaAs* методом электролюминесцентной спектроскопии

Для заданного уровня $J_{\text{инж}}$ интенсивность ЭЛ ($\varphi_{\text{ЭЛ}}$) пропорциональна эффективности излучения [126]:

$$\eta = \frac{R_{\text{изл}}}{R_{\text{изл}} + R_{\text{без}}}, \quad (27)$$

где $R_{\text{изл}}$ и $R_{\text{без}}$ – скорости излучательной и безызлучательной рекомбинации соответственно, с^{-1} .

Исходя из того, что [126]:

$$R_{\text{изл,без}} = \tau_{\text{изл,без}}^{-1}, \quad (28)$$

где $\tau_{\text{изл}}$, $\tau_{\text{без}}$ – время жизни НЗ при излучательной и безызлучательной рекомбинации соответственно, с ,

эффективность излучения может быть записана через время жизни НЗ:

$$\eta = \left(1 + \frac{\tau_{\text{изл}}}{\tau_{\text{без}}}\right)^{-1}. \quad (29)$$

Скорость безызлучательной рекомбинации представляет собой [127]:

$$R_{\text{без}} = R_0 + R_{\phi}, \quad (30)$$

где R_0 – скорость рекомбинации, обусловленная вкладом собственных дефектов, с^{-1} ;

R_{ϕ} – скорость рекомбинации, обусловленная вкладом дефектов, образованных в результате облучения ФЭП, с^{-1} .

Скорость рекомбинации, обусловленная вкладом собственных дефектов [126]:

$$R_0 = \tau_0^{-1}, \quad (31)$$

где τ_0 – время жизни НЗ до облучения, с .

Скорость рекомбинации, обусловленной вкладом дефектов, образованных в результате облучения [126]:

$$R_{\phi} = N_{\phi} \cdot \sigma \cdot \nu = \tau_{\phi}^{-1}, \quad (32)$$

где N_{ϕ} – концентрация центров безызлучательной рекомбинации, образованных после облучения ФЭП, см^{-3}

σ – сечение захвата, связанное с рекомбинацией ННЗ на радиационных центрах безызлучательной рекомбинации, см^2 ;

ν – тепловая скорость ННЗ, $\text{см}/\text{с}$;

τ_{ϕ} – время жизни ННЗ при рекомбинации на радиационных центрах, с.

Концентрация центров безызлучательной рекомбинации, образованных в результате облучения, составляет [127], [128]:

$$N_{\phi} = k \cdot \Phi, \quad (33)$$

где k – скорость внедрения центров безызлучательной рекомбинации, см^{-1} .

Вносимые облучением центры рекомбинации вызывают уменьшение интенсивности люминесценции только тогда, когда N_{ϕ} становится больше, чем концентрация собственных центров безызлучательной рекомбинации N_0 .

Таким образом, выражение (30) можно записать как:

$$\frac{1}{\tau_{\text{без}}} = \frac{1}{\tau_0} + k \cdot \phi \cdot \sigma \cdot \nu. \quad (34)$$

Пусть

$$\beta = k \cdot \nu \cdot \sigma \cdot \tau_0, \quad (35)$$

$$\gamma = \frac{\tau_{\text{изл}}}{\tau_0}. \quad (36)$$

Тогда выражение (34) может быть переписано как эффективность излучения в результате облучения ФЭП:

$$\eta_{\phi} = (1 + \gamma \cdot (1 + \beta \cdot \phi))^{-1}. \quad (37)$$

Таким образом, в зависимости от флюенса облучения по изменению интенсивности люминесценции конкретного каскада ФЭП, индуцированной постоянной $J_{\text{инж}}$, можно определить параметры β и γ , из которых можно рассчитать τ_0 и произведение $(k \cdot \sigma)$, характеризующее центры, введенные облучением [129] – [136].

С другой стороны, в работе [42] формула (38) не учитывает τ_0 и выглядит как:

$$\frac{1}{\tau_{\text{без}}} = N_{\phi, \text{отж}} \cdot \sigma \cdot \nu, \quad (38)$$

где N_{ϕ} , $N_{\text{отж}}$ – концентрации радиационно-индуцированных дефектных центров до и после инжекционного отжига, соответственно, см^{-3} .

Тогда выражение (37) преобразуется в:

$$\eta_{\phi, \text{отж}} = (1 + \tau_{\text{изл}} \cdot N_{\phi, \text{отж}} \cdot \sigma \cdot \nu)^{-1}, \quad (39)$$

где η_{ϕ} и $\eta_{\text{отж}}$ – эффективности излучения до (после облучения) и после отжига соответственно, отн. ед.

Концентрация радиационно-индуцированных центров безызлучательной рекомбинации в зависимости от времени инжекционного отжига подчиняется кинетике первого порядка [137]. Поэтому радиационно-индуцированные центры безызлучательной рекомбинации аннигилируют, и их концентрация после отжига может быть найдена в соответствии с формулой [138]:

$$N_{\text{отж}} = N_{\phi} \cdot \exp(-A^* \cdot t_{\text{отж}}), \quad (40)$$

где A^* – скорость инжекционного отжига, с^{-1} ;

$t_{\text{отж}}$ – время отжига или инъекции, с.

Из соотношения эффективности излучения с учетом выражений (39) и (40) можно получить уравнение скорости инжекционного отжига [138]:

$$A^* = - \frac{\ln \left[\left(1 - \frac{1}{\eta_{\text{отж}}}\right) / \left(1 - \frac{1}{\eta_{\phi}}\right) \right]}{t_{\text{отж}}}. \quad (41)$$

Эффективность излучения каскадов после облучения и после отжига соответственно определена по формуле:

$$\eta_{\phi, \text{отж}} = \frac{\varphi_{\phi, \text{отж}} \cdot S}{P_{\text{ЭЛ}}}, \quad (42)$$

где φ_{ϕ} , $\varphi_{\text{отж}}$ – поверхностная плотность потока излучения фотонов при ЭЛ после облучения и после отжига соответственно, Вт/м²;

S – площадь ФЭП, м²;

$P_{\text{ЭЛ}}$ – мощность источника питания при ЭЛ, Вт.

Следует отметить, что скорость инжекционного отжига A^* подчиняется экспоненциальному закону Аррениуса [137]:

$$A^* = A_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_a \cdot q}{kT}\right), \quad (43)$$

где E_a – энергия активации инжекционного отжига, эВ.

Наклон аппроксимационной линии температурной зависимости скорости отжига радиационных дефектов может быть использован для определения E_a .

3.4.3 Определение скорости отжига *InGaAs* на основе спектров внешнего квантового выхода фотоотклика

Учитывая, что величина $J_{\text{КЗ}}$ ФЭП пропорциональна диффузионной длине в активном слое (каскаде) ФЭП, то относительная плотность дефектов $N_{\text{отж}}/N_{\phi}$ определяется из соотношений [137]:

$$\frac{1}{L_{\phi}^2} - \frac{1}{L_0^2} \propto \frac{1}{J_{\text{КЗ} \phi}^2} - \frac{1}{J_{\text{КЗ} 0}^2} = B \cdot N_{\phi}, \quad (44)$$

$$\frac{1}{L_{\text{отж}}^2} - \frac{1}{L_0^2} \propto \frac{1}{J_{\text{КЗ} \text{отж}}^2} - \frac{1}{J_{\text{КЗ} 0}^2} = B \cdot N_{\text{отж}}, \quad (45)$$

где B – константа;

$L_{\text{отж}}$ – диффузионная длина ННЗ после отжига, мкм;

$J_{\text{КЗ} 0}$ – плотность тока короткого замыкания до облучения, мА/см²;

$J_{K3 \phi}$ – плотность тока короткого замыкания после облучения, мА/см²;

$J_{K3 \text{отж}}$ – плотность тока короткого замыкания после отжига, мА/см².

Подставляя выражения (44) и (45) в выражение (40), было получено, что A^* можно определить по данным измерения J_{K3} , полученным из спектров ВКВФ, следующим образом [137]:

$$A^* = -\ln \left[\frac{J_{K3 \phi}^2 \cdot (J_{K3 0}^2 - J_{K3 \text{отж}}^2)}{J_{K3 \text{отж}}^2 \cdot (J_{K3 0}^2 - J_{K3 \phi}^2)} \right] / t_{\text{отж}} \quad (46)$$

При этом следует учитывать тот факт, что некоторые радиационные дефекты стабильны при отжиге [91], [104]. Переписав уравнение (40), концентрацию центров безызлучательной рекомбинации после инжекционного отжига можно определить как:

$$N_I = (1 - p) \cdot N_{\phi} \cdot \exp(-A^* \cdot t_{\text{отж}}) + p \cdot N_{\phi} \quad (47)$$

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

Для определения p в *InGaAs*, были использованы результаты работы [139] – рисунок 61, где рассчитывалась концентрация дефектов в результате инжекционного отжига двухкаскадного ФЭП со структурой *GaAs/Ge*, облученного протонами с энергией 150 кэВ и флюенсом в диапазоне от $1 \cdot 10^{10}$ см⁻² до $5 \cdot 10^{11}$ см⁻².

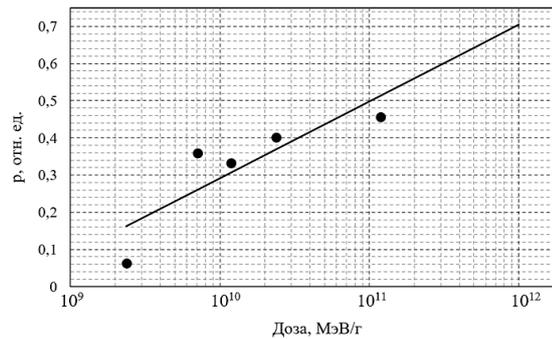


Рисунок 61 – Зависимость доли дефектов, которые не подлежат восстановлению, от дозы структурных повреждений (уравнение кривой аппроксимации: $p = 0,0897 \cdot \ln(D_{\text{стр}}) - 1,774$)

Для *InGaAs* пересчет в дозу структурных повреждений при воздействии электронов с энергией 7 МэВ и флюенсом 10^{15} см⁻² осуществлялся по формуле [22], [91], [140]:

$$D_{\text{стр}} = L_{\text{стр}} \cdot \Phi. \quad (48)$$

Величина J_{K3} после отжига оценивалась по формуле:

$$J_{\text{КЗ отж}} = J_{\text{КЗ } \phi} + (J_{\text{КЗ } 0} - J_{\text{КЗ } \phi}) \cdot (1 - p). \quad (49)$$

Для определения эффективного времени отжига ЭС в первом приближении, скорость инжекционного отжига определялась из работы [89] при рабочей температуре БС 75 °С. Влияние температуры на зависимость скорости инжекционного отжига от $J_{\text{инж}}$ представлено на рисунке 62.

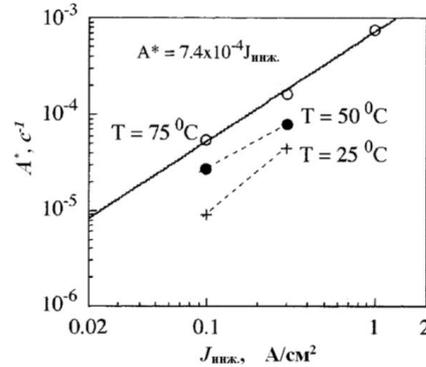


Рисунок 62 – Скорость инжекционного отжига радиационных дефектов в ФЭП на основе *InGaP/GaAs* [89]

При рабочей температуре БС 75 °С [89]:

$$A^* = 7,4 \cdot 10^{-4} \cdot J_{\text{инж}} \quad (50)$$

Степень восстановления электрических параметров ФЭП после отжига рассчитывалась по формуле:

$$\Delta X_{\text{отж}} = \left(\frac{X_{\text{отж}}}{X_{\phi}} - 1 \right) \cdot 100 \%, \quad (51)$$

где $X_{\text{отж}}$ – электрический параметр ФЭП после инжекционного отжига.

3.5 Результаты эксперимента и их анализ

Созданная ЭС состояла из 18 ФЭП. $I_{\text{КЗ}}$ и $U_{\text{ХХ}}$ каждого ФЭП до облучения 42,8 мА и 2,8 В соответственно. Тогда n равно 18, m равно 5. Ток и напряжение, вырабатываемые ИП ЭС (область «2» и «3»), согласно формулам (26), в 3 раза и в 1,4 раз больше соответствующих электрических параметров, обеспечиваемых областью с отжигаемыми ФЭП (область «1»).

Если учитывать, что БС в условиях КП может нагреваться до 75 °С (рабочая температура БС при освещении), то согласно формуле (50) при плотности тока, полученной

в ЭС, скорость инжекционного отжига составит $1,1 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$. Предполагая, что максимальное значение $J_{КЗ \text{ отж}}$ не более $17,2 \text{ мА/см}^2$, что было получено согласно формуле (49), то по выражению (46), можно определить время отжига, которое составило 26,1 час. При этом учитывалось, что $D_{стр}$ (формула (48)) для электронов с энергией 7 МэВ и флюенсом $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ составляет $6 \cdot 10^{10} \text{ МэВ/г}$, а также величина p , равная 0,4 (рисунок 61). Поскольку рабочая температура ЭС при экспериментальном инжекционном отжиге была низкой и составила $50 \text{ }^\circ\text{C}$, то для усиления эффекта отжига время проведения процесса восстановления было пропорционально увеличено до 38,5 часов.

Электрические параметры областей ЭС после облучения ФЭП области «1» электронами с энергией 7 МэВ и флюенсом 10^{15} см^{-2} были получены из ВАХ, измеренной на имитаторе постоянного излучения (рисунок 60) спектра АМ0 при температуре $25 \text{ }^\circ\text{C}$, и представлены в таблице 16.

Таблица 16 – Электрические параметры областей ЭС после облучения ФЭП области «1»

| Область ЭС | $I_{КЗ}$, мА | $J_{КЗ}$, мА/см ² | $U_{ХХ}$, В | $P_{\text{макс}}$, мВт | КПД, % | FF, % |
|---------------|---------------|-------------------------------|--------------|-------------------------|--------|-------|
| Область «1» | 25,6 | 11,08 | 6,67 | 129,8 | 3,5 | 76,0 |
| Область «2» | 105,5 | 11,42 | 7,47 | 570,1 | 15,2 | 72,4 |
| Область «3» | 106,2 | 11,49 | 2,57 | 219,7 | 5,9 | 80,6 |
| Область «2-3» | 103,4 | 11,19 | 9,99 | 752,2 | 20,1 | 72,9 |

На рисунке 63 представлены ВАХ отжигаемой области ЭС до и после облучения электронами с энергией 7 МэВ и флюенсом 10^{15} см^{-2} , а также после инжекционного отжига в течение 38,5 часов. Из ВАХ были рассчитаны соответствующие электрические параметры, результаты показаны в таблице 17.

Согласно полученным данным, после инжекционного отжига наблюдалось небольшое повышение электрических параметров отжигаемой области ЭС, в частности величина $I_{КЗ}$ выросла на 3,28 %, $U_{ХХ}$ – на 2,25 %, а $P_{\text{макс}}$ – на 6,24 %.

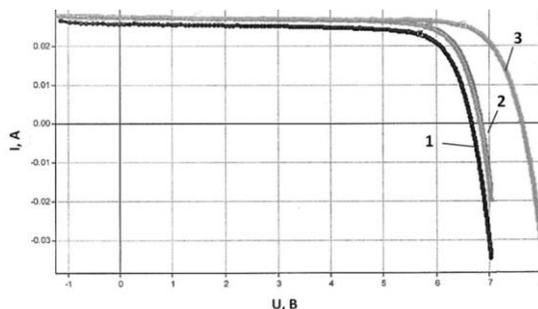


Рисунок 63 – ВАХ отжигаемой области ЭС в спектре АМ0 при температуре $25 \text{ }^\circ\text{C}$:

- 1 – после облучения электронами с энергией 7 МэВ и флюенсом 10^{15} см^{-2} ;
- 2 – после отжига в течение 38,5 часов при плотности тока инжекции $14,9 \text{ мА/см}^2$;
- 3 – до облучения

Таблица 17 – Электрические параметры отжигаемой области ЭС (область «1») в спектре АМО на разных этапах эксперимента

| Этап | $I_{кз}$, мА | $U_{хх}$, В | $P_{макс}$, мВт | КПД, % | FF, % |
|-----------------------|---------------|--------------|------------------|--------|-------|
| До облучения | 26,32 | 7,65 | 158,30 | 4,20 | 78,60 |
| После облучения | 25,60 | 6,67 | 129,80 | 3,45 | 76,00 |
| После отжига | 26,44 | 6,82 | 137,90 | 3,66 | 76,50 |
| ΔX_{ϕ} , % | 2,74 | 12,81 | 18,00 | 16,67 | 3,31 |
| $\Delta X_{отж}$, % | 3,28 | 2,25 | 6,24 | 4,57 | 0,66 |

Для анализа степени восстановления облученных ФЭП со структурой *InGaP/InGaAs/Ge* были получены усредненные электрические и спектральные характеристики ФЭП отжигаемой области «1» после инжекционного отжига (рисунок 64). Электрические параметры указаны в таблице 18.

Из спектров ВКВФ, представленных на рисунке 64б, были рассчитаны фототоки каскадов, оценена степень деградации после облучения ФЭП электронами с энергией 7 МэВ и флюенсом 10^{15} см⁻², а также степень восстановления отжига в течение 38,5 часов. Результаты указаны в таблице 19. Можно сделать вывод, что в результате отжига наибольшее восстановление было характерно для среднего каскада на основе *InGaAs* – 1,17 %.

Величина $J_{кз0}$ для ФЭП, согласно таблице 19 составляет 18,5 мА/см², а $J_{кз\phi}$ – 15,4 мА/см². При сопоставлении данных из таблиц 18 и 19, можно сделать вывод о расхождении данных – при создании ЭС из ФЭП наблюдались потери по току и напряжению, что может быть связано с паразитным сопротивлением контактных дорожек на основе олова. $J_{инж}$ ЭС составила 14,9 мА/см².

После отжига наблюдалось повышение электрических параметров ФЭП, в частности величина $I_{кз}$ выросла на 1,4 %, $U_{хх}$ – на 5,2 %, а $P_{макс}$ – на 33,3 %.

Спектры ЭЛ верхнего каскада на основе *InGaP* и среднего каскада на основе *InGaAs* после каждого этапа эксперимента представлены на рисунках 64в и 64г соответственно. По спектрам была определена поверхностная плотность потока излучения фотонов при ЭЛ каскадов после облучения электронами с энергией 7 МэВ с флюенсом 10^{15} см⁻² и в результате инжекционного отжига в течение 38,5 часов, а затем по формуле (42) определена эффективность излучения. Для *InGaAs* эффективность излучения после облучения составляла 0,002, после отжига – 0,046.

Согласно формуле (41), приближенное значение скорости инжекционного отжига A^* при времени отжига 38,5 часов для *InGaAs* составило $6 \cdot 10^{-6}$ с⁻¹. Для уточнения величины A^* необходимо построить изменение $\left(1 - \frac{1}{\eta_{отж}}\right) / \left(1 - \frac{1}{\eta_{\phi}}\right)$ в зависимости от

времени инжекционного отжига, тогда наклон аппроксимационной линии экспериментальных данных, будет соответствовать скорости инжекционного отжига A^* [138].

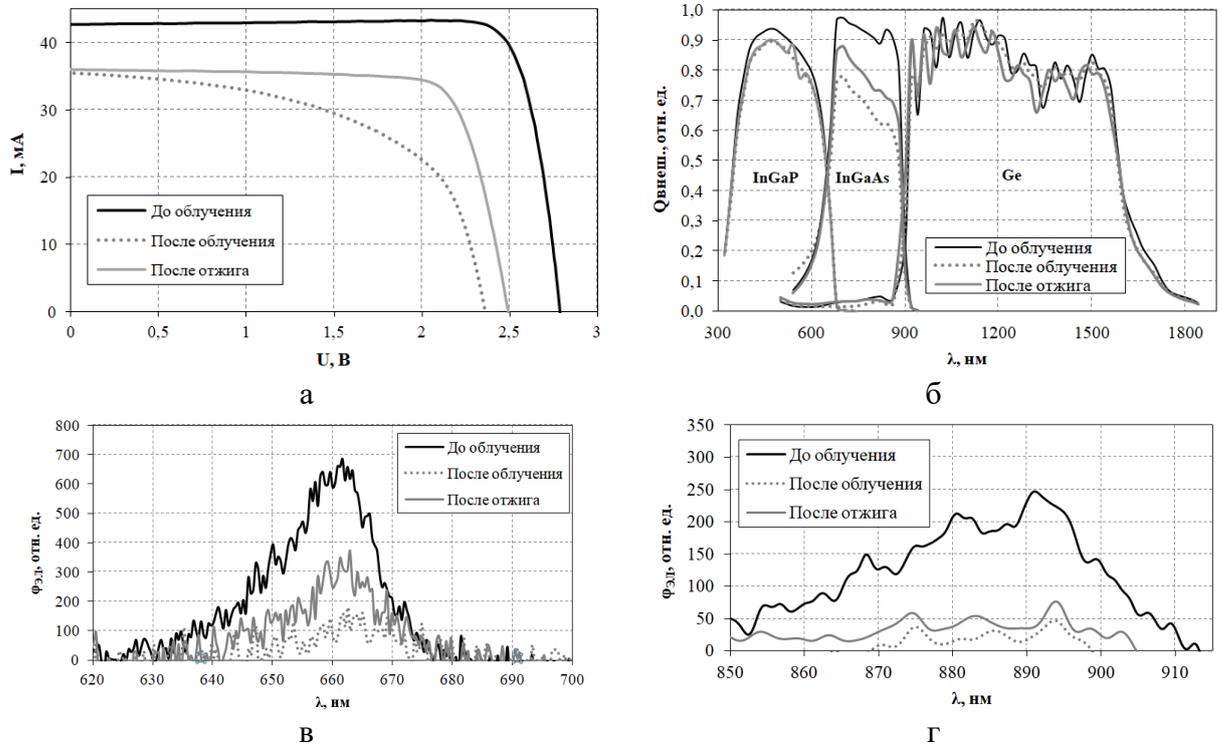


Рисунок 64 – Электрические и спектральные характеристики ФЭП (сплошная линия черного цвета – до облучения; точечная линия серого цвета – после облучения электронами с энергией 7 МэВ и с флюенсом $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$; сплошная линия серого цвета – после отжига в течение 38,5 часов, при плотности тока инжекции $14,92 \text{ мА/см}^2$): а – ВАХ; б – ВКВФ; в – ЭЛ каскада *InGaP*; г – ЭЛ каскада *InGaAs*

Таблица 18 – Электрические параметры отжигаемых ФЭП в спектре *AM0* на разных этапах эксперимента

| Этап | $I_{КЗ}$, мА | $U_{ХХ}$, В | $P_{\text{макс}}$, мВт | $KПД$, % | FF , % |
|-----------------------------|---------------|--------------|-------------------------|-----------|----------|
| До облучения | 42,80 | 2,79 | 101,53 | 29,86 | 85,08 |
| После облучения | 35,52 | 2,36 | 46,81 | 13,77 | 55,84 |
| После отжига | 36,02 | 2,49 | 70,15 | 20,63 | 78,21 |
| ΔX_{ϕ} , % | 17,0 | 15,4 | 53,9 | 53,9 | 34,4 |
| $\Delta X_{\text{отж}}$, % | 1,4 | 5,2 | 33,3 | 33,0 | 28,6 |

Таблица 19 – Результаты исследования спектров ВКВФ ФЭП после облучения электронами с энергией 7 МэВ и с флюенсом $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, а также после отжига в течение 38,5 часов

| Каскад | J_0 , мА/см ² | J_{ϕ} , мА/см ² | $J_{\text{отж}}$, мА/см ² | ΔX_{ϕ} , % | $\Delta X_{\text{отж}}$, % |
|---------------|----------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| <i>InGaP</i> | 18,54 | 17,56 | 17,58 | 5,29 | 0,11 |
| <i>InGaAs</i> | 18,46 | 15,32 | 15,50 | 17,01 | 1,17 |
| <i>Ge</i> | 28,48 | 28,30 | 28,31 | 0,63 | 0,04 |

С учетом формулы (46), учитывая спектры ВКВФ, на основе которых было получено изменение плотности тока *InGaAs* в результате облучения и отжига, значение скорости отжига A^* для исследуемого каскада составляет $2,3 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$.

Ввиду того, что расчет A^* на основе спектров ЭЛ зависит от:

- площади исследуемого образца,
- равномерности излучения ФЭП,
- расположения светочувствительного элемента спектрометра,
- мощности источника питания,
- времени интегрирования,

что увеличивает погрешность расчета, то для расчета эффективного времени отжига использовались данные полученные с помощью формулы (46) на основе значений $J_{кз}$, полученных из спектров ВКВФ *InGaAs* каскада.

Согласно рисунку 61 и формулам (46) и (49) для максимально возможного восстановления тока *InGaAs* при условиях экспериментального отжига 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.

В работе [91] проводился инжекционный отжиг ФЭП на основе *InGa_{0,5}P_{0,5}/GaAs*, облученных электронами энергией 1 МэВ при флюенсе в диапазоне от $3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ до $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Инжекция проводилась при плотности тока 100 мА/см^2 . Скорость отжига при инжекции ННЗ в условиях прямого смещения для ФЭП со структурой *InGaP/GaAs* в 2 раза ниже, чем для ФЭП с одним каскадом *InGaP*. В случае ФЭП со структурой *InGaP/GaAs* индуцированные излучением дефекты в верхнем каскаде *InGaP*, как полагают, аннигилируются при инжекционном отжиге, но дефекты, находящиеся в нижнем каскаде на основе *GaAs*, все еще остаются. Усиление отжига дефектов в верхнем каскаде *InGaP* в условиях инжекции ННЗ происходит в результате безызлучательного процесса электронной рекомбинации, энергия которого усиливает движение дефектов.

В работе [9] проводился инжекционный отжиг элементов без радиационно-стойкого стекла *In_{0,48}Ga_{0,52}P/In_{0,01}Ga_{0,99}As/Ge*, облученных электронами энергией 1 МэВ при флюенсе в диапазоне от $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ до $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Здесь отжиг проводился при плотности тока более 90 мА/см^2 с одновременным нагревом структуры до $25 \text{ }^\circ\text{C}$, $55 \text{ }^\circ\text{C}$ и $70 \text{ }^\circ\text{C}$. Было отмечено, что дефекты *H1* и *H2*, которые выступают в качестве центров рекомбинации, отжигаются из-за неравновесного процесса рекомбинации электрон-дырочных пар (механизма Бургоина). Аналогичное поведение наблюдалось при облучении *p-InGaP* и

p-InP. В основе аннигиляции радиационно-индуцированных дефектов лежит механизм энергосвободения.

Аналогичный эксперимент проводился и для ФЭП на основе $(Al_{0,2}Ga_{0,8})_{0,52}In_{0,48}P$, облученных протонами энергией 30 кэВ с флюенсом в диапазоне от $1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ до $1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Концентрация ловушек *HP1* уменьшалась с увеличением времени инжекции при токе 100 мА/см^2 , в эксперименте отжиг длился в течение 60 секунд. Было отмечено, что дефект *HP1* отжигался при совмещении инжекционного отжига с изохорным отжигом при температуре выше $300 \text{ }^\circ\text{C}$. Эта температура отжига выше, чем для дефекта *H2*, наблюдаемого в *p-InGaP* облученного электронами с энергией 1 МэВ.

Согласно работе [88], где было проведено исследование инжекционного отжига облученных протонами с энергией 3 МэВ флюенсом 10^{11} см^{-2} , 10^{12} см^{-2} , 10^{13} см^{-2} ФЭП со структурами $In_{0,5}Ga_{0,5}P$, $In_{0,72}Ga_{0,28}As_{0,62}P_{0,38}$, $In_{0,53}Ga_{0,47}As$, плотность тока инжекции, используемые при отжиге составляла 100 мА/см^2 . В этом случае для элемента на основе $In_{0,5}Ga_{0,5}P$ максимальное восстановление мощности после отжига составило 1,8 %. Для элемента со структурой $In_{0,72}Ga_{0,28}As_{0,62}P_{0,38}$ максимальное восстановление мощности после отжига 1,2 %. При этом для ФЭП со структурой $In_{0,53}Ga_{0,47}As$ восстановления не наблюдалось.

Исходя из результатов работ, рассмотренных выше, для увеличения эффективности инжекционного отжига облученных ФЭП требуется плотность тока инжекции более чем 90 мА/см^2 и температура отжига более $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Тогда для *InGaAs* каскада при рабочей температуре БС $75 \text{ }^\circ\text{C}$ и $J_{\text{инж}} 90 \text{ мА/см}^2$ величина A^* составит $2 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$, учитывая данные из [21] и результаты экспериментального отжига, полученные в настоящей работе.

Глава IV. Режим отжига многокаскадных ФЭП на основе полупроводниковых материалов $AIII BV/Ge$

ФЭП в составе БС представляет собой полупроводниковый прибор, функционирующий без дополнительной защиты (экранно-вакуумной теплоизоляции) в открытом КП, что делает его уязвимым к комплексному воздействию внешних факторов. Прогнозирование стойкости БС к этим ФКП – комплексная инженерная задача, решение которой уникально для каждой орбиты.

В этой главе представлены результаты моделирования воздействия ФКП (собственной внешней атмосферы (СВА) КА, температуры, ионизирующего излучения) на основные электрические параметры ФГЧ БС. Все эти ФКП необходимо учитывать при расчете эффективного режима инжекционного отжига облученных ФЭП в составе БС.

4.1 Объект исследования

В качестве объекта исследования рассматривались ФЭП на основе $InGaP/InGaAs/Ge$, описанные во II главе и ЭСЕ с радиационно-стойким стеклом К-208 толщиной 125 мкм на фронтальной поверхности исследуемого типа ФЭП.

4.2 Описание эксперимента

Целью расчета является определение эффективного режима отжига многокаскадных ФЭП на основе полупроводниковых материалов $AIII BV/Ge$ в зависимости от радиационных условий, в которых эксплуатируется БС КА.

Определение эффективного режима отжига основано на результатах моделирования воздействия ФКП на электрические параметры ФЭП и включает в себя следующую последовательность действий:

- а) выбор и определение параметров эксплуатируемой орбиты;
- б) моделирование электрических параметров ФЭП при воздействии СВА, включая:
 - съемку спектра коэффициента отражения ЭСЕ;
 - измерение ВАХ ЭСЕ на имитаторе солнечного излучения;
- в) определение температурного коэффициента ФЭП и оценка его электрических параметров при рабочей температуре БС;

г) моделирование электрических параметров ЭСЕ на базе *NRL*-метода при воздействии ионизирующего излучения, включая:

- расчет энергетических зависимостей $L_{стр}$ электронов и протонов;
- расчет изменения электрических параметров ФЭП в зависимости от дозы структурных повреждений;
- определение энергетических спектров падающих частиц для заданной орбиты;
- расчет энергетических спектров падающих частиц за заданной толщиной радиационно-стойкого стекла;
- расчет дозы структурных повреждений за САС для заданной орбиты и заданного радиационно-стойкого стекла ЭСЕ;

д) моделирование изменения электрических параметров БС за САС с учетом инжекционного отжига и выбор эффективного режима инжекционного отжига.

4.3 Оборудование

Съемка спектров отражения ЭСЕ для моделирования электрических параметров ФЭП при воздействии СВА проводилась на спектрофотометре *UV-3600* в диапазоне длин волн от 200 нм до 2000 нм (в соответствии с диапазоном поглощения спектра солнечного излучения ФЭП со структурой *InGaP/InGaAs/Ge*). Спектрофотометр оснащен тремя типами детекторов: фотоэлектронным умножителем и полупроводниковыми детекторами на основе *InGaAs* и *PbS*. Установка обладает высокой чувствительностью и низким уровнем рассеянного света. Внешний вид установки представлен на рисунке 65. Технические характеристики установки представлены в таблице 20.



Рисунок 65 – Внешний вид установки спектрофотометра *UV-3600*

Для оценки степени воздействия СВА измерение ВАХ ЭСЕ проводилось на имитаторе постоянного солнечного излучения, рассмотренного во II главе (рисунок 60).

Таблица 20 – Основные технические характеристики спектрофотометра *UV-3600*

| № п/п | Техническая характеристика | Значение |
|-------|---|-------------------------------------|
| 1 | Спектральный диапазон, нм | 185 – 3300 |
| 2 | Спектральная ширина щели в УФ/видимой области (8 ступенчатая), нм | 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 3; 5; 8 |
| 3 | Спектральная ширина щели в ближней ИК-области (10 ступенчатая), нм | 0,2; 0,5; 1; 2; 3; 5; 8; 12; 20; 32 |
| 4 | Воспроизводимость длины волны в УФ/видимой области, нм | ± 0,08 |
| 5 | Воспроизводимость длины волны в ближней ИК-области, нм | ± 0,32 |
| 6 | Разрешение, нм | 0,1 |
| 7 | Шаг по длине волны, нм | 0,01 – 5,00 |
| 8 | Максимальная скорость сканирования в УФ/видимой области, нм/мин | около 4500 |
| 9 | Максимальная скорость сканирования в ближней ИК-области с фотоэлектронным умножителем/с детектором на основе <i>InGaAs</i> , нм/мин | около 9000 |
| 10 | Максимальная скорость сканирования в ближней ИК-области с детектором на основе <i>PbS</i> , нм/мин | около 4000 |
| 11 | Погрешность установки длины волны в УФ / видимой области, нм | ± 0,2 |
| 12 | Погрешность установки длины волны в ближней ИК-области, нм | ± 0,8 |

Моделирование основных электрических параметров при воздействии ФКП осуществлялось в среде *Mathcad*.

Моделирование энергетической зависимости потери энергии быстрых частиц на образование структурных повреждений $L_{стр}$ проводилось в среде *SPENVIS* [11].

Моделирование энергетической зависимости пробега ионизирующих частиц в радиационно-стойком стекле исследуемого типа ФЭП реализовывалось в средах *ESTAR*, *PSTAR* для электронов и протонов соответственно [141].

4.4 Описание методики исследования

Согласно работе [142], где проводилось исследование БС, возвращенных на Землю после 15-летнего полета, известны такие ФКП как:

- затенение ФГЧ в результате недораскрытия створки ФГЧ БС после выведения на орбиту, после чего в современных БС космического назначения стали использовать диодную защиту;

- воздействие потоков метеороидов и техногенных частиц, которое через некоторое время пребывания БС в полете может пробить и вывести из строя створки генератора, что может привести как к эрозии радиационно-стойкого стекла ЭСЕ, так и к сквозным пробоям ФЭП, вследствие чего наблюдается оптическая деградация БС, шунтирование ФЭП [143];

- частицы космического мусора, которые могут пробить БС, в результате чего возможен отрыв ФЭП и цепочки генератора БС;

- воздействие УФ-излучения и ионизирующего излучения, способствующее образованию пленки из конденсирующихся продуктов СВА КА на поверхности

радиационно-стойкого стекла ЭСЕ, как следствие – оптическая деградация и увеличение интенсивности электростатических разрядов на поверхностях радиационно-стойкого стекла ЭСЕ [144];

– радиационная электризация, негативно воздействующая на нормальное функционирование БС и бортовой радиоэлектронной аппаратуры, что приводит к снижению производительности БС [145];

– термоциклирование, что может привести к нестабильности работы БС [145];

– ионизирующее излучение, являющееся одним из основных ФКП, поскольку это приводит к постепенному снижению КПД БС (на протяжении всего времени ее эксплуатации) в результате накопления поглощенной дозы космической радиации, что определяет САС БС.

Все эти ФКП влияют на электрические параметры БС, что может негативно сказаться на эффективности инжекционного отжига облученных ФЭП.

В рамках данной работы моделирование проводилось на примере условий ГСО. Рассматриваемая орбита относится к круговому типу орбит и используется для размещения коммуникационных, телетрансляционных искусственных спутников и другого. ГСО расположена над экватором Земли на высоте 35786 км над уровнем моря. Угловая скорость обращения вокруг планеты искусственного спутника, эксплуатируемого на рассматриваемой орбите, совпадает с угловой скоростью вращения Земли вокруг оси. Это позволяет избежать проблем с изменением частоты сигнала искусственного спутника и наземных антенн [147].

4.4.1 Оценка воздействия СВА на БС КА

При полете КА за пределами плотных слоев атмосферы возникает облако СВА. Одним из источников формирования СВА являются непрерывные потери массы КА, например, в результате периодической работы реактивных двигателей систем ориентации и коррекции положения КА. Также потеря массы КА непрерывно возникает в результате десорбции и сублимации внешней поверхности КА, утечек атмосферы кабины, утечек через клапаны сопел двигателей, а также потери массы при работе испарителей системы стабилизации температур. Особо следует отметить потерю массы КА за счет испарения непрореагировавших компонент топлива из камер сгорания и сопел при включении мощных двигателей [147], [148].

Процессы, приводящие к непрерывным потерям массы (десорбция, сублимация и обезгаживание), в свою очередь зависят от внешней среды. Скорость десорбции изменяется

в зависимости от давления внешней среды, температуры и действия радиации. Скорость сублимации и обезгаживания зависит от температуры поверхности вещества и давления окружающей среды [147], [148].

В основном СВА состоит из смеси твердых частиц, жидкости и газов, причем ее паровая и газовая составляющие могут быть в значительной степени ионизированы. Эти частицы оседают на поверхности БС в виде пленки, которая под воздействием УФ-излучения Солнца, потока протонов, электронов, тепла может стабилизироваться и накапливаться. Влияние СВА на БС приводит к следующему [147], [148].

– Снижению коэффициента пропускания τ_s . Если осаждение массы на поверхность ЭСЕ достаточно велико, то оптическая прозрачность радиационно-стойкого стекла может снизиться. Присутствие загрязняющей пленки, которая в общем случае не является плоской, может также приводить к рассеиванию излучения. Для оценки эффекта рассеяния необходимо знать структуру, толщину, показатель преломления.

– Увеличению коэффициента поглощения солнечного излучения, следовательно, к повышению температуры и снижению мощности БС. Пары загрязняющих веществ, конденсирующиеся на радиационно-стойком стекле, могут изменять отношение поглощательной способности солнечного излучения к отражательной до двух раз.

Для моделирования степени воздействия СВА на электрические параметры БС было принято, что объект исследования, покрытый радиационно-стойким стеклом, – это чистая поверхность, а конструкция с пленкой СВА – загрязненная поверхность.

Луч света, падающий на поверхность, которая должна быть частично отражающей и частично пропускающей схематично показан на рисунке 66 [149].

Сохранение энергии требует, чтобы общая энергия, которая частично отражается обратно в пространство, частично поглощается поверхностью и пропускается поверхностью, была равна падающей энергии, то есть [149]:

$$\rho(\lambda) + \alpha(\lambda) + \tau(\lambda) = 1. \quad (52)$$

где ρ – коэффициент отражения чистой поверхности, равный отношению отраженной энергии к падающей, отн. ед.;

α – коэффициент поглощения чистой поверхности, равный отношению поглощенной энергии к падающей, отн. ед.;

τ – коэффициент пропускания чистой поверхности, равный отношению прошедшей энергии к падающей, отн. ед.

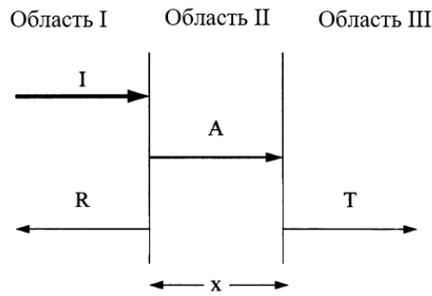


Рисунок 66 – Падающая (I), отраженная (R), поглощенная (A) и прошедшая (T) энергии [149]

Поглощающая способность загрязненной поверхности определяется выражением [149]:

$$\alpha_x(\lambda) = \alpha(\lambda) \cdot [1 - \exp(-\alpha_c(\lambda) \cdot x)], \quad (53)$$

где α_c – экспериментально определенный коэффициент поглощения загрязняющего слоя, мкм^{-1} ;

x – толщина загрязняющего слоя, мкм .

Расчет проводился для конкретного случая поверхности, которая спроектирована так, чтобы падающая энергия полностью отражалась (например, как зеркало), но при этом поверхность покрыта тонким слоем загрязняющей пленки. То есть «область I» на рисунке 66 – это свободное пространство, «область II» – это слой загрязнения, а «область III» – это материал, который (в чистом виде) эффективно сглаживает ограничение $\tau(\lambda) = 0$. Подстановка уравнения (53) в уравнение (52) дает выражение для уменьшения отражательной способности поверхности в зависимости от толщины загрязнения [149]:

$$\rho_x(\lambda) = \rho(\lambda) \cdot \exp(-2 \cdot \alpha_c(\lambda) \cdot x). \quad (54)$$

Коэффициент «2» присутствует в экспоненте уравнения (54), так как луч света должен пересечь пленку загрязнения, отразиться и повторно пересечь пленку загрязнения, чтобы избежать поглощения [120].

С учетом формулы (54) наличие тонкой загрязняющей пленки на поверхности ЭСЕ изменит его поверхностное поглощение солнечного излучения [149], [150]:

$$\alpha_{x,s} = \frac{\int [1 - \rho(\lambda) \cdot \exp(-2 \cdot \alpha_c(\lambda) \cdot x)] \cdot AM0(\lambda) d\lambda}{\int AM0(\lambda) d\lambda}. \quad (55)$$

Коэффициент отражения ФЭП с радиационно-стойким стеклом при наличии загрязняющей пленки СВА был найден с применением выражения [149], [150]:

$$\rho_{x,s} = \frac{\int [\rho(\lambda) \cdot \exp(-2 \cdot \alpha_c(\lambda) \cdot x)] \cdot AMO(\lambda) d\lambda}{\int AMO(\lambda) d\lambda}. \quad (56)$$

Зная теоретический коэффициент пропускания и измеренное значение $I_{кз}$ ЭСЕ, можно рассчитать деградацию мощности БС в результате осаждения на ней частиц СВА [151]:

$$\frac{P_{\text{макс САС}}}{P_{\text{макс 0}}} = \tau_{x,s}(\lambda) \cdot \frac{\ln(\tau_{x,s}(\lambda) \cdot I_{кз 0})}{\ln(I_{кз 0})}, \quad (57)$$

где $P_{\text{макс САС}}$ – максимальная мощность БС в конце САС (в результате воздействия СВА), Вт;

$P_{\text{макс 0}}$ – максимальная мощность БС на начало САС, Вт;

$I_{кз 0}$ – ток короткого замыкания БС в начале САС, А;

$\tau_{x,s}(\lambda)$ – коэффициент пропускания радиационно-стойкого стекла с загрязненной поверхностью, отн. ед.

4.4.2 Оценка воздействия температуры на БС КА

Электрические параметры зависят от температуры – за сутки температура БС может меняться в диапазоне от минус 45 °С до плюс 75 °С и выше [142]. Увеличение температуры отрицательно сказывается на характеристики ФЭП [152], что усложняет прогнозирование радиационной стойкости БС в процессе ее эксплуатации.

Величину температурной чувствительности БС характеризуют температурные коэффициенты электрических параметров ФЭП. Температурный коэффициент является функцией доминирующих процессов рекомбинации (потерь энергии), что показано на рисунке 67 [152].

В идеальном ФЭП энергия падающих фотонов эффективно преобразуется в ОПЗ p - n -перехода. Однако при этом следует, что:

– некоторые фотоны обладают энергией больше, чем E_g , и эта «дополнительная» энергия быстро теряется возбужденными электронами атомов кристаллической решетки в виде тепла в процессе, называемом термализацией («7» на рисунке 67);

– некоторые фотоны обладают энергией, меньше E_g , и не способны сгенерировать ни одну электрон-дырочную пару («9» на рисунке 67);

– излучательная рекомбинация ограничивает генерируемый ток и соответствует энергии испускаемых фотонов при максимальной мощности («5» на рисунке 67);

– при работе p - n -перехода ускоренные электрическим полем носители заряда релаксируют к потолку валентной зоны за счет столкновений с атомами кристаллической решетки, в результате чего выделяется тепло (нагрев Пельтье [153]), что приводит к нарушению баланса между интенсивностью поглощения и интенсивностью излучения (рассогласование телесных углов поглощения и излучения) («8» на рисунке 67).

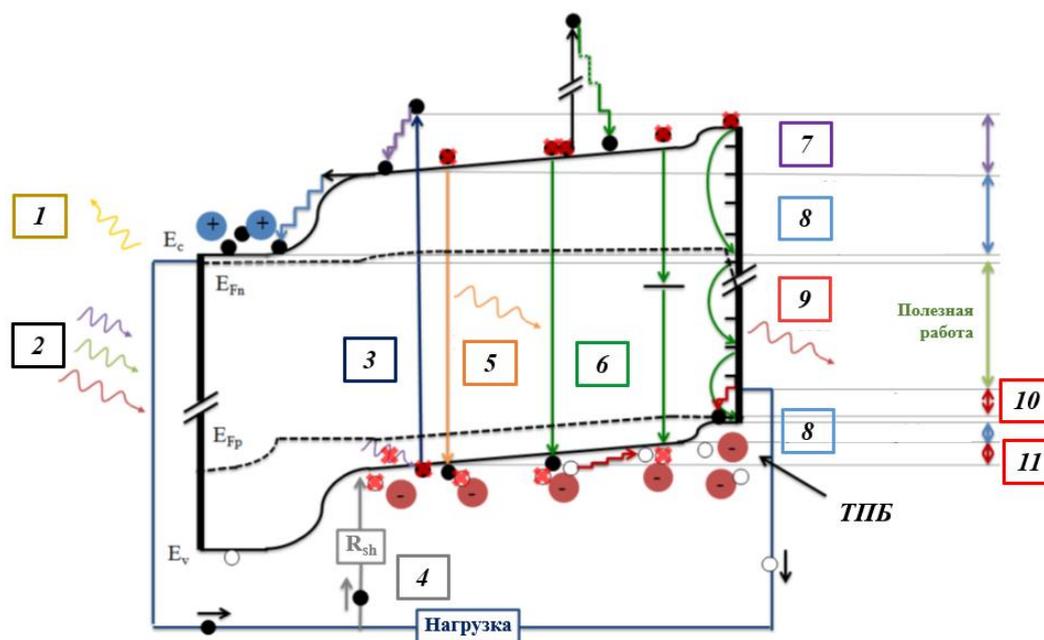


Рисунок 67 – Основные механизмы потерь ФЭП (E_{Fn} и E_{Fp} – квази уровни Ферми электронов и дырок соответственно; R_{sh} – шунтирующее сопротивление; ТПБ – тыльный потенциальный барьер): 1 – потери на отражение; 2 – падающие фотоны; 3 – поглощенная энергия; 4 – потери на шунтирующее сопротивление; 5 – потери на излучательную рекомбинацию; 6 – потери на безызлучательную рекомбинацию; 7 – потери на термолизацию; 8 – потери Карно, потери на рассогласование телесных углов поглощения и излучения, потери на безызлучательную рекомбинацию; 9 – потери энергии фотонов с энергией ниже E_g ; 10 – потери на контактах; 11 – потери на сопротивление [152]

Наиболее важные потери в реальном ФЭП связаны с безызлучательной рекомбинацией, в которую входят (рекомбинация по механизму Шокли-Рида-Холла, Оже-рекомбинация, поверхностная рекомбинация). Другие потери характеризуются отражением на фронтальной стороне ФЭП, шунтирующим (наличие обратного сопротивления p - n -перехода, загрязнений в полупроводниковом материале),

последовательным (несовершенство контактов) сопротивлениями и ограниченной подвижностью носителей заряда.

С ростом температуры, в результате увеличения скорости рекомбинации и, как следствие, равновесной концентрации носителей заряда, наблюдается повышение интенсивности излучательной рекомбинации в ФЭП. Это приводит к отрицательной температурной чувствительности баланса интенсивности поглощения-излучения, что является причиной снижения производительности ФЭП по мере их нагрева [152].

На рисунке 68 показана температурная зависимость основных потерь в ФЭП. В этом упрощенном случае к температуре чувствительны только «балансовые потери» (потери Карно [154], [155], потери на рассогласование телесных углов поглощения и излучения, потери на безызлучательную рекомбинацию). Условно можно считать, что в температурном диапазоне работы ФЭП изменение балансовых потерь с температурой линейно. По этой причине температурную чувствительность ФЭП часто описывают значением температурного коэффициента. Следует отметить, что температурные коэффициенты электрических параметров ФЭП (J_{K3} , U_{XX} , FF) зависят от разных механизмов потерь.

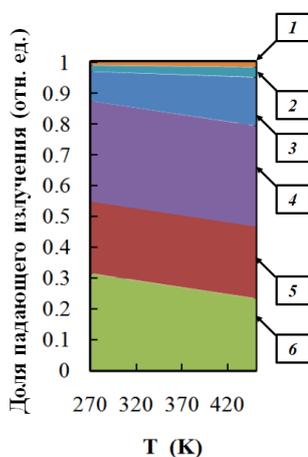


Рисунок 68 – Температурные зависимости основных потерь: 1 – потери на излучение; 2 – потери Карно; 3 – потери на рассогласование телесных углов поглощения и излучения; 4 – потери на термолизацию; 5 – потери энергии фотонов, которая ниже E_g ; 6 – максимальная мощность ФЭП [152]

На рисунке 69 представлена ВАХ ФЭП, изображенная вместе с различными потерями мощности, а также для иллюстрации на рисунке 69 представлена плотность потока фотонов, поглощенных ФЭП [152].

Величина J_{K3} ФЭП обычно увеличивается с ростом температуры, поскольку E_g большинства полупроводников в рассматриваемом случае будет уменьшаться. Как упоминалось в главе I, величина J_{K3} может быть выражена как произведение спектрального

распределения плотности потока солнечного излучения при единичной концентрации и ВКВФ [156].

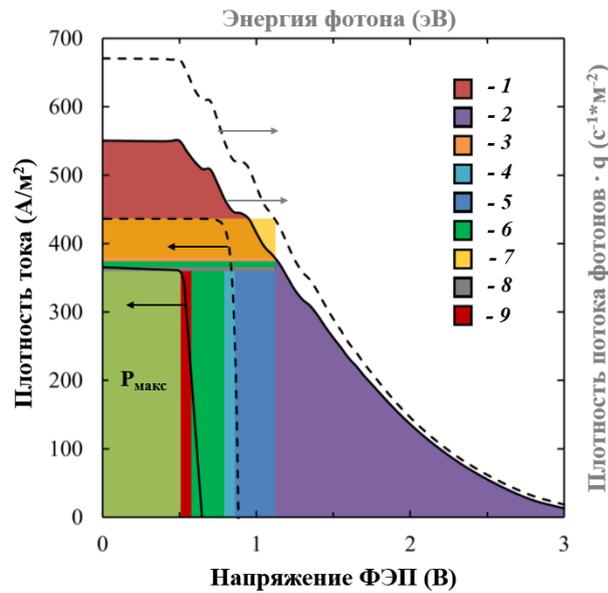


Рисунок 69 – Механизмы потерь ФЭП при максимальной генерируемой мощности (штриховая линия со стрелкой направо – плотность потока фотонов; сплошная линия со стрелкой направо – часть плотности потока фотонов, прошедшая через плоскую перпендикулярно расположенную поверхность ФЭП; штриховая линия со стрелкой налево – идеальная ВАХ ФЭП; сплошная линия со стрелкой налево – реальная ВАХ ФЭП): 1 – потери энергии фотонов, которая ниже E_g ; 2 – потери на термолизацию; 3 – потери на излучение; 4 – потери Карно; 5 – потери на рассогласование телесных углов поглощения и излучения; 6 – потери на безызлучательную рекомбинацию; 7 – потери на отражение; 8 – потери на шунтирующее сопротивление; 9 – потери на последовательное сопротивление [152]

Величина U_{XX} ФЭП соответствует состоянию, в котором общая скорость фотогенерации носителей заряда равна скорости их рекомбинации с тепловыми потоками ННЗ так, что ток по цепи не циркулирует. Относительное изменение U_{XX} с температурой указывает на температурную зависимость баланса процессов генерации-рекомбинации. Скорость фотогенерации носителей заряда зависит от спектра падающего излучения, концентрации излучения, коэффициентов отражения, пропускания и паразитного поглощения. Скорость рекомбинации зависит от вклада различных процессов рекомбинации (радиационной, Шокли-Рид-Холла, Оже, поверхностной, шунтирующей) [157].

Величина FF связывает P_{\max} , которая может быть сгенерирована ФЭП, с его U_{XX} и J_{K3} . Это указывает на минимальную эффективность перехода фотогенерированных зарядов из ФЭП в цепь и соответствует оптимальному компромиссу между током и напряжением. Этот оптимум зависит от баланса генерации-рекомбинации (аналогично U_{XX}), а также от потерь при протекании тока через внешнюю цепь.

На практике температурный коэффициент электрических параметров ФЭП определяется как тангенс угла наклона температурной зависимости этого параметра.

4.4.3 Оценка воздействия радиации на БС КА

На рисунке 70 представлены деградационные кривые электрических параметров ФЭП современных производителей, рассмотренных в I главе, в зависимости от эквивалентного флюенса электронов с энергией 1 МэВ. Так, например, для рассматриваемых ФЭП при воздействии электронов с флюенсом $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ деградация по $J_{КЗ}$ в среднем составляет 4,17 %, по $U_{ХХ}$ – 9,37 %, по $P_{\text{макс}}$ – 13,71 %, что подтверждает важность прогнозирования радиационной стойкости БС при учете режима инжекционного отжига облученных ФЭП.

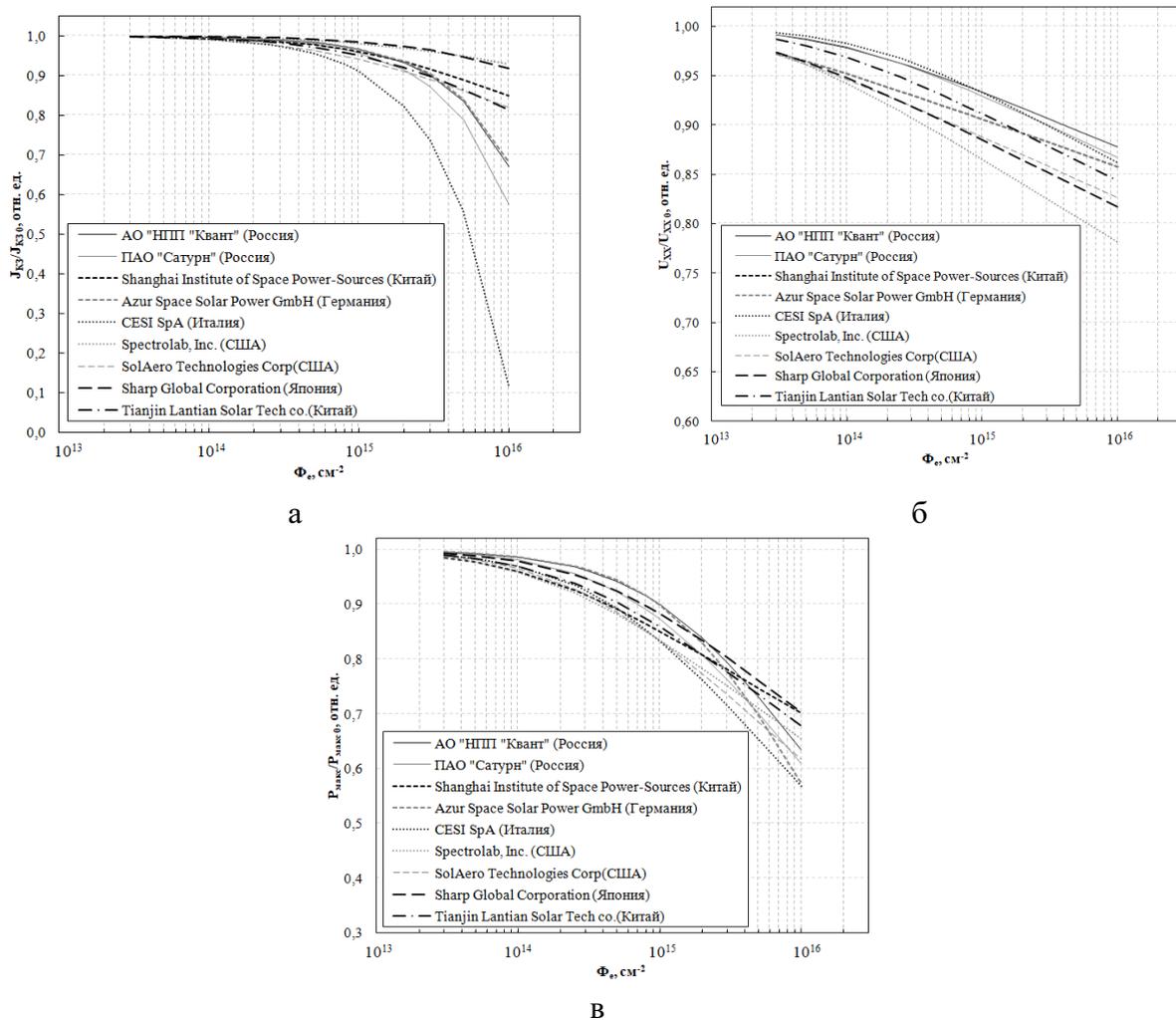


Рисунок 70 – Деградационные кривые электрических параметров ФЭП:
а – $J_{КЗ}$; б – $U_{ХХ}$; в – $P_{\text{макс}}$

В данной работе расчеты по прогнозированию радиационной стойкости БС проводились для ФЭП на основе полупроводниковых соединений *AIIIIVV* без внесения конструкционных изменений (включение РБО, наноструктурных частиц и др.).

Традиционно для расчетов радиационной стойкости БС применяются *JPL*- и *NRL*-методы [22]. Целью первого метода (*JPL*-метод) является определение флюенса электронов с энергией 1 МэВ, эквивалентного по уровню деградации заданным радиационным условиям КП. Второй метод (*NRL*-метод) основан на вычислении дозы структурных повреждений для заданных радиационных условий КП [5], [22], [91], [158]. Для реализации рассматриваемых методов необходимо проведение экспериментальных исследований – измерение и исследование деградационных кривых по каждому нормированному электрическому параметру), а также проведение достаточно сложных математических расчетов [5], [22], [91], [158].

В данном расчете применяется *NRL*-метод, поскольку для его реализации необходимо получить деградационные кривые электрических параметров только трех типов: при воздействии протонов с энергией одной величины и при воздействии электронов с двумя разными энергиями [22].

На рисунке 71 представлена блок-схема, описывающая последовательность этапов расчетно-экспериментальной оценки деградации БС для заданной космической радиационной среды по *NRL*-методу, основанному на вычислении $D_{стр}$.

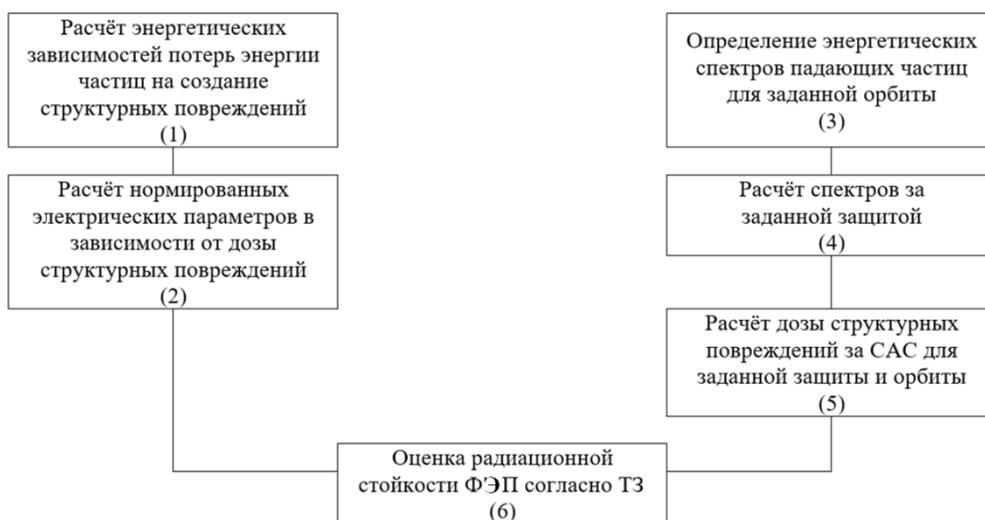


Рисунок 71 – Блок-схема алгоритма расчета радиационной стойкости БС в заданных условиях ионизирующего излучения КП с использованием *NRL*-метода

В соответствии с алгоритмом *NRL*-метода, на первом этапе моделируются энергетические зависимости потерь энергии электронов и протонов на создание структурных повреждений для материала активных областей ФЭП. Потери энергии

быстрых частиц на образование структурных повреждений определяются в среде *SPENVIS* [11].

На втором этапе проводится расчет нормированных электрических параметров в зависимости от дозы структурных повреждений. Для этого строятся зависимости изменения нормированных электрических параметров ФЭП от флюенса частиц при облучении электронами и протонами. При этом необходимо обеспечить как минимум два значения энергии электронов и как минимум одно значение энергии протонов. В случае воздействия электронов базовая энергия должна быть равна 1 МэВ, а второе значение энергии может быть выбрано в пределах (0,5 – 5) МэВ. Для протонов базовая энергия для ФЭП на основе полупроводниковых материалов *АИВВ* может быть выбрана таким образом, чтобы обеспечить полное проникновение протона в ФЭП.

Пересчет флюенса частиц в соответствующие значения $D_{стр}$ осуществляется с помощью выражения [22]:

$$D_{стр} = \int L_{стр}(E) \frac{d\Phi(E)}{dE} dE, \quad (58)$$

где $\frac{d\Phi(E)}{dE}$ – энергетическое распределение флюенса быстрых частиц, $см^{-2} \cdot МэВ^{-1}$.

Для моноэнергетических пучков частиц выражение (58) упрощается [22]:

$$D_{стр} = L_{стр}(E) \cdot \Phi(E). \quad (59)$$

При переходе от флюенсов электронов к дозе структурных повреждений для любой энергии электронов в качестве стандартного подхода принято рассчитывать эквивалентную $D_{стр}$ электронов с энергией 1 МэВ [22]:

$$(D_{e \text{ экв}}(1 \text{ МэВ}))_{стр} = (D_e(E))_{стр} \cdot \left[\frac{(L_e(E))_{стр}}{(L_e(1 \text{ МэВ}))_{стр}} \right]^{(n_e-1)}, \quad (60)$$

где $(D_e(E))_{стр}$ – доза структурных повреждений, создаваемая электронами с энергией E , $МэВ \cdot г^{-1}$;

$(L_e(E))_{стр}$ – потери энергии электронов на образование структурных повреждений для электронов с энергией E , $МэВ \cdot см^2 \cdot г^{-1}$;

$(L_e(1 \text{ МэВ}))_{стр}$ – потери энергии электронов на образование структурных повреждений для электронов с энергией 1 МэВ, $МэВ \cdot см^2 \cdot г^{-1}$;

n_e – показатель степени, обеспечивающий «слияние» деградационных кривых, измеренных для разных энергий электронов, в одну общую кривую при переходе от флюенса к дозе структурных повреждений.

После этого строятся зависимости контролируемых параметров от $D_{стр}$ в результате воздействия протонов и от $(D_{e экв}(1 \text{ МэВ}))_{стр}$ в результате воздействия электронов с энергией 1 МэВ. Данные зависимости аппроксимируются выражением вида [22]:

$$\Delta X_\phi = 1 - C \cdot \lg \left(1 + \frac{D}{D_x} \right), \quad (61)$$

где C и D_x – параметры аппроксимации.

Следует отметить, что полученные зависимости электрического параметра, как правило, не совпадают. Для «привязки» кривой, соответствующей облучению электронами, к протонной кривой используется эмпирический коэффициент R_{ep} , определяемый отношением параметров аппроксимации D_{ex} и D_{px} деградационных кривых, полученных для протонного и электронного облучения [22]:

$$R_{ep} = \frac{D_{ex}}{D_{px}}. \quad (62)$$

Таким образом, общая деградационная кривая – это зависимость электрического параметра от дозы структурных повреждений, полученная по результатам протонного эксперимента. Результаты облучения электронами требуются для определения параметра n_e , используемого для расчета эквивалентной дозы структурных повреждений электронов с энергией 1 МэВ по формуле (60), а также параметра R_{ep} , который будет использован при расчете вклада электронов в суммарную дозу структурных повреждений для заданных радиационных условий.

На третьем этапе задаются энергетические спектры падающих частиц на эксплуатируемой орбите. БС, работающая в условиях открытого космоса, испытывает воздействие жестких корпускулярных излучений, которые можно условно разделить на три группы.

– Космические лучи галактического происхождения, которые имеют низкую интенсивность и не опасны для БС КА с САС более чем 15 лет.

– Космические лучи солнечного происхождения образуются в результате вспышек на Солнце и состоят преимущественно из протонов. Излучения рассматриваемой группы могут вносить существенный вклад в деградацию рабочих параметров БС.

– ЕРПЗ образованы протонами и электронами, захваченными магнитным полем Земли, и являются постоянно действующим ФКП. Интенсивность и спектральный состав протонов и электронов ЕРПЗ зависит от высоты и угла наклона конкретной орбиты.

На четвертом этапе *NRL*-метода необходимо учесть радиационно-стойкое стекло на ЭСЕ и рассчитать спектры за заданной защитой. Основная задача радиационно-стойкого стекла в части радиационной стойкости ФЭП – остановить особенно разрушительные падающие протоны с энергией менее ~ 5 МэВ. Протоны с более высокой энергией замедляются радиационно-стойким стеклом до более низких энергий, прежде чем попасть в активную область полупроводниковой структуры ФЭП. Этот спектр замедления содержит протоны с энергиями от нескольких сотен МэВ до нуля. Напротив, энергичные электроны в космической среде очень трудно экранировать, радиационно-стойкое стекло способно останавливать только электроны с энергией менее ~ 200 кэВ. Следовательно, активная область ФЭП должна быть радиационно-стойкой к замедленным спектрам, как протонов, так и электронов в КП [151].

Радиационные эффекты, наблюдаемые в материалах радиационно-стойкого стекла ЭСЕ можно отнести к дефектам ионизации, а не к дефектам смещения. Ионизационные эффекты обычно зависят от поглощенной дозы и не зависят от типа или энергии частиц. Некоторыми исключениями из этого правила являются сильно заряженные частицы с большой массой. В таких случаях ионизационные эффекты могут быть сконцентрированы вдоль пути частицы, а не равномерно распределены. Логично допустить, что вызванное ионизацией электронами и протонами повреждение в материалах радиационно-стойкого стекла ФЭП определяется полной поглощенной дозой. Такое допущение позволяет воздействие различных компонент радиации КП свести к общей поглощенной дозе, минуя трудоемкое определение констант деградации для каждого вида энергии и частиц [151].

При расчете спектра падающих частиц через радиационно-стойкое стекло предполагается, что приближение непрерывного замедления справедливо для всех рассматриваемых энергий, и частицы проходят через радиационно-стойкое стекло по прямолинейным траекториям. Исключением являются электроны с низкой энергией из-за разброса. В расчете учитываются только электроны, которые могут вызывать смещения с энергией более нескольких 100 кэВ [151].

Можно предположить, что перенос частиц зависит от данных о тормозной способности и пробега ионизирующих частиц. На рисунке 72 схематически показано, как

происходит перенос всенаправленно падающих частиц через радиационно-стойкое стекло [158].

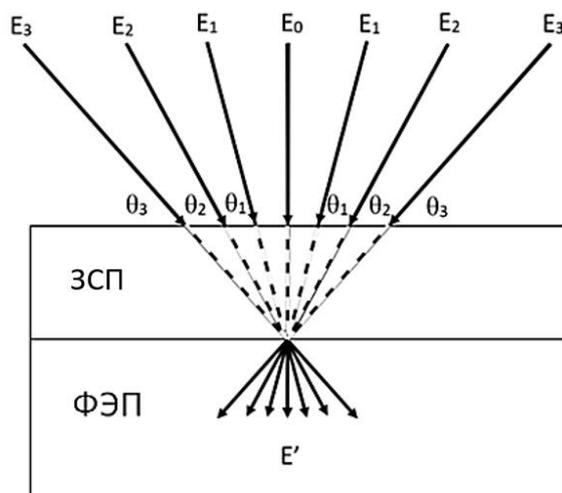


Рисунок 72 – Генерация замедленной энергии (E') с использованием различных комбинаций величины падающей энергии (E) и угла падения (θ) через радиационно-стойкое стекло [158]

Если всенаправленный поток частиц с энергией E падает с фронтальной стороны на ЭСЕ с радиационно-стойким стеклом толщиной t , то тогда частицы, не остановленные в радиационно-стойком стекле, будут выходить из него (то есть входить в полупроводниковую структуру ФЭП) с энергией E' , как показано на рисунке 72. Энергия E' является функцией от угла падения потока из-за изменения длины пути движения частицы в радиационно-стойком стекле. Длина пробега частицы в радиационно-стойком стекле с заданной толщиной определяется как [151]:

$$l(\theta, t) = \frac{t}{\cos\theta}, \quad (63)$$

где t – толщина радиационно-стойкого стекла, г/см²;

θ – угол падения частицы на радиационно-стойкое стекло, град.

Из длины пробега частицы $R(E)$ в материале радиационно-стойкого стекла определяется остаточная длина пробега $R(E')$ частицы с энергией E' [151]:

$$R(E') = R(E) - l(\theta, t). \quad (64)$$

Снова используя данные энергетической зависимости пробега частиц в рассматриваемом материале, определяется энергия $E'(E, \theta, t)$, соответствующая $R(E')$ [151].

Дифференциальный энергетический спектр, прошедший через радиационно-стойкое стекло, учитывая взаимно однозначное соответствие между энергиями падающей (E) и прошедшей (E') частиц, определяется выражением [158]:

$$\Phi(E') = \Phi(E) \frac{dE'}{dE}, \quad (65)$$

где $\Phi(E)$ – дифференциальный энергетический спектр падающих частиц, $\text{см}^{-2} \cdot \text{МэВ}^{-1}$;

E – начальная энергия частицы, МэВ;

E' – энергия частицы, прошедшей через радиационно-стойкое стекло, МэВ.

Отношение dE'/dE получается из соотношений пробега частицы в материале радиационно-стойкого стекла. Этот расчет в некоторой степени сложен, поскольку существуют различные комбинации E_i и θ_i для ионизирующей частицы, которые приводят к определенной замедленной энергии E'_i [159].

Уравнение (64) решается численно с учетом всех частиц в падающем распределении $\Phi(E)$, которые вносят вклад в каждое приращение энергии в замедленном распределении $\Phi(E')$ с учетом всех возможных углов падения. Полный дифференциал всенаправленного замедленного спектра частиц энергии E' , прошедших радиационно-стойкое стекло получают путем суммирования всех таких возможных комбинаций (E_i, θ_i) [159].

На пятом этапе рассчитывается доза структурных повреждений за САС для заданной орбиты и радиационно-стойкого стекла ЭСЕ. В случае воздействия электронов с заданным спектром эквивалентная доза структурных повреждений электронов с энергией 1 МэВ определяется с помощью выражения [22]:

$$(D_{e \text{ экв}}(1 \text{ МэВ}))_{\text{стр}} = \frac{1}{(L_e(1 \text{ МэВ}))_{\text{стр}}^{(n-1)}} \int \frac{d\Phi_e(E)}{dE} (L_e(E))_{\text{стр}}^n dE, \quad (66)$$

где $\frac{d\Phi_e(E)}{dE}$ – дифференциальный флюенс электронов, $\text{см}^{-2} \cdot \text{МэВ}^{-1}$.

Здесь исходными данными являются энергетическое распределение флюенса электронов за САС КА, энергетическая зависимость потерь энергии электронов на образование структурных повреждений в материале активной области БС, а также эмпирически определенный параметр n_e .

После этого рассчитывается суммарная поглощенная доза за САС КА для заданных радиационных условий по формуле [22]:

$$D_{\text{стр}} = (D_p)_{\text{стр}} + \frac{(D_{e \text{ экв}}(1 \text{ МэВ}))_{\text{стр}}}{R_{ep}}. \quad (67)$$

На последнем этапе оценивается радиационная стойкость ФЭП согласно САС. С помощью деградационной кривой при протонном облучении – зависимости электрического параметра от дозы структурных повреждений, полученной на втором этапе алгоритма *NRL*-метода, определяется значение электрического параметра в конце САС КА для заданных радиационных условий [22].

4.4.4 Оценка эффективности применения инжекционного отжига БС КА

После получения зависимости деградационной кривой электрических параметров от САС, было определено значение $J_{\text{кз}}$ в конце рассматриваемого периода отжига (1 год или 5 лет). Затем по формуле (49) определялась величина $J_{\text{кз}}$ после каждого периода инжекционного отжига.

По формуле (50) определялось эффективное время инжекционного отжига для выбранной периодичности отжига. При этом значение A^* было определено во III главе настоящей работы: $2 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ для *InGaAs* каскада при рабочей температуре БС 75 °С и $J_{\text{инж}}$ 90 мА/см².

4.5 Результаты эксперимента и их анализ

4.5.1 Оценка воздействия СВА на БС КА

Поскольку сведения о факторах, необходимых для расчета, отсутствуют, то целесообразно обратиться к результатам экспериментальных работ, представленных в опубликованных источниках литературы.

Для оценки воздействия СВА на мощность БС КА ГСО были использованы данные эксперимента «Астра-2», который проводился на орбитальной станции «Мир» с июня 1995 г. по 1997 г. Количество конструкционных материалов в СВА определяется активностью процессов обезгаживания в этих материалах. При десорбции (80 – 90) % общего потока составляют водяные пары, далее в убывающем порядке идут ($CO + N_2$), H_2 , CO_2 , C_nH_m . В таблице 21 представлены спектры, полученные в эксперименте «Астра-2» 15.11.1995 на витке № 55651 [148].

Таблица 21 – Спектры СВА, полученные в эксперименте «Астра-2» 15.11.1995 на витке № 55651 [148]

| М, а.е.м | Структурная формула | Концентрация в приемнике масс-спектрометра, N_i , см^{-3} |
|----------|---|--|
| 14 | $\text{CH}_2; \text{N}$ | $1,3 \cdot 10^9$ |
| 15 | $\text{CH}_3; \text{NH}$ | $1,9 \cdot 10^9$ |
| 16 | $\text{CH}_4; \text{NH}_2; \text{O}^*$ | $1,1 \cdot 10^9$ |
| 17 | $\text{NH}_3; \text{OH}$ | $1,5 \cdot 10^9$ |
| 18 | H_2O | $3,1 \cdot 10^9$ |
| 28 | $\text{N}_2; \text{CO}; \text{CH}_2\text{CH}_2^*$ | $4,0 \cdot 10^9$ |
| 30 | $\text{NO}; \text{CH}_3\text{CH}_3; \text{HCHO}^*$ | $1,5 \cdot 10^9$ |
| 44 | $\text{CO}_2; \text{N}_2\text{O}^*$ | $1,3 \cdot 10^9$ |
| 45 | $(\text{CH}_3)_2\text{NH}; \text{CH}_3\text{N}_2\text{H}_2$ | $1,3 \cdot 10^9$ |
| 45 | $(\text{CH}_3)_2\text{NH}; \text{CH}_3\text{N}_2\text{H}_2$ | $1,5 \cdot 10^9$ |
| 46 | $\text{NO}_2; \text{CH}_3\text{NHNH}_2$ | $1,5 \cdot 10^9$ |
| 45 | $(\text{CH}_3)_2\text{NH}; \text{CH}_3\text{N}_2\text{H}_2$ | $1,2 \cdot 10^9$ |
| 46 | $\text{NO}_2; \text{CH}_3\text{NHNH}_2$ | $1,2 \cdot 10^9$ |

*Концентрация компонента i , непосредственно после формулы которого он стоит, существенно ниже концентрации компонента i , которому отвечает предшествующая формула.

На рисунке 73 представлены результаты обработки показаний кварцевых микровесов (КМВ) – зависимость толщины осаждения КМВ от времени.

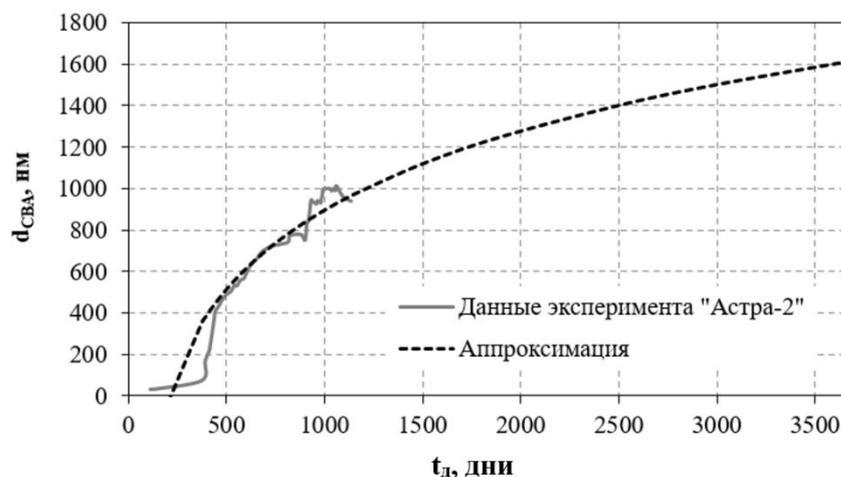


Рисунок 73 – Зависимость толщины осаждения на КМВ от времени и ее аппроксимация до 15 лет [148]

При аппроксимации данной зависимости выражением вида:

$$d_{\text{CBA}} = 551,68 \cdot \ln(t_{\text{д}}) - 2913,1, \quad (68)$$

где d_{CBA} – значение толщины осаждающейся пленки СВА, мкм;

$t_{\text{д}}$ – количество дней, дни,

можно получить оценочное значение толщины осаждающейся пленки СВА при САС, равном 15 лет – 1,84 мкм.

В расчете в качестве экспериментально определенного коэффициента поглощения загрязняющего слоя α_c использовался спектр, который был определен для смеси «типичных» загрязнителей КА (рисунок 74) [149].

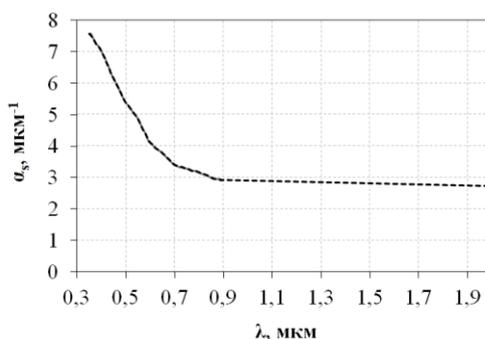


Рисунок 74 – Спектр поглощения «типичных» загрязняющих веществ КА [149]

Данные коэффициента отражения ЭСЕ без загрязняющей пленки были получены на спектрофотометре *UV-3600*. Полученный спектр коэффициента отражения представлен на рисунке 75.

С использованием формулы (55) было рассчитано поверхностное поглощение солнечного излучения с учетом загрязняющей пленки СВА $\alpha_{x,s}$, которое составило $1,32 \cdot 10^{-3}$.

По формуле (56) был получен коэффициент отражения ФЭП с радиационно-стойким стеклом при наличии загрязняющей пленки СВА $\rho_{x,s}$, который составил $2,1 \cdot 10^{-6}$.

Коэффициент пропускания радиационно-стойкого стекла ЭСЕ при наличии загрязняющей пленки СВА $\tau_{x,s}$ с учетом выражения (52) составил 0,9998.

Учитывая экспериментально полученное значение тока короткого замыкания, согласно формуле (57), можно сделать вывод, что в результате воздействия СВА КА в конце САС деградация БС по мощности составит 0,15 %.

Известно, что на концентрацию частиц СВА и осаждающуюся массу СВА влияет высота орбиты КА – с увеличением высоты орбиты КА рассматриваемые параметры уменьшаются. Это вызвано уменьшением возвратного потока частиц, рассеиваемого от окружающей среды. С учетом того, что расчет проводился на основе данных, полученных из эксперимента «Астра-2», проводимого на орбитальной станции «Мир», которая расположена на высоте 358 км, то для ГСО (высота эксплуатируемой орбиты около 36000 км) осаждаемая масса и соответственно толщина пленки будет меньше. Тогда деградация БС по мощности будет меньше 0,2 %.

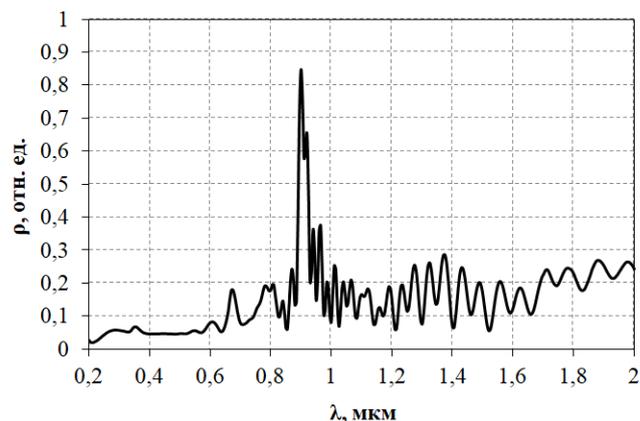


Рисунок 75 – Спектральное распределение коэффициента отражения для ЭСЕ без загрязняющей пленки СВА

Однако следует учесть, что все расчеты носят оценочный характер, поскольку состав СВА в каждом конкретном случае различен и зависит от большого количества параметров, которые в свою очередь зависят от температуры, давления окружающей среды, материалов и конструкции КА и так далее.

4.5.2 Оценка воздействия температуры на БС КА

Как было сказано ранее, на температурную зависимость электрических параметров влияют различные механизмы рекомбинации носителей заряда. При облучении в полупроводниковой структуре возникают радиационно-индуцированные центры рекомбинации, что изменяет баланс между процессами генерации и рекомбинации и, как следствие, температурные коэффициенты электрических параметров ФЭП. В таблицах 22 и 23 представлены температурные коэффициенты электрических параметров ФЭП в зависимости от флюенса электронов с энергией 1 МэВ [70].

На рисунке 76 представлена температурная зависимость электрических параметров ФЭП в зависимости от воздействующего уровня облучения ФЭП. При рассмотрении БС с инжекционным отжигом можно сказать, что нагрев БС положительно скажется на отжигаемой области («1» на рисунке 57) [6], однако может негативно сказаться на области БС, которая работает в качестве внешнего источника питания – области «2» и «3» на рисунке 57.

Таблица 22 – Изменение температурных коэффициентов электрических параметров ФЭП со структурой *InGaP/InGaAs/Ge* при воздействии электронов с энергией 1 МэВ

| № п/п | Электрический параметр | До облучения | $\Phi = 2,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ | $\Phi = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ | $\Phi = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ |
|-------|---|--------------|--|--|--|
| 1 | $\Delta U_{XX} / \Delta T$, мВ/°С | - 6,2 | - 6,5 | - 6,6 | - 6,7 |
| 2 | $\Delta I_{K3} / \Delta T$, мА/см ² /°С | 11,7 | 10,7 | 11,4 | 12,3 |
| 3 | $\Delta U_{\text{макс}} / \Delta T$, мВ/°С | - 6,7 | - 6,8 | - 7,1 | - 7,2 |
| 4 | $\Delta I_{\text{макс}} / \Delta T$, мкА/см ² /°С | 7,8 | 6,5 | 7,8 | 9,1 |

Таблица 23 – Изменение температурных коэффициентов электрических параметров ФЭП на основе *Si* при воздействии электронов с энергией 1 МэВ

| № п/п | Электрический параметр | До облучения | $\Phi = 2,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ | $\Phi = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ | $\Phi = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ |
|-------|---|--------------|--|--|--|
| 1 | $\Delta U_{XX} / \Delta T$, мВ/°С | - 2,02 | - 2,14 | - 2,17 | - 2,2 |
| 2 | $\Delta I_{K3} / \Delta T$, мА/см ² /°С | 0,71 | 1,06 | 1,30 | 1,39 |
| 3 | $\Delta U_{\text{макс}} / \Delta T$, мВ/°С | - 2,07 | - 2,22 | - 2,19 | - 2,25 |
| 4 | $\Delta P_{\text{макс}} / \Delta T$, мВт/см ² /°С | 0,09 | 0,54 | 0,54 | 0,83 |

Как видно на рисунках 76а и 77а, I_{K3} увеличивается с ростом температуры, что связано с изменением E_g полупроводника. Как правило, для большинства полупроводников с повышением температуры E_g снижается. В связи с этим ФЭП реагирует на более длинноволновые области солнечного спектра, и I_{K3} увеличивается.

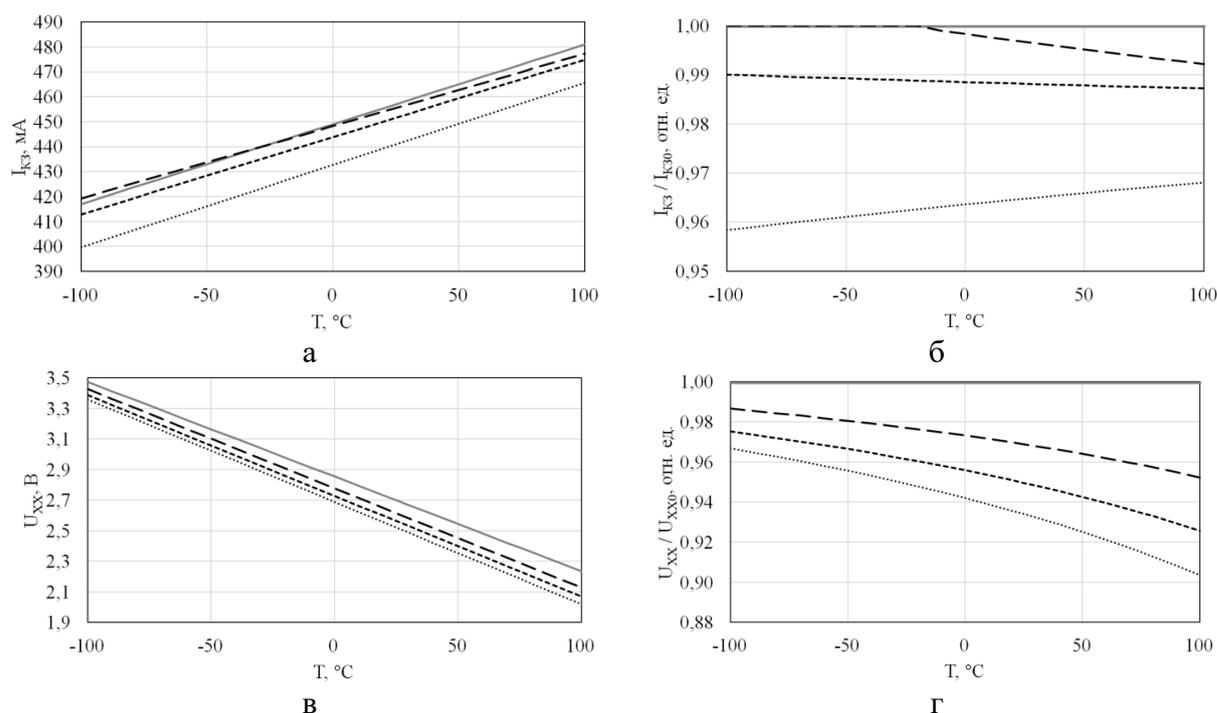


Рисунок 76 – Температурная зависимость электрических параметров ФЭП со структурой *InGaP/InGaAs/Ge* при различных флюенсах электронов с энергией 1 МэВ (прямая линия – до облучения; пунктирная линия – $2,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$; штриховая линия – $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$; точечная линия – $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$): а – I_{K3} ; б – U_{XX} [160]; в – нормированный I_{K3} ; г – нормированное U_{XX}

Значение U_{XX} ФЭП уменьшается с ростом температуры (рисунки 76в и 77в). Как говорилось ранее, с ростом температуры величина E_g уменьшается, что ведет к увеличению

величины тока насыщения J_0 из-за увеличения скорости рекомбинации ННЗ. Согласно формуле (21) [161] U_{XX} в этом случае уменьшается [162].

Исходя из рисунка 76, степень снижения U_{XX} трехкаскадного ФЭП при рабочей температуре БС на Солнце относительно U_{XX} при 25 °С составила 11,6 %. Величина I_{K3} увеличилась на 3,5 %.

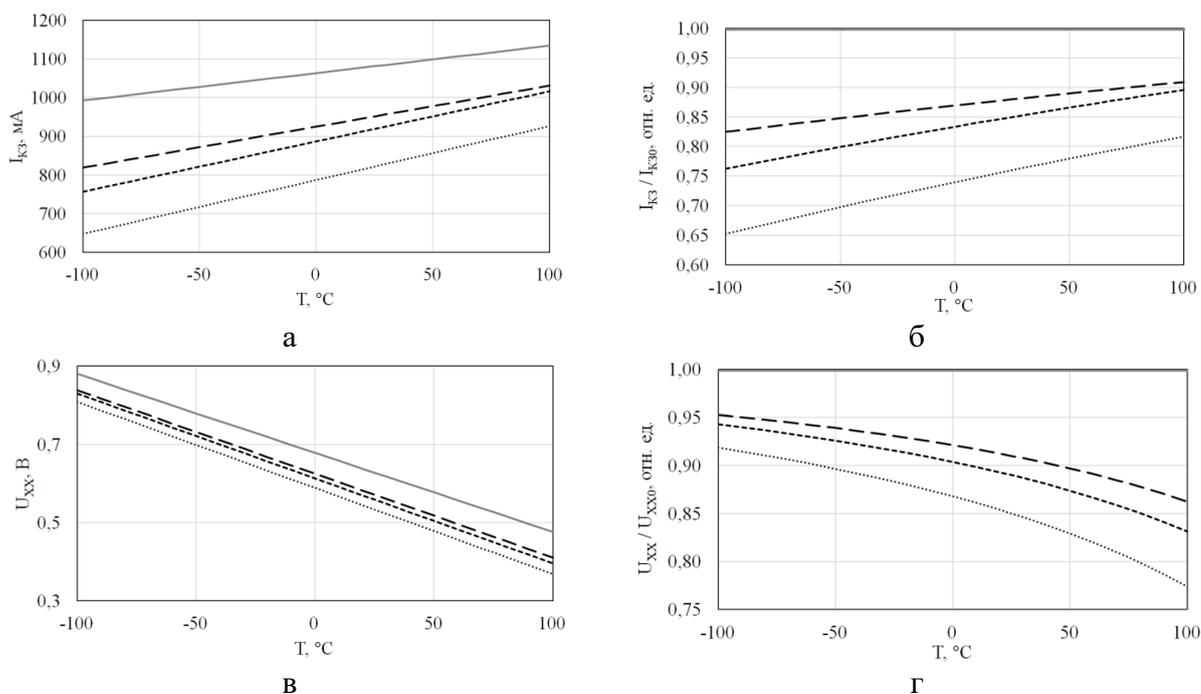


Рисунок 77 – Температурная зависимость электрических параметров ФЭП на основе Si при различных флюенсах электронов с энергией 1 МэВ (прямая линия – до облучения; пунктирная линия – $3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$; штриховая линия – $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$; точечная линия – $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$): а – I_{K3} ; б – U_{XX} [160]; в – нормированный I_{K3} ; г – нормированное U_{XX}

Далее приведено сравнение поведения электрических параметров при воздействии различных уровней радиации и температуры однокаскадного и многокаскадного ФЭП. На рисунках 77б и 77г представлены температурные зависимости нормированных значений I_{K3} и U_{XX} однокаскадного ФЭП при различных значениях флюенса электронов с энергией 1 МэВ соответственно. В первом случае можно наблюдать, что степень деградации I_{K3} уменьшается с ростом температуры. Причем, можно предположить, что с ростом уровня воздействия ионизирующего излучения при повышении температуры увеличивается вероятность аннигиляции радиационно-индуцированных дефектов, являющихся центрами захвата ННЗ. Однако при рассмотрении многокаскадного ФЭП вследствие различной скорости деградации каскадов ФЭП требование согласования постоянных решеток нарушается, что ведет к снижению общего выходного фототока и соответственно КПД [7]. Кроме того, ввиду особенностей конструкции рассматриваемого типа ФЭП (последовательное соединение каскадов, разная толщина каскадов) роль

ограничивающего каскада может перейти к наиболее уязвимому радиации каскаду – каскад на основе *InGaP* или *InGaAs* [7], [105]. Это можно увидеть на рисунке 76а – пересечение кривых, соответствующих флюенсам $2,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ и $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, а также на рисунке 76б – изменение наклона аналогичных кривых, поскольку материалы каскадов ФЭП обладают различной скоростью восстановления в результате отжига радиационных дефектов.

На рисунках 76г и 77г с ростом температуры наблюдается падение $U_{\text{ХХ}}$. Увеличение уровня воздействия ионизирующего излучения приводит к росту «балансовых потерь» в виду увеличения радиационной рекомбинации из-за образования радиационно-индуцированных дефектов. В случае многокаскадного ФЭП это изменение меньше, чем для однокаскадной структуры.

4.5.3 Оценка воздействия радиации на БС КА

Для прогнозирования радиационной стойкости БС использовались электрические параметры ФЭП со структурой *InGaP/InGaAs/Ge* типа 3G28% производства *AZUR Space GmbH* из статьи [159].

Согласно первому этапу методики прогнозирования радиационной стойкости БС в среде *SPENVIS* [11] были смоделированы энергетические зависимости $L_{\text{стр}}$. Ввиду последовательного соединения каскадов структуры в ФЭП не все каскады дают 100 % вклад в выходную мощность устройства. В связи с этим целесообразно использовать данные $L_{\text{стр}}$ для материала, ограничивающего по фототоку каскада – *InGaAs*, деградация которого напрямую сказывается на ухудшении электрических параметров всего устройства. Энергетическая зависимость $L_{\text{стр}}$ представлена на рисунке 39.

Согласно второму этапу, было получено изменение нормированных электрических параметров в зависимости от флюенса, что представлено на рисунке 78.

Доза структурных повреждений рассчитывалась согласно формуле (59). В таблицах 24, 25 представлено изменение нормированных электрических параметров ФЭП в зависимости от дозы структурных повреждений электронами и протонами. Значения $L_{\text{стр}}(E)$ для воздействующих частиц было получено из *SPENVIS* – рисунок 39.

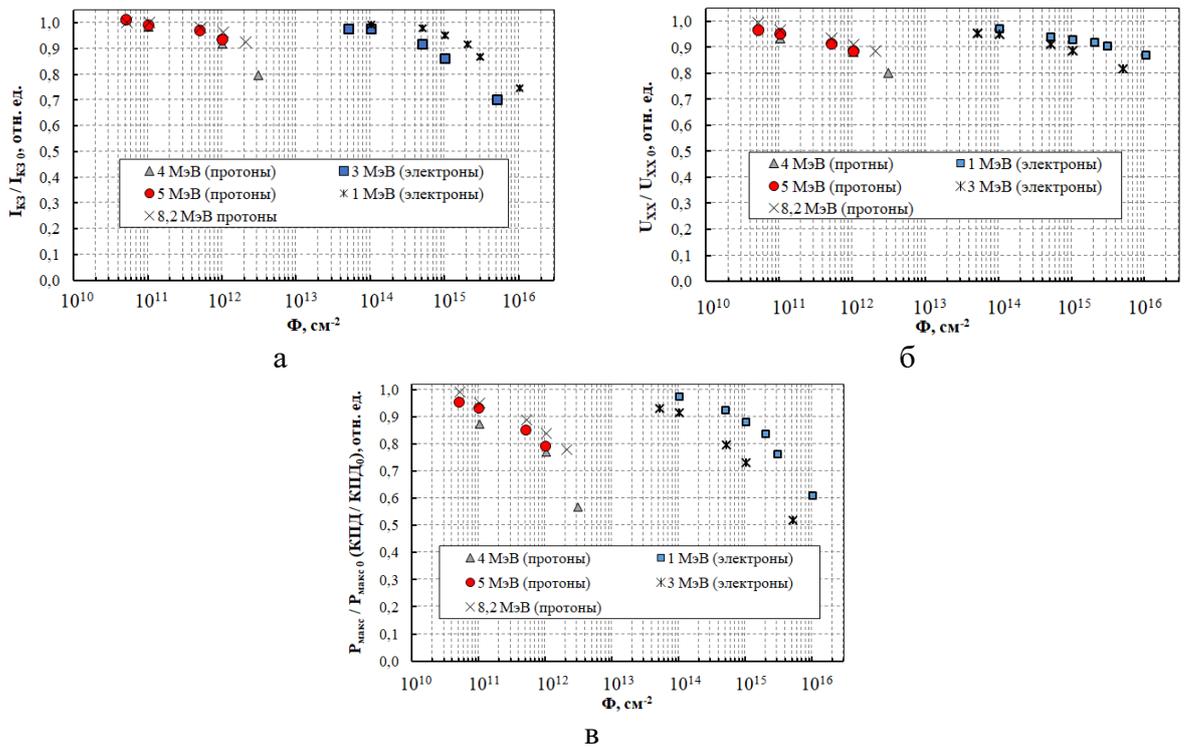


Рисунок 78 – Деградация нормированных электрических параметров в зависимости от флюенса облучения [159]: а – I_{k3} ; б – U_{XX} ; в – P_{\max} (КПД)

Таблица 24 – Нормированный электрический параметр ФЭП в зависимости от флюенса электронов

| E_e , МэВ | Φ_e , см^{-2} | $L_{\text{стр}}$, МэВ · $\text{см}^2/\text{Г}$ | $D_{\text{стр}}$, МэВ/Г | I_{k3} / I_{k3_0} , отн. ед. | U_{XX} / U_{XX_0} , отн. ед. | P_{\max} / P_{\max_0} (КПД/КПД ₀), отн. ед. |
|-------------|-----------------------------|---|--------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---|
| 1 | $1 \cdot 10^{14}$ | $1,660 \cdot 10^{-5}$ | $1,660 \cdot 10^9$ | 0,998 | 0,974 | 0,975 |
| | $5 \cdot 10^{14}$ | | $8,300 \cdot 10^9$ | 0,983 | 0,944 | 0,925 |
| | $1 \cdot 10^{15}$ | | $1,660 \cdot 10^{10}$ | 0,955 | 0,933 | 0,881 |
| | $2 \cdot 10^{15}$ | | $3,320 \cdot 10^{10}$ | 0,922 | 0,921 | 0,837 |
| | $3 \cdot 10^{15}$ | | $4,980 \cdot 10^{10}$ | 0,873 | 0,906 | 0,764 |
| | $1 \cdot 10^{16}$ | | $1,660 \cdot 10^{11}$ | 0,749 | 0,873 | 0,610 |
| 3 | $5 \cdot 10^{13}$ | $3,250 \cdot 10^{-5}$ | $1,625 \cdot 10^9$ | 0,979 | 0,957 | 0,933 |
| | $1 \cdot 10^{14}$ | | $3,250 \cdot 10^9$ | 0,981 | 0,953 | 0,916 |
| | $5 \cdot 10^{14}$ | | $1,625 \cdot 10^{10}$ | 0,921 | 0,912 | 0,800 |
| | $1 \cdot 10^{15}$ | | $3,250 \cdot 10^{10}$ | 0,865 | 0,888 | 0,733 |
| | $5 \cdot 10^{15}$ | | $1,625 \cdot 10^{11}$ | 0,707 | 0,820 | 0,520 |

Следует отметить, что изменение КПД, нормированного на исходное значение аналогично изменению величины максимальной мощности, нормированной на ее исходное значение. При исследовании ФЭП на основе материалов *AlInBV*, облученных протонами, в случае перехода от флюенсов к значениям дозы структурных повреждений ожидается слияние деградационных кривых, полученных при различных энергиях ионизирующих частиц, в одну общую кривую, как показано на рисунке 79 [22].

Таблица 25 – Нормированный электрический параметр ФЭП в зависимости от флюенса протонов

| E_p , МэВ | Φ_p , см^{-2} | $L_{\text{стр}}$, $\text{МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{г}$ | $D_{\text{стр}}$, МэВ/г | $I_{\text{кз}} / I_{\text{кз}0}$, отн. ед. | $U_{\text{ХХ}} / U_{\text{ХХ}0}$, отн. ед. | $P_{\text{макс}} / P_{\text{макс}0}$ (КПД/КПД ₀), отн. ед. |
|----------------|-----------------------------|---|--------------------------|--|--|--|
| 4,0 | $1 \cdot 10^{11}$ | $1,533 \cdot 10^{-2}$ | $1,533 \cdot 10^9$ | 0,989 | 0,940 | 0,877 |
| | $1 \cdot 10^{12}$ | | $1,533 \cdot 10^{10}$ | 0,925 | 0,887 | 0,774 |
| | $3 \cdot 10^{12}$ | | $4,599 \cdot 10^{10}$ | 0,802 | 0,806 | 0,570 |
| 5,0 | $5 \cdot 10^{10}$ | $1,247 \cdot 10^{-2}$ | $6,235 \cdot 10^8$ | 1,019 | 0,973 | 0,956 |
| | $1 \cdot 10^{11}$ | | $1,247 \cdot 10^9$ | 0,997 | 0,960 | 0,935 |
| | $5 \cdot 10^{11}$ | | $6,235 \cdot 10^9$ | 0,977 | 0,919 | 0,854 |
| | $1 \cdot 10^{12}$ | | $1,247 \cdot 10^{10}$ | 0,941 | 0,892 | 0,793 |
| 8,2 | $5 \cdot 10^{10}$ | $7,930 \cdot 10^{-3}$ | $3,965 \cdot 10^8$ | 1,010 | 1,000 | 0,996 |
| | $1 \cdot 10^{11}$ | | $7,930 \cdot 10^8$ | 1,009 | 0,972 | 0,956 |
| | $5 \cdot 10^{11}$ | | $3,965 \cdot 10^9$ | 0,990 | 0,938 | 0,891 |
| | $1 \cdot 10^{12}$ | | $7,930 \cdot 10^9$ | 0,969 | 0,917 | 0,841 |
| | $2 \cdot 10^{12}$ | | $1,586 \cdot 10^{10}$ | 0,933 | 0,890 | 0,783 |

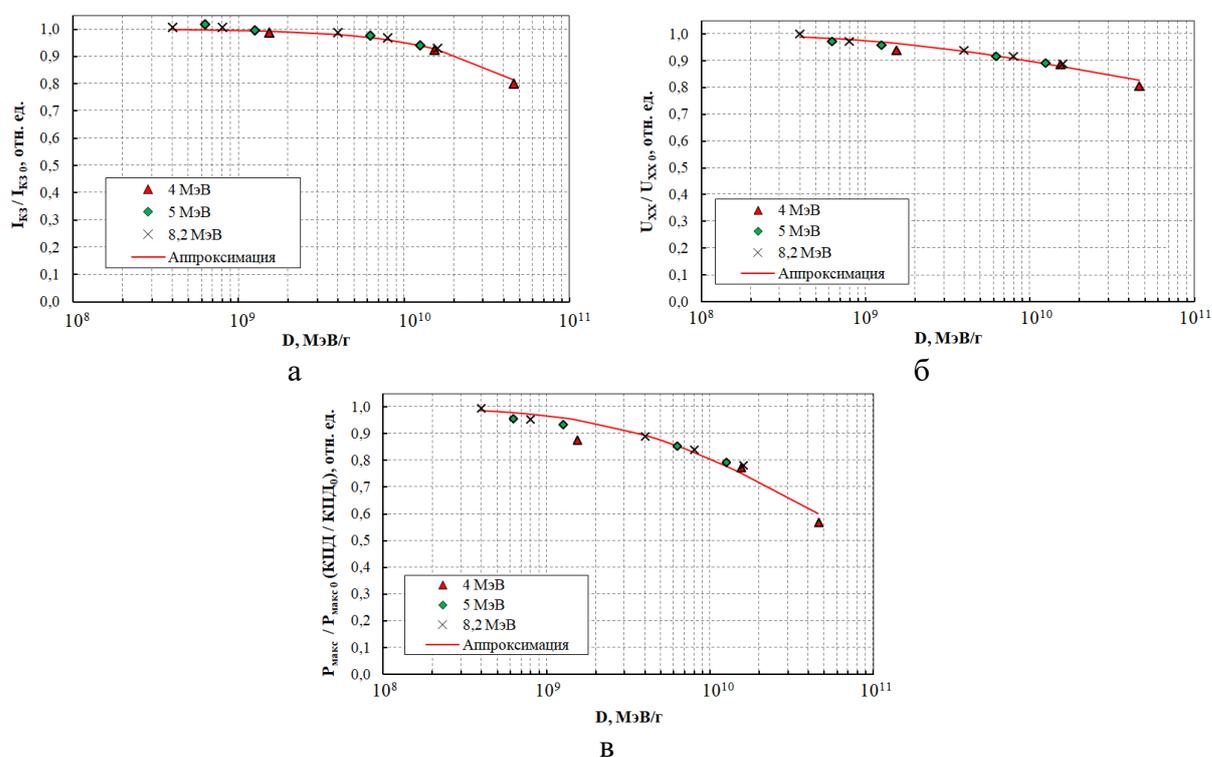


Рисунок 79 – График зависимости информативного параметра от дозы структурных повреждений для протонов: а – $I_{\text{кз}}$; б – $U_{\text{ХХ}}$; в – $P_{\text{макс}}$ (КПД)

Как показано на рисунке 80, в случае воздействия высокоэнергетических электронов простой переход от флюенсов к значениям $D_{\text{стр}}$ с использованием выражения (59) в большинстве случаев не приводит к описанному выше «слиянию» [22].

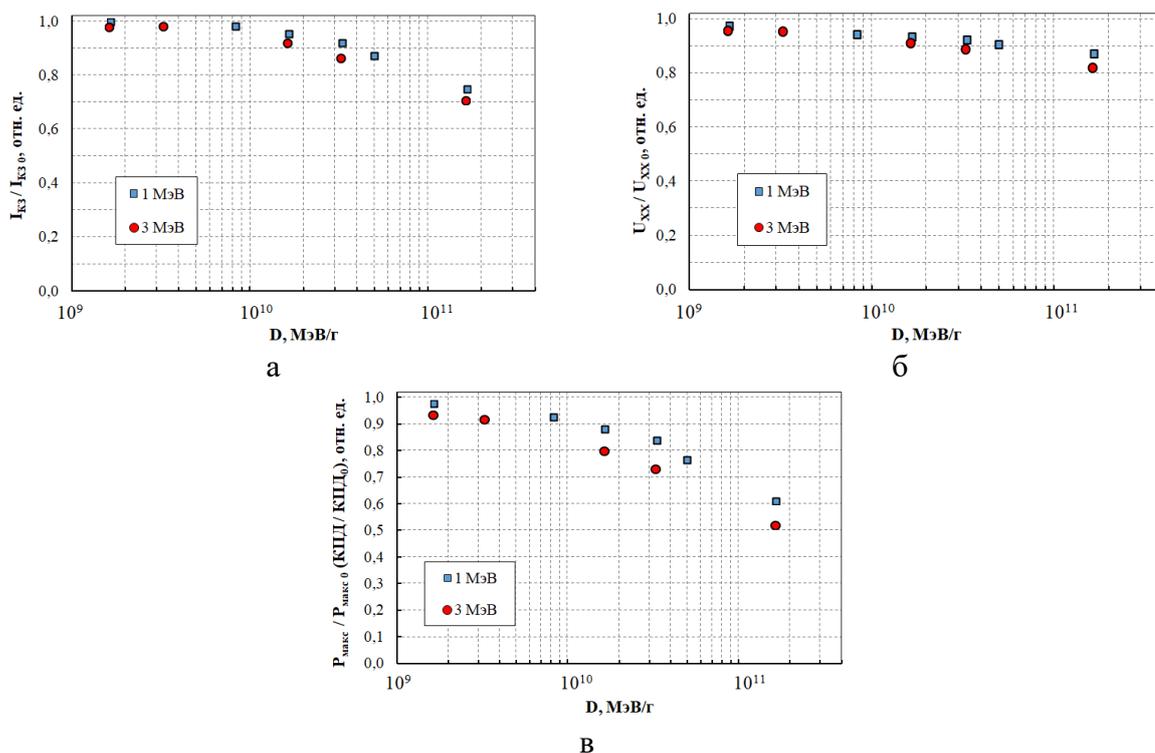


Рисунок 80 – График зависимости информативного параметра от дозы структурных повреждений для электронов: а – I_{K3} ; б – U_{XX} ; в – P_{\max} (КПД)

Полученные значения n_e из формулы (60) указаны в таблице 26.

Таблица 26 – Расчетные значения n_e и R_{ep}

| Электрический параметр | n_e | R_{ep} |
|------------------------|-------|----------|
| I_{K3} | 1,8 | 0,423 |
| U_{XX} | 1,9 | 1,414 |
| P_{\max} (КПД) | 1,9 | 1,658 |

В работе C и D_x определялись методом наименьших квадратов в среде *Mathcad*. Результаты расчетов представлены в таблице 27.

Таблица 27 – Коэффициенты аппроксимации зависимости информативных параметров от дозы облучения

| Тип частицы | C | | | $D_x, \text{МэВ/г}$ | | |
|-------------|----------|----------|------------------|----------------------|-------------------|-------------------|
| | I_{K3} | U_{XX} | P_{\max} (КПД) | I_{K3} | U_{XX} | P_{\max} (КПД) |
| Электроны | 0,289 | 0,080 | 0,289 | $2,96 \cdot 10^{10}$ | $2,06 \cdot 10^9$ | $7,10 \cdot 10^9$ |
| Протоны | 0,850 | 0,115 | 0,373 | $7,00 \cdot 10^{10}$ | $1,46 \cdot 10^9$ | $4,28 \cdot 10^9$ |

По условиям третьего этапа для расчета радиационной стойкости БС необходимо наличие спектрального распределения флюенса электронов и протонов ЕРПЗ, а также спектрального распределения флюенса потоков протонов, регистрируемых во время протонных солнечных вспышек на заданной орбите.

Для расчетов была выбрана ГСО, которая полностью расположена во внешнем ЕРПЗ. Интенсивность потоков ионизирующих частиц на орбите, в зависимости от солнечной активности, может за несколько часов изменяться в десятки и сотни раз. Прогноз проводится на основе усредненных радиационных нагрузок за год [163]. ГСО соответствует магнитной оболочке L , равной 6,6. На ГСО, лежащей ближе к периферии внешнего ЕРПЗ, преобладают потоки электронов, а поток протонов резко снижается при энергии частиц более 1 МэВ [158]. Следует отметить, что мягкая часть спектра протонов с $E_p < 5$ МэВ (рисунок 81б) не опасна для БС из-за полного поглощения в радиационно-стойком стекле, установленных на ФЭП с фронтальной и тыльной сторон [163]. Основной урон ФЭП могут нанести протоны солнечных вспышек.

Дифференциальные спектры потоков частиц были смоделированы в среде SPENVIS [11] и представлены на рисунке 81.

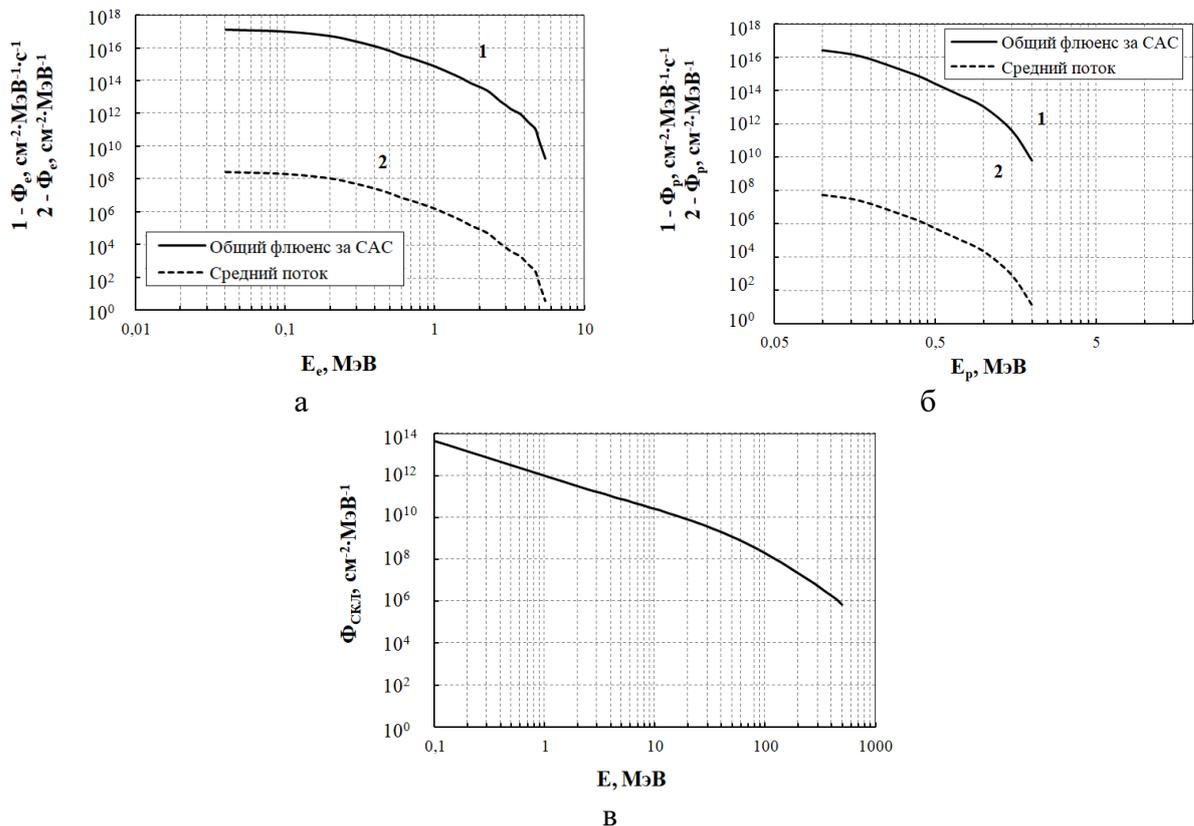


Рисунок 81 – Ожидаемые энергетические спектры частиц на ГСО в максимуме солнечной активности: а – электронов ЕРПЗ; б – протонов ЕРПЗ; в – протонов солнечных вспышек

Для заданного типа ФЭП в качестве фронтального радиационно-стойкого стекла применяется запатентованная композиция боросиликатного стекла с плотностью $(2,54 \pm 0,02) \text{ г/см}^3$. Однако точного состава данного радиационно-стойкого стекла определить достаточно трудоемко. Исходя из данных статьи [158], значения пробега частиц в радиационно-стойкое стекло различных производителей и SiO_2 схожи, поэтому

для упрощения расчета в основу были взяты данные SiO_2 . На рисунке 82 представлена энергетическая зависимость пробега ионизирующих частиц в SiO_2 . Моделирование проводилось с помощью *ESTAR*, *PSTAR* для электронов и протонов соответственно [141].

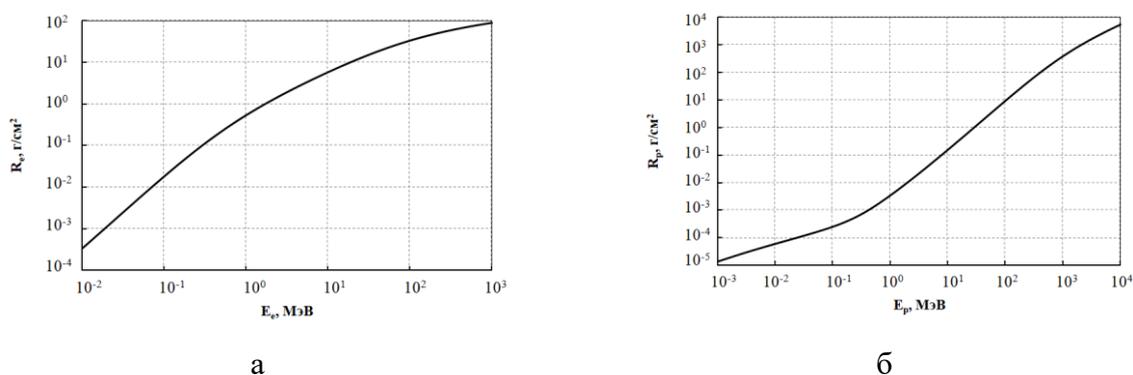


Рисунок 82 – Энергетическая зависимость пробега ионизирующих частиц в радиационно-стойком стекле: а – электроны; б – протоны

На рисунке 83 показаны результаты расчета спектров замедления для заданного спектра падающего излучения за САС.

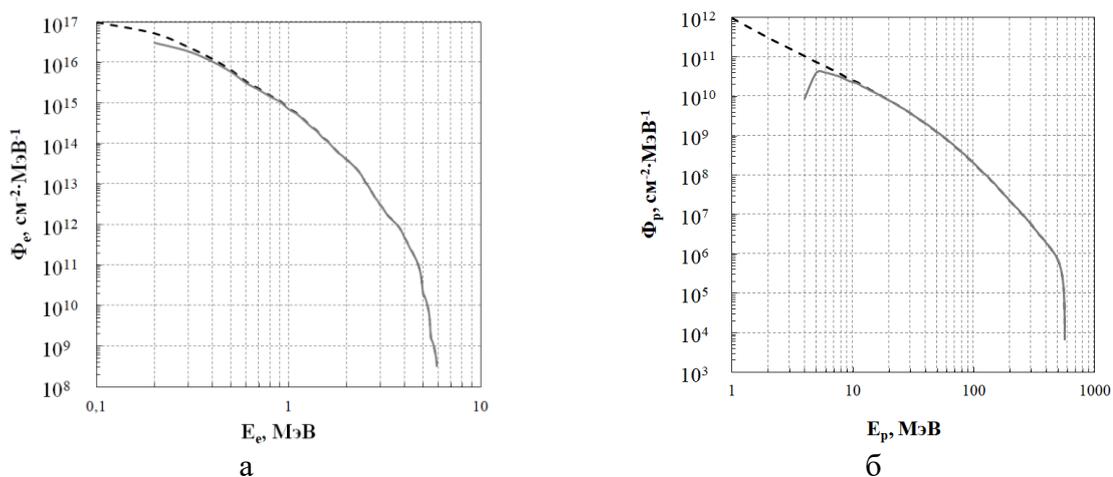


Рисунок 83 – Спектры частиц, прошедших через радиационно-стойкое стекло для заданной орбиты за САС (пунктирная линия – до радиационно-стойкого стекла; прямая линия – за радиационно-стойким стеклом 125 мкм): а – электроны; б – протоны

Для рассматриваемого типа орбиты и радиационно-стойкого стекла по формуле (66) рассчитывается $(D_{e\text{ экв}}(1\text{ МэВ}))_{\text{стр}}$ за САС, результаты представлены в таблице 28. Затем по формуле (58) для заданных условий рассчитывается аналогичная доза структурных повреждений, создаваемых протонами. Для рассматриваемого типа орбиты и САС $(D_p)_{\text{стр}}$ составило $3,11 \cdot 10^9$ МэВ/г. Суммарная доза структурных повреждений с учетом вклада протонов и электронов представлена в таблице 28 (рассчитывалась по формуле (67)).

Таблица 28 – Результаты расчетов на конец САС

| Информативный параметр | $(D_{e \text{ экв}}(1 \text{ МэВ}))_{\text{стр}}$, МэВ/г | Суммарная $D_{\text{стр}}$, МэВ/г | Деградация, % |
|-------------------------|---|------------------------------------|---------------|
| $I_{\text{КЗ}}$ | $8,89 \cdot 10^9$ | $2,41 \cdot 10^{10}$ | 10,93 |
| $U_{\text{ХХ}}$ | $9,13 \cdot 10^9$ | $9,56 \cdot 10^9$ | 10,10 |
| $P_{\text{макс}}$ (КПД) | $9,13 \cdot 10^9$ | $8,61 \cdot 10^9$ | 17,85 |

4.5.4 Оценка эффективности применения инъекционного отжига БС КА

Согласно проведенному литературному обзору, было определено, что для отжига ФЭП на основе *InGaAs* наиболее действенным является приложение прямого смещения к ФЭП при $J_{\text{инж}}$ величиной более 90 мА/см^2 . Напряжение смещения должно быть сопоставимо с величиной $U_{\text{ХХ}}$ ФЭП. Тогда с учетом изменения $J_{\text{КЗ}}$ на протяжении САС для повышения $J_{\text{инж}}$ до $(90 - 100) \text{ мА/см}^2$ 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 84.

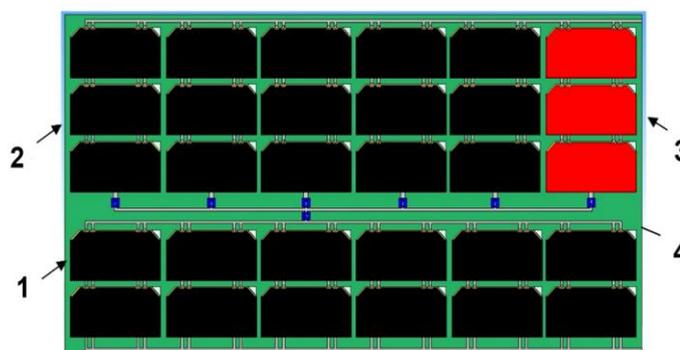


Рисунок 84 – ЭС с инъекционным отжигом: 1 – область для набора напряжения; 2 – область для набора $J_{\text{инж}}$; 3 – цепочка отжигаемых ФЭП; 4 – переключатели

При этом на рисунке 85а предложено два режима отжига – через каждый год САС и через каждые 5 лет САС. На рисунках 85б – 85г представлены деградационные кривые для $I_{\text{КЗ}}$, $U_{\text{ХХ}}$, $P_{\text{макс}}$ соответственно без использования инъекционного отжига и при рассматриваемых режимах отжига. Ввиду этого можно увидеть, что большую эффективность имеет применение отжига через каждый год. Рассматриваемые электрические параметры в конце САС представлены в таблице 29.

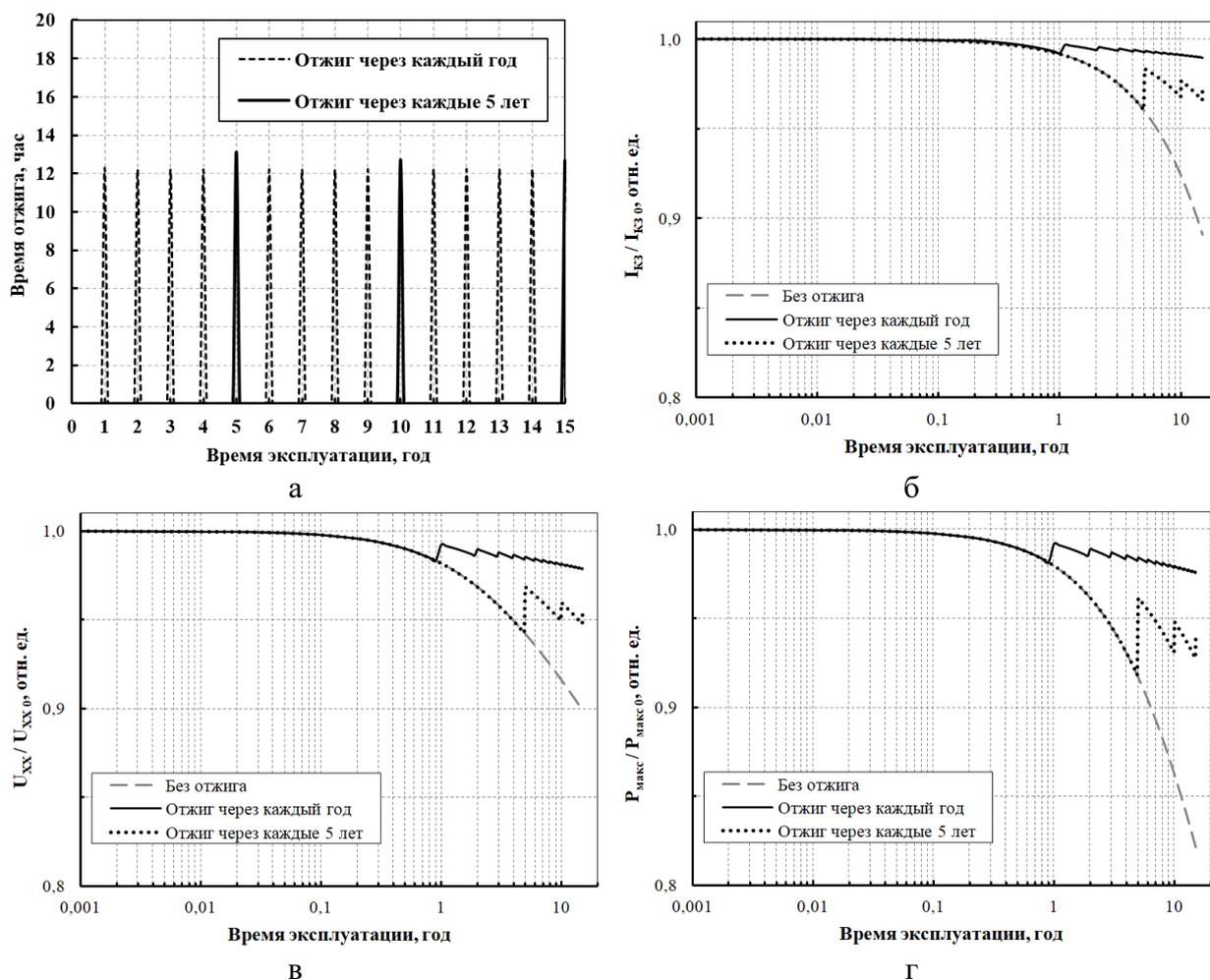


Рисунок 85 – Режим инжекционного отжига (а) и его влияние на электрические параметры БС: б – $I_{кз}$; в – $U_{хх}$; г – $P_{макс}$ (КПД)

Таблица 29 – Изменение электрических параметров в конце САС

| Режим работы | Деградация $I_{кз}$ в конце САС, % | Деградация $U_{хх}$ в конце САС, % | Деградация $P_{макс.}$ в конце САС, % |
|--|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| Без отжига | 10,93 | 10,10 | 17,85 |
| Инжекционный отжиг через каждый год | 0,99 | 2,07 | 2,37 |
| Инжекционный отжиг через каждые пять лет | 2,78 | 4,55 | 6,09 |

Для БС КА, эксплуатируемого в условиях ГСО, большую эффективность имеет применение отжига через каждый год при $J_{инж}$ 90 мА/см² в течение не более 12,3 часов. Это позволит получить выигрыш $P_{макс}$ в конце САС – 15,5 %. При этом инжекционный отжиг даже через каждый год будет стоить менее 8,5 % времени эксплуатации КА.

Исходя из проведенного расчета был получен эффект инжекционного отжига, который позволяет уменьшить последствия воздействия ионизирующего излучения на полупроводниковую структуру, а именно – снизить концентрацию центров безызлучательной рекомбинации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 *AlInBV/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⁻² 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⁻², 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⁻², была подтверждена.

Были изучены методы оценки степени восстановления многокаскадных ФЭП на основе полупроводниковых материалов *AlInBV/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⁻²) ФЭП в составе ЭС: $P_{\text{макс}}$ при $J_{\text{инж}}$ 14,9 мА/см² 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 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 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.

Публикации по теме диссертации

1 **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. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-3-2162> (журнал входит в перечень ВАК).

2 Наумова А. А., Лебедев А. А., Вагапова Н. Т., Каган М. Б., **Синева 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. DOI: 10.18698/2308-6033-2020-8-2003 (журнал входит в перечень ВАК).

3 **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 АПБВ/Ge // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2021. – № 2. – С. 16-22 (журнал входит в перечень ВАК).

4 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 (журнал входит в перечень ВАК).

5 **Sineva M. V.**, Voevodkin G.S., Vagarova N. T., Kagan M. B. Ways optimization of the electrical characteristics of multi-junction solar cells for space application // AIP Conference Proceedings, 2318, 040009, 2021. <https://doi.org/10.1063/5.0035982> (индексируется Scopus).

6 **Ryabtseva M. V.**, Petrov A. S., Voevodkin G. S., Tapero K. I., Vagarova N. T., Bankovsky M. V. Degradation of АПБВ/Ge triple junction solar cells irradiated by gamma-rays, electrons and neutrons // Microelectronics Reliability 125 (2021) 114350 - <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2021.114350> (индексируется Scopus).

8 Voevodkin G. S., **Ryabtseva M. V.**, Badurin I. V., Vagarova 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 АПБВ/Ge compounds // AIP Conference Proceedings, 2549 (2023) 050003. <https://doi.org/10.1063/5.0151008> (индексируется Scopus).

8 Воеводкин Г. С., Таперо К. И., Вагапова Н. Т., **Синева М. В.** Выбор оптимальных методов исследования электрических характеристик солнечных элементов на основе АЗВ5/Ge // 74-дни науки студентов НИТУ «МИСиС» / Международные, межвузовские и институтские научно-технические конференции. – М., 2019. – Т. 2. – С. 362.

9 Вагапова Н. Т., **Синева М. В.**, Воеводкин Г. С. Разработка универсальной методики исследования отдельных каскадов солнечных элементов космического назначения // Всероссийский молодежный конкурс научно-технических работ «Орбита молодежи»: Материалы. – СПб: БГТУ «Военмех», Инфо-Да, 2019. – 158 с. (Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ», № 60). ISBN 978-5-94652-642-5 – Стр. 283 (3 стр.).

10 **Синева М. В.**, Воеводкин Г. С., Вагапова Н. Т. Универсальный метод оценки электрических параметров многокаскадных солнечных элементов // РЕШЕТНЕВСКИЕ ЧТЕНИЯ. Контроль и испытания ракетно-космической техники. Материалы XXIII Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева : в 2-х ч. Под редакцией Ю. Ю. Логинова. – Красноярск : Издательство ФГБОУ ВО "Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнева", 2019. – С. 393–394.

11 **Синева М. В.**, Воеводкин Г. С., Вагапова Н. Т. Оценка электрических параметров многокаскадных солнечных элементов на базе спектральных методов исследования (Electric parameters of multijunction solar cells estimation using the spectral research methods) // XLIV Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства (Москва, 28–31 января 2020 г.) : сборник тезисов : в 2 т. / Российская академия наук, Государственная корпорация по космической деятельности «Роскосмос», Комиссия РАН по разработке научного наследия пионеров освоения космического пространства, ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)». — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020. ISBN 978-5-7038-5342-9. – Т. 1. — 795, [1] с. : ил. – С. 243-245.

12 Воеводкин Г. С., **Синева М. В.**, Вагапова Н. Т. Способ восстановления характеристик солнечных элементов космического назначения после срока активного существования (Method of restoring electrical characteristics of solar cells for space purpose after the end of life) // XLIV Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства (Москва, 28–31 января 2020 г.) : сборник тезисов : в 2 т. / Российская академия наук, Государственная корпорация по космической деятельности

«Роскосмос», Комиссия РАН по разработке научного наследия пионеров освоения космического пространства, ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)». — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020. ISBN 978-5-7038-5342-9. — Т. 1. — 795, [1] с. : ил. — С. 245–247.

13 **Синева М. В.**, Воеводкин Г. С., Вагапова Н. Т., Петров А. С., Баньковский М. В. Оценка степени деградации электрических и спектральных характеристик фотоэлектрических преобразователей на основе АПВВ/Ge космического назначения при воздействии электронного излучения // Научно-технический сборник 23-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиационная стойкость электронных систем» – «Стойкость-2020» - 2020. – С. 34–35.

14 **Рябцева М. В.** Разработка системы повышения электрических характеристик солнечных элементов космического назначения в процессе их эксплуатации (The development of a system for increasing the electrical characteristics of space solar cells purposes during in-service life) // Материалы VI Всероссийской молодежной научно-практической конференции: «Орбита молодежи» и перспектива развития российской космонавтики : материалы VI Всерос. молодежной науч.-практ. конф. – Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2020. – С. 79–82.

15 Бадурин И. В., **Рябцева М. В.**, Воеводкин Г. С., Логинова Е. С., Вагапова Н. Т., Лебедев А. А. Разработка методики исследования деградации многокаскадных фотоэлектрических преобразователей космического назначения // Сборник тезисов XLV АКАДЕМИЧЕСКИЕ ЧТЕНИЯ ПО КОСМОНАВТИКЕ посвященные памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства (Москва, 30 марта - 2 апреля 2021 г.) : сборник тезисов : в 4 т. / Российская академия наук, Государственная корпорация по космической деятельности «Роскосмос», Комиссия РАН по разработке научного наследия пионеров освоения космического пространства, ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)». — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. — Т. 1. — 493, [3] с. : ил. – С. 318–320.

16 Вацуру А. П., Лебедев А. А., **Рябцева М. В.**, Чуянова Е. С. Исследование оптических характеристик слоев антиотражающего покрытия каскадных фотоэлектрических преобразователей космического назначения // Сборник тезисов XLV АКАДЕМИЧЕСКИЕ ЧТЕНИЯ ПО КОСМОНАВТИКЕ посвященные памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства (Москва, 30 марта - 2 апреля 2021 г.) : сборник тезисов : в 4 т. / Российская академия наук, Государственная корпорация по космической деятельности

«Роскосмос», Комиссия РАН по разработке научного наследия пионеров освоения космического пространства, ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)». — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. — Т. 1. — 493, [3] с. : ил. — С. 326–328.

17 Воеводкин Г. С., **Рябцева М. В.**, Бадурин И. В., Вагапова Н. Т. Анализ воздействия электронов на фотоэлектрические параметры каскадов фотопреобразователей концентрированного солнечного излучения на основе АШВВ/Ge // Сборник тезисов XLV АКАДЕМИЧЕСКИЕ ЧТЕНИЯ ПО КОСМОНАВТИКЕ посвященные памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства (Москва, 30 марта - 2 апреля 2021 г.) : сборник тезисов : в 4 т. / Российская академия наук, Государственная корпорация по космической деятельности «Роскосмос», Комиссия РАН по разработке научного наследия пионеров освоения космического пространства, ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)». — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. — Т. 1. — 493, [3] с. : ил. — С. 330–332.

18 **Рябцева М. В.**, Наумова А. А., Лебедев А. А., Болотин А. М., Вагапова Н. Т. Анализ конструкций перспективных солнечных батарей космических аппаратов // Сборник тезисов XLV АКАДЕМИЧЕСКИЕ ЧТЕНИЯ ПО КОСМОНАВТИКЕ посвященные памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства (Москва, 30 марта - 2 апреля 2021 г.) : сборник тезисов : в 4 т. / Российская академия наук, Государственная корпорация по космической деятельности «Роскосмос», Комиссия РАН по разработке научного наследия пионеров освоения космического пространства, ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)». — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. — Т. 1. — 493, [3] с. : ил. — С. 334–336.

19 Бадурин И. В. **Рябцева М. В.** Вагапова Н. Т. Разработка высокоэффективного фотоэлектрического преобразователя на основе кремния // Тезисы докладов XXII Научно-технической конференции молодых ученых и специалистов, посвященной 60-летию полета Ю.А. Гагарина, 75-летию ракетно-космической отрасли и основания ПАО «РКК «Энергия». – 2021. – С. 295–297.

20 **Рябцева М. В.**, Бадурин И. В., Вагапова Н. Т. Солнечная батарея космического назначения с увеличенным сроком активного существования // Тезисы докладов XXII Научно-технической конференции молодых ученых и специалистов, посвященной 60-летию полета Ю.А. Гагарина, 75-летию ракетно-космической отрасли и основания ПАО «РКК «Энергия». – 2021. – С. 292–294.

21 Чуянова Е. С., **Рябцева М. В.**, Генали М. А. Моделирование вольт-амперных характеристик фотоэлектрических преобразователей космического назначения с различными антиотражающими покрытиями // Тезисы докладов XXII Научно-технической конференции молодых ученых и специалистов, посвященной 60-летию полета Ю.А. Гагарина, 75-летию ракетно-космической отрасли и основания ПАО «РКК «Энергия». – 2021. – С. 298–300.

22 Бадурин И.В. **Рябцева М.В.**, Вагапова Н.Т. Создание автоматизированной системы обработки результатов квалификационных испытаний солнечных батарей космического назначения на радиационную стойкость // Новые материалы и технологии в ракетно-космической, авиационной и других высокотехнологичных отраслях промышленности. Сборник материалов 17-й молодежной конференции – ООО «12 апреля». 2021. – С. 6–13.

23 **Рябцева М. В.**, Бадурин И. В., Вагапова Н. Т. Разработка системы повышения ресурса солнечной батареи космического назначения // Новые материалы и технологии в ракетно-космической, авиационной и других высокотехнологичных отраслях промышленности. Сборник материалов 17-й молодежной конференции – ООО «12 апреля». 2021. – С. 54–64.

24 Солнечная батарея космического назначения с регенерацией эксплуатационных характеристик / **Рябцева М.В.**, Бадурин И.В., Вагапова Н.Т. и др. // Патент РФ: RU 219 254 U1. – 2023.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Обзор современных фотоэлектрических преобразователей космического назначения на основе соединений АПВВ / Е. В. Слыщенко, А. А. Наумова, А. А. Лебедев и др. // Сибирский журнал науки и технологий. – 2018. – Т. 19. – № 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 Accelerated annealing of gallium arsenide solar cells / R. C. Knechtli, R. Y. Loo, G. S. Kamath // Patent USA: 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_{0.51}In_{0.49}P/In_{0.01}Ga_{0.99}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 «Квант»: энергия победы – М: Издательство «МАКД». 2009.

13 Study of anti-reflective coatings Ta₂O₅ / SiO₂ for improving the efficiency of modern solar cells for space applications / M. A. Genali, S. K. Sharov, A. A. Lebedev et al. // *Siberian Journal of Science and Technology*. – 2018. – Vol. 19. – No. 1. – P. 59–65.

14 Degradation of AlInBV/Ge triple junction solar cells irradiated by gamma-rays, electrons and neutrons / M. V. Ryabtseva, A. S. Petrov, G. S. Voevodkin et al. // *Microelectronics Reliability*. – 2021. – No. 125. – P. 114350.

15 Pierret R. *Advanced Semiconductor Fundamentals* // Ann Arbor: Adison-Wesley Publishing Company. – 1987. – 240 p.

16 Performance Analysis of Ultra-Thin Silicon Based Tunnel Junctions for Tandem Solar Cell Applications / H. Heidarzadeh, A. Rostami, M. Dolatyari et al. // *International Congress on Energy Efficiency and Energy Related Materials (ENEFM2013)*. – 2014. – P. 125–130.

17 Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей: Пер. с англ. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - 360 с., ил.

18 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.

19 Новиков Л. С. Радиационные воздействия на материалы космических аппаратов: учебное пособие / Л. С. Новиков. – М. : Университетская книга, 2010. – 192 с.

20 Jordan D. C., Kurtz S. R. Photovoltaic degradation rates – An analytical review // *Prog. Photovolt., Res. Appl.* – 2013. – Vol. 21. – No. 1. – P. 12–29.

21 Development and testing of coatings for orbital space radiation environments / S. F. Pellicori, C. L. Martinez, P. Hausgen et al. // *Applied Optics*. – 2014. – Vol. 53. – No. 4. – P. 339–350.

22 Таперо К. И. Развитие методов расчетно-экспериментального моделирования радиационных эффектов при проектировании и испытаниях радиационно-стойких изделий электронной техники космического применения : Дис ... д-ра техн. наук: 05.27.01. – Лыткарино, 2017. – 269 с.

23 Vasić-Milovanović A. Increased temperature and radiation damage influence on solar cells characteristics // *FME Transactions*. – 2013. – Vol. 41. – No. 1. – P. 77–82.

24 Dimas P., Monterey Jr. Analysis of radiation damaged and annealed gallium arsenide and indium phosphide solar cells using deep level transient spectroscopy techniques // *Naval Postgraduate School*. – 1991.

25 Li Sh. S., Loo R. Y. Deep-level defects and numerical simulation of radiation damage in GaAs solar cells // *Solar Cells*. – 1991. – V. 31. – P. 349–377.

26 Charge carrier removal rates in n-type silicon and silicon carbide subjected to electron- and proton irradiation / V. V. Kozlovski, V. V. Emtsev, A. M. Ivanov et al. // *Physica B: Condensed Matter*. – 2009. – Vol. 404. – No. 23–24. – P. 4752–4754.

27 Degradation characteristics of electron and proton irradiated InGaAsP/InGaAs dual junction solar cell / X. Zhao, A. Aierken, M. Heini et al. // *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. – 2020. – Vol. 206. – No. 110339.

28 Karazhanov S.Z. Mechanism for the anomalous degradation of silicon space solar cells // *Appl. Phys. Lett.* – 2000. – Vol. 76. – No. 19. – P. 2689–2691.

29 Space degradation of 3J solar cells: I—Proton irradiation / S. Park, J.C. Bourgoin, H. Sim et al. // *Prog. Photovolt., Res. Appl.* – 2018. – Vol. 26. – No. 10. – P. 778–788.

30 Comparison of the effects of electron and proton irradiation on n⁺–p–p⁺ silicon diodes / S. J. Taylor, M. Yamaguchi, T. Yamaguchi et al. // *J. Appl. Phys.* – 1998. – Vol. 83. – No. 9. – P. 4620–4627.

31 Degradation modeling of InGaP/GaAs/Ge triple-junction solar cells irradiated with various-energy protons / S.– I. Sato, H. Miyamoto, M. Imaizumi et al. // *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 17th International Photovoltaic Science and Engineering Conference. – 2009. – Vol. 93. – No. 6. – P. 768–773.

32 Mechanism for the anomalous degradation of Si solar cells induced by high fluence 1 MeV electron irradiation / M. Yamaguchi, S.J. Taylor, S. Matsuda et al. // *Appl. Phys. Lett.* – 1996. – Vol. 68. – Vol. 22. – P. 3141–3143.

33 Electron radiation–induced degradation of GaAs solar cells with different architectures / N. Gruginskie, F. Cappelluti, G.J. Bauhuis et al. // *Prog. Photovolt., Res. Appl.* – 2020. – Vol. 28. No. 4. – P. 266–278.

34 Mechanism for the anomalous degradation of Si solar cells induced by high- energy proton irradiation / M. Imaizumi, M. Yamaguchi, S. Taylor et al. // *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. – 1998. – Vol. 50. No. 1. – P. 339–344.

35 Modeling of degradation behavior of InGaP/GaAs/Ge triple-junction space solar cell exposed to charged particles / S.-I. Sato, T. Ohshima, M. Imaizumi // *J. Appl. Phys.* – 2009. – Vol. 105. – No. 4. – P. 044504.

36 Effects of proton irradiation on upright metamorphic GaInP/GaInAs/Ge triple junction solar cells / A. Aierken, L. Fang, M. Heini et al. // *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. – 2018. – No. 185 – P. 36–44.

37 Voltage - dependent photocurrent in irradiated GaAs solar cells / M. Salzberger, M. Rutzinger, C. Nömayr et al. // *Prog. Photovolt., Res. Appl.* – 2018. – Vol. 26. – No. 5. – P. 317–323.

38 Degradation of up-grown metamorphic InGaP/InGaAs/Ge solar cells by low-energy proton irradiation / G. Hongliang, S. Linfeng, S. Qiang et al. // Sol. Energy Mater. Sol. Cells. - 2019. – Vol. 191. – P. 399–405.

39 Electroluminescence analysis of V_{OC} degradation of individual subcell in GaInP/GaAs/Ge space solar cells irradiated by 1.0 MeV electrons / G. Yan, J.-l. Wang, J. Liu et al. // J. Lumin. – 2020. – Vol. 219. – No. 116905.

40 A detailed model to improve the radiation-resistance of Si space solar cells / M. Yamaguchi, A. Khan, S.J. Taylor et al. // IEEE Trans. Electron Devices. – 1999. – Vol. 46. – No.10. – P. 2133–2138.

41 Light trapping structures for radiation hardness enhancement of space solar cells / N.Z. Vagidov, K.H. Montgomery, G.K. Bradshaw et al. // Sol. Energy Mater. Sol. Cells. – 2018. – No. 182. – P. 136–141.

42 Zazoui M., Bourgoin J.C. Space degradation of multijunction solar cells: An electroluminescence study // Appl. Phys. Lett. – 2002. – Vol. 80. – No. 23. – P. 4455–4457.

43 Investigation of radiation-induced degradations in four-junction solar cell by experiment and simulation / C. Peng, F. Ding, Z. Lei et al. // Microelectron. Reliab. – 2020. – No. 108. – P. 113646.

44 Effect of omnidirectional proton irradiation on shielded solar cells / S.R. Messenger, E.A. Burke, R.J. Walters et al. // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 2006. – Vol. 53. – No 6. – P. 3771–3778.

45 Contribution of low-energy protons to the degradation of shielded GaAs solar cells in space / G.P. Summers, S.R. Messenger, E.A. Burke et al. // Prog. Photovolt., Res. Appl. – 1997. – Vol. 5. – No. 6. – P. 407–413.

46 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.

47 Application of InGaP/GaAs/InGaAs triple junction solar cells to space use and concentrator photovoltaic / T. Takamoto, H. Washio, H. Juso // 2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC). – 2014. – P. 0001–0005.

48 Thin GaAs solar cells for high irradiation levels / S.I. Maximenko, M.P. Lumb, J. Moore et al. // 2019 IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). – 2019. – P. 2814–2817.

49 Improving radiation resistance of GaInP/GaInAs/Ge triple-junction solar cells using GaInP back-surface field in the middle subcell / H. Gao, R. Yang, Y. Zhang // Materials. – 2020. Vol. 13. – No. 8.

50 Effect of proton irradiation fluence on the performance of the $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ p+n solar cell / W. Laiadi, A. Meftah, C. Laiadi // *Algerian J. Environ. Sci. Technol.* – 2021. Vol. 7. – No. 3.

51 Improvement of radiation resistance of multijunction $\text{GaInP}/\text{Ga}(\text{In})\text{As}/\text{Ge}$ solar cells with application of Bragg reflectors / V.M. Lantratov, V.M. Emelyanov, N.A. Kalyuzhnyy et al. // *5th Forum on New Materials Part C: Advances in Science and Technology.* – 2011. – Vol. 74. – P. 225–230.

52 Radiation effects in thinned GaAs photovoltaics incorporating DBRs for improved radiation tolerance of multijunctions / S. J. Polly, G. T. Nelson, J. R. D’Rozario et al. // *2019 IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC).* – 2019. – P. 2818–2821.

53 Radiation hardening of dual junction solar cells / R. Tatavarti, K. Forghani, R. Reddy et al. // *2020 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC).* – 2020. P. 2258–2261.

54 Design of an intermediate Bragg reflector within triple-junction solar cells for spectrum splitting applications / Y. Jiang, M. J. Keevers, Ph. Pearce et al. // *Solar Energy Materials and Solar Cells.* – 2019. – T. 193. – P. 259–269.

55 Design of semiconductor-based back reflectors for high Voc monolithic multijunction solar cells / I. Garcí, J. Geisz, M. Steiner et al. // *Proceedings of the 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference.* – 2012.

56 Vertical-cavity surface-emitting lasers / C. Wilmsen, H. Temkin, L. A. Coldren // *Cambridge Studies in Modern Optics.* – 1999. – P. 474.

57 Bragg reflectors as a light trap in multijunction solar cells / S. A. Levina, E. D. Filimonov, A. V. Malevskaya et al. // *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* 1199. – 2019. – No. 012033. – P. 1–4.

58 Overcoming of Luminescent Coupling Effect in Experimental Search for True Quantum Efficiency Value in MJ SCs / M. Shvarts, V. Emelyanov, V. Evstropov et al. // *AIP Conf. Proc.* – 2016. – Vol. 1766. – No. 06005. – P. 1–6.

59 Space solar cells – 3G30 and next generation radiation hard products / Guter W., F. Dunzer, L. Ebel et al. // *E3S Web of Conferences.* – 2017. – Vol. 16. – No. 03005. – P. 1–6.

60 Modeling of $\text{InGaP}/\text{InGaAs}-\text{GaAsP}/\text{Ge}$ multiple quantum well solar cell to improve efficiency for space applications / S. Kotamraju, M. Sukeerthi, S. E. Puthanveetil // *Solar Energy.* – 2019. – Vol. 186. – P. 328–334.

61 Fardi H. Design and Simulation of Multiquantum-Well $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ Single Junction Solar Cell with Back Surface Reflector // *International Scholarly Research Network. ISRN Renewable Energy.* – 2012. – P. 1–5.

- 62 Physics of Quantum Well Solar Cells / N. J. Ekins-Daukes, J. Adams, I. M. Ballard et al. // Proc. of SPIE – 2014. – Vol. 7211. – P. 1–11.
- 63 Quantum well solar cells / K. W. J. Barnham, I. Ballard, J. P. Connolly et al. // Physica. – 2002. – Vol. 14. – P. 27–36.
- 64 Quantum well solar cells / K. Barnham, I. Ballard, J. Barnes et al. // Appl. Surf. Sci. – 1997. – Vol. 113/114. – P. 722–733.
- 65 Strain-balanced GaAsP/InGaAs quantum well solar cells / N. J. Ekins-Daukes, K. W. J. Barnham, J. P. Connolly et al. // Appl. Phys. Lett. – 1999. – Vol. 75. – P. 4195–4197.
- 66 Recent Progress of Spectrolab High-Efficiency Space Solar Cells / D. C. Law, J. C. Boisvert, E. M. Rehder et al. // Proc. of SPIE. – 2013. – No. 8876. – P. 1–8.
- 67 On the optimization of InGaP/GaAs/InGaAs triple-junction solar cell / O. Saif, M. Abouelatta, A. Shaker et al. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 446. – No. 012010. – P. 1–6.
- 68 Four-junction wafer-bonded concentrator solar cells / F. Dimroth, T. N. D. Tibbits, M. Niemeyer et al. // IEEE J. Photovoltaics. – 2016. – Vol. 6. – P. 343–349.
- 69 35.8% Space and 38.8% terrestrial 5J direct bonded cells / P. T. Chiu, D. C. Law., R. L. Woo et al. // IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC). – 2014. – P. 0011–0013.
- 70 Azur Space Solar Power GmbH.: сайт. – URL: <http://www.azurspace.com/index.php/en/> (дата обращения: 20.07.2020). – Текст: электронный.
- 71 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.
- 72 Degradation analysis of 1 MeV electron and 3 MeV proton irradiated InGaAs single junction solar cell / X. B. Shen, A. Aierken, M. Heini et al. // AIP Advances. – 2019. – Vol. 9. – No. 075205. – P. 1–6.
- 73 SolAero Technologies Corp.: сайт. – URL: <https://solaerotech.com/> (дата обращения: 10.01.2020). – Текст: электронный.
- 74 Spectrolab, Inc.: сайт. – URL: <https://www.spectrolab.com/> (дата обращения: 10.01.2020). – Текст: электронный.
- 75 CESI SpA: сайт. – URL: <https://www.cesi.it/space-solar-cells/> (дата обращения: 10.01.2020). – Текст: электронный.
- 76 31% European InGaP/GaAs/InGaAs solar cells for space application / R. Campesato, A. Tukiainen, A. Aho et al. // E3S Web of Conferences. – 2017. – Vol. 16. – No. 03003. – P. 1–5.

77 San'an Optoelectronics Co. Ltd.: сайт. – URL: <http://www.sanan-e.com/en/> (дата обращения: 10.01.2020). – Текст: электронный.

78 Sharp Global Corporation: сайт. – URL: <https://global.sharp/solar/en/> (дата обращения: 10.01.2020). – Текст: электронный.

79 Qualification test results of IMM triple-junction solar cells, space solar sheets, and lightweight & compact solar paddle / M. Imaizumi, T. Takamoto, N. Kaneko et al. // E3S Web of Conferences. – 2016. – Vol. 16. – No. 03012. – P. 1–6.

80 ПАО «Сатурн»: сайт. – URL: <http://saturn-kuban.ru/> (дата обращения: 10.01.2020). – Текст: электронный.

81 Радиационные дефекты в твердом теле под действием потоков ускоренных заряженных частиц (часть 1) [Электронный ресурс]/- Режим доступа: <https://docplayer.ru>, свободный (дата обращения: 03.06.2019).

82 Calculating free energies of point defects from ab initio / X. Zhang, G. Grabowski, T. Nickel et al. // Computational Materials Science. – 2018. – Vol. 148. – P. 1–35.

83 Громов Д.В., Краснюк А.А. Материаловедение для микро - и нано- электроники: Учебное пособие. М.: МИФИ, 2008. – 156 с.

84 Effect of thermal annealing on electrical and photoelectrical properties of n-InSb / S. V. Stariy, A. V. Sukach, V. V. Tetyorkin et al. // Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics. – 2017. – Vol. 20. – No. 1. – P. 105–109.

85 An annealing study of electron irradiation induced defects in GaAs / D. Pons, A. Mircea, J. Bourgoin // Journal of Applied Physics. – 1980. – Vol. 51. – No. 8. – P. 4150–4157.

86 Recovery of high energy proton defects in GaInP₂/GaAs/Ge triple junction solar cells by isothermal annealing / Ch. Brandt, W. Rehman, C. Zimmermann et. al. // IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC) – 2015.

87 The Influence of High Temperatures on Radiation Damage of GaInP₂/GaAs/Ge Triple Junction Cells / Ch. Brandt, C. Baur, A. Caon et. al. // IEEE Journal of photovoltaics. – 2013. – Vol. 3. – No. 2. – P. 904–908.

88 High-radiation-resistant InGaP, InGaAsP, and InGaAs solar cells for multijunction solar cells / N. Dharmarasu, M. Yamaguchi, A. Khan // Appl. Phys. Lett. - 2001. – Vol. 79. – No. 15. – P. 2399–2401.

89 Superior radiation-resistant properties of InGaP/GaAs tandem solar cells / M. Yamaguchi, T. Okuda, S. J. Taylor et. al. // Appl. Phys. Lett. – 1997. – Vol. 70. – No. 12 – P. 1566–1568.

90 Фотоэлектрическая энергоустановка / Л. Б. Крейнин, В. С. Макаров, Л. Л. Силин и др. // Патент СССР: SU277967A1. – 1970 г.

91 NIEL DOSE and DLTS Analyses on Triple and Single Junction solar cells irradiated with electrons and Protons / R. Campesato, C. Baur, M. Casale et al. // IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion: proceedings. – 2018. – P. 3768–3772.

92 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.

93 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.

94 Радиационная стерилизация изделий различного назначения: сайт. URL: <http://niipriborov.ru/mainactivity/radiacionnaya-sterilizaciya-izdeliy/> (дата обращения: 17.03.2021). – Текст: электронный.

95 Комплекс радиационной обработки на базе ускорителя электронов «ЭЛЕКТРОНИКА У-003» / М. Ю. Ташметов, Н. Б. Исмаатов, Р. П. Саидов и др. // ВАНТ. – 2017. – № 5 (111). – С. 91–97.

96 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.

97 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.

98 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.

99 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.

100 Damage correlations in semiconductors exposed to gamma, electron and proton radiations / G.P. Summers, E.A. Burke, P. Shapiro et al. // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1993. – Vol. 40. – No. 6. – P. 1372–1379.

101 Radiation-resistance analysis of GaAs and InGaP sub cells for InGaP/GaAs/Ge 3-junction space solar cells / M. Yamaguchi, T. Sasaki, H.-S. Lee et al. // 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference. – 2008.

102 Модель космического пространства [Текст] / Под ред. акад. С. Н. Вернова ; М-во высш. и сред. спец. образ. СССР. Моск. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова. Науч.-исслед. ин-т ядерной физики. - Москва : Изд-во МГУ, 1983. – Т. 2 – С. 772

103 Skachkov A.F. Optimization of the structure of a GaInP/GaAs/Ge triple-junction solar cell with an $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}/\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ integrated bragg reflector // Optoelectron. Instrum. Data Process. – 2014. – Т. 50. – No. 4. – P. 423–427.

104 Ways optimization of the electrical characteristics of multi-junction solar cells for space application. / M. V. Sineva, G. S. Voevodkin, N. T. Vagapova et al. // XLIV ACADEMIC SPACE CONFERENCE: Dedicated to the Memory of Academician S.P. Korolev and Other Outstanding Russian Scientists – Pioneers of Space Exploration. AIP Conference Proceedings. – 2021. – Vol. 2318. – No. 040009. – P. 1–5.

105 InGaP/GaAs-based Multijunction Solar Cells / T. Takamoto, M. Kaneiwa, M. Imaizumi et al.// Prog. Photovolt: Res. Appl. – 2005. – Vol. 13. – P. 495–511.

106 A comparative study of low energy radiation response of AlAs, GaAs and GaAs/AlAs superlattice and the damage effects on their electronic structures / M. Jiang, H. Y. Xiao, S. M. Peng et al. // Scientific Reports. – 2018. – Vol. 8. – No. 1. – P. 1–15.

107 Методы улучшения структурного совершенства полуизолирующего GaAs диаметром 100 мм / Оксанич А.П., Когдась М.Г., Андросюк М.С. // РИ. – 2014. – № 4. – С. 11–14.

108 Park S. Irradiation effect in triple junction solar cells for spatial applications. Atomic Physics. Université Paris Saclay (COMUE). – NNT : 2018SACLX039. – 2018.

109 Generation of the EL2 defect in n-GaAs irradiated by high energy protons / P. N. Brunkov, V. S. Kalinovsky, V. G. Nikitin et al.// Semicond. Sci. Technol. – 1999. – Vol. 7. – No. 10. – P. 1237–1240.

110 Prediction of the performance degradation of GaAs solar cells by electron irradiation / Af. Meftah, N. Sengouga, Am. Meftah // Revue des Energies Renouvelables. – 2008. – Vol. 11. – No. 4. – P. 603–610.

111 Подложка панели солнечной батареи и способ ее изготовления / В. И. Кузоро, В. В. Миронович, Н. А. Шамова и др. // Патент РФ: RU 2449226 C2. – 2012.

112 Дидык, П. И. Высокопрочные шунтирующий и блокирующий диоды солнечных батарей космических аппаратов : дис. ... канд. техн. наук : 05.27.01. – М., 2014. –124 с.

113 Способ изготовления шунтирующего диода для солнечных батарей космических аппаратов / А. А. Басовский, А. А. Жуков, П. И. Дидык и др. // Патент РФ: RU 2479888 C1. – 2013.

114 Электрические характеристики планарных диодов в широком диапазоне температур / П. И. Дидык, А. А. Басовский, А. А. Жуков и др.// Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2016. – Вып. 3. – С. 42–48.

- 115 Simulated Annealing algorithm for photovoltaic parameters identification / K. M. El-Naggar, M. R. Alrashidi, M. F. AlHajri et al. // *Solar Energy*. – 2012. – No. 86. – P. 266–274.
- 116 European roadmap of multijunction solar cells and qualification status / G. F. X. Strobl, T. Bergunde, W. Köstler et al. // *4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*. – 2006. – Vol. 2. – P. 1793–1796.
- 117 Evolution of fully European triple GaAs solar cell / G. F. X. Strobl, R. Dietrich, J. Hilgarth et al. // *Proc. 'Seventh European Space Power Conference'*. – 2005.
- 118 Kukulka J. R., Santa C. Solar cell with integrated bypass diode and method // EP 0768720 B1. – 2004.
- 119 Способ изготовления фотопреобразователя / Н. Т. Вагапова, А. А. Наумова, А. А. Лебедев и др. // Патент РФ: RU 2730050 C1. – 2020.
- 120 Solar cell having an integral monolithically grown bypass diode / F. Ho, M. Y. Yeh, Ch.-L. Chu et al. // Патент США: US 2005/0183765 A1. – 2005.
- 121 Гибкие солнечные модули на основе аморфного гидрогенизированного кремния / Г. М. Аблаев, А. С. Абрамов, И. А. Няпшаев и др. // *Физика и техника полупроводников*. – 2015. – Т. 49. – Вып. 5. – С. 693–696.
- 122 Легкий гибкий солнечный элемент на основе гетероэпитаксиальной структуры InGaP/GaAs / М. А. Путято, Н. А. Валишева, М. О. Петрушков и др. // *Журнал технической физики*. – 2019. – Т. 89. – Вып. 7. – С. 1071–1078.
- 123 Солнечная батарея / В. А. Битков, В. А. Хвостиков, Ю. Н. Полянсков // Патент РФ: RU 2293398 C1. – 2007.
- 124 Модули и батареи [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://www.pvcdrom.pveducation.org/RU/>, свободный (дата обращения: 03.06.2019).
- 125 Басовский А.А. и др. Шунтирующие диоды для каскадных фотопреобразователей на основе соединений АЗВ5 // *Труды Всероссийской научно-технической конференции "Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий"* под ред. Ю.М.Урличича, А.А.Романова. - М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2009. – С. 357–363.
- 126 Analysis of multijunction solar cell degradation in space and irradiation induced recombination centers / M. Zazoui, M. Mbarki, A. Z. Aldin et al. // *Journal of Applied Physics*. – 2003. – V. 93. – No. 9. – P. 5080–5084.
- 127 Analysis of multijunction solar cells electroluminescence study / S. Makham, M. Zazoui, J. C. Bourgoin // *M. J. Condensed Matter*. 2004. –Vol. 5. – No. 2. – P. 181–185.

128 Efficiency Potential of Photovoltaic Materials and Devices Unveiled by Detailed-Balance Analysis / U. Rau, B. Blank, T. C. M. Müller, et al. // *Phys. Rev. Applied.* – 2017. – Vol. 7. – No. 044016.

129 Recombination centers in electron irradiated GaInP: application to the degradation of space solar cells / A. Kahn, M. Yamaguchi, T. Takamoto et al.// *J. Cryst. Growth.* – 2000. – Vol. 210. – P. 264–267.

130 Recombination enhanced defect reactions in 1 MeV electron irradiated p InGaP / A. Kahn, M. Yamaguchi, J. C. Bourgoin et al.// *J. Appl. Phys.* – 2001. – Vol. 89. – No. 8 – P. 4263–4268.

131 Room-temperature minority-carrier injection-enhanced recovery of radiation-induced defects in p-InGaP and solar cells / A. Kahn, M. Yamaguchi, J. C. Bourgoin et al.// *Appl. Phys. Lett.* – 2000. – Vol. 76. – No. 18. – P. 2559–2561.

132 Solar cell degradation by electron irradiation. Comparison between Si, GaAs and GaInP cells / A. N. De, J. C. Bourgoin, T. Takamoto et al. // *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* – 2001. – Vol. 66. – P. 495–500.

133 Pons D., Bourgoin J. C. Irradiation-induced defects in GaAs // *J. Phys. C: Solid State Phys.* – 1985. – Vol. 18. – No. 20. – P. 3839–3871.

134 Irradiation-induced defects in p-type GaAs / D. Stievenard, X. Boddaert, J. C. Bourgoin // *Phys. Rev. B.* – 1986. – Vol. 34. – No. 6. – P. 4048–4058.

135 Bourgoin J.C., Zazoui M. Irradiation-induced degradation in solar cell: characterization of recombination centers // *Semicond. Sci. Technol.* – 2002. – Vol. 17. – P. 453–460.

136 Energy dependence of deep level introduction in electron irradiated GaAs / D. Pons, P. M. Mooney, J. C. Bourgoin // *J. Appl. Phys.* – 1980. – Vol. 51. – No. 4. – P. 2038–2042.

137 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.

138 Electroluminescence analysis of injection-enhanced annealing of electron irradiation-induced defects in GaInP top cells for triple-junction solar cells / Y. Tiancheng, L. Ming, Y. Kui et al. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B.* – 2014. – Vol. 335. – P. 66–69.

139 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.

140 NIEL calculations for estimating the displacement damage introduced in GaAs irradiated with charged particles / E. El Allam, C. Inguibert, S. Addarkaoui et al.// *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* – 2017. – Vol. 186 – No. 012005. – P. 1–6.

141 ESTAR сайт. URL: <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ESTAR.html> (дата обращения: 11.03.2021). – Текст: электронный.

142 Зернов А. С., Николаев В. Д. Опыт эксплуатации солнечных батарей служебного модуля Международной космической станции // Космическая техника и технологии. Опыт эксплуатации солнечных батарей служебного модуля. – 2016. – № 1. – Вып. 12. – С. 29–38.

143 Воздействие метеороидов и техногенных частиц на солнечные батареи космических аппаратов / А. Б. Надирадзе, М. П. Калаев, Н. Д. Семкин // Космические исследования. – 2016. – Т. 54. – № 5. – С. 392–401.

144 Савина А.С. К исследованию влияния собственной атмосферы космических аппаратов на развитие электростатических разрядов на поверхностях солнечных батарей // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 6 (часть 5) – С. 842–846.

145 Методика проведения ускоренных ресурсных испытаний солнечных батарей космических аппаратов на устойчивость к факторам радиационной электризации в лабораторных условиях / Ю. А. Бежаев, В. М. Зыков, А. А. Лукашук и др. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2008. – С. 38–42.

146 Расчет приближенно-оптимальных перелетов космического аппарата с двигателями малой тяги с высокоэллиптической на геостационарную орбиту / В. В. Салмин, К. В. Петрухина, А. А. Кветкин // Космическая техника и технологии. – 2019 – № 4. – Вып. 27.

147 Измерения уровня загрязнений в собственной внешней атмосфере отечественных орбитальных станций и российского сегмента Международной космической станции / В. К. Душин, А. Н. Крылов, А. Ю. Скороваров // Космическая техника и технологии. – 2021. – Вып. 33. – № 2. – С. 98–106.

148 Машиностроение. Энциклопедия. Ред совет: К.В. Фролов (пред.) и др. – М.:Машиностроение. Ракетно-космическая техника. Т. IV-22 / А.П. Аджян, Э.Л. Аким, О.М. Алифанов и др.; под ред. В.П. Легостаева. В 2 кн. Кн. 1. 2012, 925 с.

149 Contamination Control Engineering Design Guidelines for the Aerospace Community / A. C. Tribble, B. Boyadjian, J. Davis et al. // NASA Contractor Report 4740. – 1996.

150 ГОСТ Р 59313-2021. Методы измерения коэффициента поглощения солнечного излучения и коэффициента теплового излучения терморегулирующих покрытий и материалов.

151 Anspaugh B. E. GaAs Solar Cell. Radiation Handbook // JPL Publication. – 1996. – Т. 9.

152 Physics of the temperature coefficients of solar cells / O. Dupré, R. Vaillon, M. A. Green // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2015.

153 Thermodynamic analysis of thermophotovoltaic efficiency and power density tradeoffs / P Baldasaro. F., Raynolds J. E., Charache G. W. et al. // Journal of Applied Physics 89. – 2001. – No. 3319.

154 Landsberg P. T., Badescu V. Carnot factor in solar cell efficiencies // J. Phys. D. Appl. Phys. – 2000. – No. 33. – P. 3004–3008.

155 Green M. A. Third generation photovoltaics: Review // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. – 2007. – Vol. 10 – P. 42–50.

156 Green M. A. General temperature dependence of solar cell performance and implications for device modelling // Prog. Photovoltaics Res. Appl. 11. – 2003. – P. 333–340.

157 Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы: Теория и эксперимент / Пер. с англ. под ред. М. М. Колтуна. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 280 с.

158 Response of Single Junction GaAs/GaAs and GaAs/Ge Solar Cells to Multiple Doses of 1 MeV Electrons / D. L. Meier, J. R. Szedon, J. Bartko // NASA, Lewis Research Center, Space Photovoltaic Research and Technology. High Efficiency, Space Environment, and Array Technology. – 1988. – P. 177–189.

159 Baur C., Bett A. W. Modeling of the degradation of III–V triple-junction cells due to particle irradiation on the basis of component cells // Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference – 2010.

160 Singh P., Ravindra N. M. Temperature dependence of solar cell performance – an analysis // Solar Energy Materials & Solar Cells – 2012. – Vol. 101.– P 36–45.

161 Коваль О. С., Тиванов М. С. Определение параметров солнечного элемента из его световой вольт-амперной характеристики // Физика. Вестник БГУ. Сер. 1. – 2012. – № 2 – С. 39–44.

162 Исследование влияния нагрева солнечных модулей на эффективность преобразования излучения / В. Н. Гульков, И. Д. Колесниченко, К. Е. Коротков // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Физика № 1. – 2019. – С. 10–16.

163 Радиационные условия для высокоорбитальных космических аппаратов в период максимума солнечной активности / А. Е. Шилов, С. Н. Волков, И. П. Безродных и др. // Вопросы электромеханики. – 2010. – Т. 115. – С. 47–52.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)

Акт внедрения результатов диссертации в АО «НПП «Квант»



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО

«Научно-производственное предприятие «Квант»

129626, Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 16, факс (495) 687 3503, тел. (495) 687 9742 E-mail: info@npp-kvant.ru

Для представления
в диссертационный совет
НИТУ МИСИС

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор АО «НПП «Квант»
А.С. Карabanов
М.П.
«17» 10 2023 г.

АКТ

о внедрении результатов кандидатской диссертации
Рябцевой Марии Владимировны, соискателя кафедры полупроводниковой электроники и физики полупроводников ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

Комиссия в составе:

Председатель – главный специалист отдела исследования и изготовления фотопреобразователей отделения 8, к.х.н. Шаров С.К.

Зам. председателя – начальник конструкторского отдела отделения 8 Степанов И.Ю.

Технический секретарь – старший научный сотрудник отдела исследования и изготовления фотопреобразователей отделения 8 Генали М.А.

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Рябцевой М.В. «Усовершенствование конструкции и функциональных свойств фотовосприимчивой электрогенерирующей части батареи солнечной для повышения эксплуатационных характеристик системы энергопитания космических аппаратов», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности – «1.3.11 Физика полупроводников», используемой в НИР «Энергия», выполняемого в АО «НПП «Квант» согласно Приказу от 27.05.2022 г. № 01-120.

В настоящее время на предприятии ведутся работы по увеличению радиационной стойкости фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) на основе полупроводниковых материалов AlInBV/Ge, применяемых в составе батарей солнечных (БС) космических аппаратов (КА) с большим энергопотреблением. В связи с этим прорабатывается вопрос усовершенствования конструкции БС с использованием следующих результатов, приведённых в рассматриваемой диссертационной работе:

– разработана и запатентована конструкция фотовосприимчивой электрогенерирующей части (ФГЧ) БС с инжекционным отжигом за счёт собственного ресурса, которая при плотности тока инжекции более 90 мА/см² через каждый год в течение не более 123 часов позволяет получить относительный выигрыш по мощности в конце срока активного существования до 15,5 % при эксплуатации КА в условиях ГСО;

– разработан экспериментально-теоретический подход к определению эффективного режима инжекционного отжига ФЭП в зависимости от радиационных условий, в которых эксплуатируется БС.

Данное направление является перспективным, поскольку позволяет создавать ФГЧ БС с возможностью частичного восстановления выходных характеристик на протяжении всего срока активного существования КА. В случае успешного проведения наземной экспериментальной отработки планируется внедрение данных разработок в технологические процессы, осуществляемые на предприятии.

Председатель _____ Шаров С.К.

Зам. председателя _____ Степанов И.Ю.

Технический секретарь _____ Генали М.А.