

На правах рукописи

ЕМЕЛЬЯНОВ ВИКТОР МИХАЙЛОВИЧ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ
ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОПЕРЕХОДНЫХ A^3B^5 ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

(01.04.10 – физика полупроводников)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2011

Работа выполнена в Учреждении Российской Академии наук Физико-техническом институте им. А.Ф.Иоффе РАН

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук, с.н.с.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Лантратов В.М.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Теруков Е.И.

доктор физико-математических наук, профессор

СПбГПУ

Немов С.А.

Ведущая организация:

Учреждение Российской академии наук Санкт-Петербургский Академический университет – научно-образовательный центр нанотехнологий РАН (СПб АУ НОЦНТ РАН)

Защита состоится «___» _____ 2011 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета Д 002.205.02 при Физико-техническом институте им. А.Ф.Иоффе по адресу: 194021 Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке в Учреждения Российской Академии наук Физико-технического института им. А.Ф.Иоффе РАН.

Автореферат разослан «___» _____ 2011 г.

Учёный секретарь диссертационного совета

доктор физико-математических наук

Сорокин Л.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Прогресс в развитии фотоэлектрического метода преобразования солнечной энергии в последние годы был связан с появлением новых более эффективных солнечных элементов на основе полупроводниковых материалов. В первую очередь это относится к многопереходным фотопреобразователям на основе материалов A^3B^5 , кпд которых на сегодняшний день достигает более 40 % для 300-500 X концентрированного наземного солнечного излучения и более 30 % для прямого внеатмосферного [1,2].

Создание высокоэффективных солнечных элементов экономически целесообразно для солнечных батарей как космического, так и наземного применения. Для космических аппаратов солнечные батареи являются основным источником энергии. Увеличение эффективности элементов, их составляющих, позволяет либо увеличить энерговооруженность аппарата при сохранении массогабаритных характеристик батарей, либо при сохранении энерговооруженности уменьшить размеры и массу батарей, увеличив, таким образом, полезную нагрузку. При наземном использовании фотопреобразователи с высоким кпд, установленные под оптическими концентраторами с высокой кратностью концентрирования, позволяют снизить стоимость вырабатываемой батареей энергии за счет уменьшения площади самой дорогостоящей составной ее части – полупроводникового солнечного элемента.

Для достижения высоких значений кпд при разработке солнечных элементов должен учитываться ряд факторов, влияющих на эффективность преобразования солнечного света. Сюда относятся, в первую очередь, интерференция световых волн при отражении от гетерограниц эпитаксиальной структуры элемента, характеристики собирания фотогенерированных носителей заряда из слоев структуры и омические потери, вызванные протекающими в структуре в латеральном направлении токами.

Высокоэффективные многопереходные солнечные элементы представляют собой многослойные гетероструктуры, выращиваемые эпитаксиальными методами на полупроводниковых подложках и содержащие как наноразмерные (15-100 нм), так и объемные (1-5 мкм) полупроводниковые слои с различными оптическими параметрами. Это приводит к возникновению интерференционных явлений и многократному переотражению световой волны в структуре элемента, которые оказывают значительное влияние на их характеристики: в первую очередь, на спектральную зависимость внешнего квантового выхода от длины волны падающего света. Также на ее вид влияет и доля собираемых из фотоактивных слоев носителей заряда, которая зависит от их диффузионных длин, тянущих полей в структуре, а также свойств гетерограниц. Неудачный выбор толщин и химического состава слоев может привести к значительному отражению света или малому коэффициенту собирания, а, следовательно, низкому фототоку и невысокому КПД элемента. Для фотопреобразователей, используемых в космосе, также характерно существенное изменение фотоэлектрических характеристик слоев во времени вследствие радиационных повреждений, вызываемых высокоэнергетичными частицами околоземного пространства (протонами, электронами и гамма-квантами).

Омические потери в фотопреобразователях также приводят к снижению их эффективности, причем данные потери возрастают пропорционально квадрату величины светового потока, вследствие чего они являются особенно существенными для преобразователей концентрированного излучения. На КПД последних оказывает влияние не только среднее значение кратности концентрирования, но также и вид распределения освещенности по поверхности элемента, которое формирует оптический концентратор. Сильная неравномерность освещенности, характерная для концентраторов высокой кратности, приводит к неоднородности омических потерь в элементе. Наличие хроматической аберрации в линзовых концентраторах, приводит к отличиям форм распределений облученности солнечного элемента в различных спектральных диапазонах, вследствие чего возникают латеральные токи не только под контактной сеткой, но и в глубине структуры многопереходного солнечного элемента, вызывая уменьшение его КПД.

Математическое моделирование является эффективным методом анализа недостатков существующих приборов и проведения их оптимизации с целью улучшения характеристик. Все перечисленные выше факторы оказывают влияние на эффективность полупроводниковых A^3B^5 фотопреобразователей в комплексе. Поэтому разработка математической модели, позволяющей на основе известной структуры солнечного элемента, конструкции его чипа, и характеристик падающего излучения и концентратора предсказать вольтамперную характеристику с высокой точностью, является актуальной задачей. Такая модель позволит одновременно количественно описывать все наиболее важные процессы, приводящие к снижению КПД фотопреобразователей и, следовательно, оптимизировать конструкции существующих и вновь разрабатываемых солнечных элементов

Для апробации разработанной модели были выбраны трехпереходные солнечные элементы со структурой GaInP/GaInAs/Ge. Их выбор определяется, с одной стороны, тем, что на элементах данного типа на сегодняшний день были достигнуты наиболее высокие значения КПД, а с другой фактом, что технология их изготовления достаточно хорошо отработана в сравнении с другими перспективными структурами. Это, в свою очередь, делает выбор данных структур предпочтительным для серийного производства высокоэффективных солнечных элементов, а, следовательно, открывает перспективу применения разрабатываемой модели при проектировании фотопреобразователей для массового применения, обуславливая практическую значимость работы. При рассмотрении преобразователей концентрированного излучения в качестве основного типа концентратора была выбрана линза Френеля на основе силикона, обеспечивающая среднюю кратность концентрирования порядка 500 X. Данный выбор обусловлен тем, что подобная кратность концентрирования является близкой к оптимальной с точки зрения КПД для существующих GaInP/GaInAs/Ge солнечных элементов, а стоимость концентратора данной конструкции является низкой, что делает перспективным его применение в наземных солнечных батареях.

Целью работы являлась разработка математической модели для многопереходных A^3B^5 солнечных элементов с наноразмерными слоями, позволяющей с высокой точностью рассчитывать их спектральные и вольтамперные характеристики, и ее применение при оптимизации фотопреобразователей со структурой GaInP/GaInAs/Ge как для наземного, так и космического применения с целью повышения их КПД и радиационной стойкости.

Научная новизна и практическая значимость работы заключаются в следующем:

1. Разработана математическая модель для многопереходных A^3B^5 солнечных элементов с наноразмерными слоями, основанная на расчете поля световой волны в структуре фотопреобразователя методом матриц Абелеса, решении диффузионно-дрейфовых уравнений методом малого параметра и построении трехмерной распределенной эквивалентной схемы. В модели учитываются интерференционные явления в структуре фотопреобразователя, возможность возникновения в структуре вторичного рекомбинационного излучения, инжекционного и рекомбинационного механизмов протекания темнового тока при прямом смещении, а также особенности формы обратной ветви вольтамперных характеристик $p-n$ переходов. Исследована применимость разработанной модели для моделирования однопереходных GaInP, GaAs и Ge фотопреобразователей, а также многопереходных солнечных элементов на основе структур GaInP/GaAs и GaInP/GaInAs/Ge. Показано, что разработанная модель позволяет моделировать спектральные и вольтамперные характеристики солнечных элементов, в том числе при высоких кратностях концентрирования солнечного света и рассогласованиях субэлементов многопереходных фотопреобразователей по фототоку, что имеет место при измерении спектральных характеристик.

2. Разработан набор программных модулей, реализующих разработанную математическую модель.

3. Предложена количественная оценка величины хроматической аберрации в линзовом концентраторе, учитывающая особенности структуры установленной под концентратором солнечного элемента.

4. Исследовано влияние величины хроматической аберрации в линзовом концентраторе со средней кратностью концентрирования 500 X на характеристики солнечного элемента со структурой GaInP/GaInAs/Ge. Обоснован выбор оптимальных значений сопротивлений растекания в эмиттерах GaInP и GaInAs субэлементов GaInP/GaInAs/Ge солнечного элемента.

5. Исследована возможность повышения радиационной стойкости солнечных элементов со структурой GaInP/GaInAs/Ge путем встраивания в них брэгговских отражателей. Предложена конструкция двухсекционного брэгговского отражателя и определены оптимальные толщины GaInP и GaInAs субэлементов в GaInP/GaInAs/Ge фотопреобразователе с брэгговским отражателем, позволяющие увеличить КПД элементов до 5 % при длительной эксплуатации на геосинхронной орбите.

6. Предложен подход к проектированию контактных сеток с нерегулярным шагом токоведущих полос для фотопреобразователей концентрированного излучения, позволяющий увеличить их КПД. Определены оптимальные значения шага контактной сетки для солнечного элемента со структурой GaInP/GaInAs/Ge, установленного под концентратором на основе линзы Френеля со средней кратностью 500 X, которые позволяют увеличить КПД элемента.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель, основанная на расчете поля световой волны в структуре фотопреобразователя методом матриц Абелеса, решении диффузионно-дрейфовых уравнений методом малого параметра и построении трехмерной распределенной эквивалентной схемы позволяет достаточно точно моделировать спектральные и вольтамперные характеристики многопереходных A^3B^5 солнечных элементов с наноразмерными слоями, в том числе при преобразовании концентрированного солнечного излучения.

2. Радиационная стойкость GaInP/GaInAs/Ge солнечных элементов может быть существенно повышена путем встраивания в структуру GaInAs субэлемента двухсекционного брэгговского отражателя. В таких многопереходных солнечных элементах обеспечивается превышение фототока фотопреобразователя на величину $0,5\text{--}1 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ после года эксплуатации на орбите, и на $1\text{--}1,5 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ вплоть до конца срока службы космического аппарата в сравнении с элементами без отражателя.

Оптимизация структур GaInP/GaInAs/Ge солнечных элементов с брэгговскими отражателями для согласования субэлементов по фототоку при заданной расчетной степени радиационного повреждения ($1\cdot 10^{15} - 3\cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 1 МэВ электронов) обеспечивает увеличение КПД в конце срока службы до 5%, по сравнению со стандартной структурой многопереходного солнечного элемента.

3. Результаты исследований устанавливают равным 100 Ом оптимальное значение величины сопротивления растекания для эмиттеров GaInAs субэлементов, определяемого уровнем их легирования и толщинами, а также характером распределения облученности на поверхности многопереходного солнечного элемента из-за хроматической аберрации в линзе Френеля (средняя кратность концентрирования 500 X), при которых обеспечивается максимальная эффективность преобразования сконцентрированного солнечного излучения.

4. Зависимости сопротивления растекания и уровней легирования в эмиттере GaInP в GaInP/GaInAs/Ge многопереходных солнечных элементах показывают, что наибольший КПД в данных элементах достигается при сопротивлении растекания в этом слое порядка 1000 Ом. Оптимальный выбор параметров эмиттерных слоев при больших кратностях концентрирования позволяет увеличить КПД GaInP/GaInAs/Ge солнечного элемента до 4%.

5. Применение контактных сеток с нерегулярным шагом позволяет увеличить КПД GaInP/GaInAs/Ge солнечного элемента, установленного под линзовым концентратором со средней кратностью 500 X, за счет снижения затенения на краях элемента, где допустим больший шаг контактной сетки, по сравнению с центральной областью.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы докладывались на 23-й и 25-й Европейских конференциях по преобразованию солнечной энергии (Валенсия, Испания, 2008 и 2010 г.), 34-й Конференции специалистов по фотоэлектричеству (Филадельфия, 2009 г. США), Международной конференции по микро- и наноэлектронике 2009 (Звенигород МО, РФ, 2009 г.), 5-м Форуме по новым материалам (Тоскана, Италия, 2010 г.) и на 10-й, 11-й и 12-й Всероссийских молодёжных конференциях по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике (Санкт-Петербург, РФ, 2008, 2009 и 2010 г.).

Публикации

Основные результаты диссертационной работы изложены в 11 печатных работах, в том числе в 3-х статьях в рецензируемых журналах, материалах 5-ти международных и тезисах 3-х всероссийских молодежных конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Она содержит 214 страниц текста, включая 61 рисунок и 20 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 131 наименование.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, показана новизна и практическая значимость проведённого исследования, а также приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе описываются основные подходы к моделированию солнечных элементов, проводится критический анализ существующих моделей, используемых для расчета характеристик элементов с учетом наиболее важных механизмов потерь в них.

В разделе 1.1 приведены основы теории фотовольтаического эффекта в *p-n* переходе, представлены простейшие электрические модели солнечных элементов, а

также оценки их основных параметров. В разделе 1.2 анализируются особенности моделирования преобразователей концентрированного излучения, эффекты, проявляющиеся при высоких уровнях засветки и приводящие к необходимости использования сложных моделей с распределенными параметрами. В разделе 1.3 рассматриваются многопереходные солнечные элементы и основные подходы к их моделированию. В разделе 1.4 представлены результаты анализа использования квантово-размерных структур в солнечных элементах. В разделе 1.5 формулируются основные задачи диссертационной работы.

Во второй главе приводится описание разработанной модели и методов расчета, позволяющих вычислять спектральные и вольтамперные характеристики многопереходных солнечных элементов, в том числе при преобразовании концентрированного солнечного излучения.

В разделе 2.1 представлена модель решения диффузионно-дрейфовой задачи для многопереходных A^3B^5 солнечных элементов, базирующаяся на приближенном аналитическом решении основных уравнений фотовольтаического эффекта методом малого параметра. Дана оценка границы применимости данного метода, показавшая, что для типичных структур GaInP/GaInAs/Ge СЭ данный метод может быть использован при кратностях концентрирования света, как минимум, до 2000–3000 X. Обоснованы эквивалентные схемы субэлементов многопереходного солнечного элемента. В разделе 2.2 приводится модель для расчета электрического поля световой волны в структуре, включающая расчет когерентного поля при помощи решения системы уравнений Максвелла в слоистой структуре методом матриц Абелеса и расчет некогерентного поля, вызванного рекомбинационным излучением. В разделе 2.3 представлена распределенная эквивалентная схема многопереходного солнечного элемента и метод расчета вольтамперных характеристик с ее помощью (Рис. 1). В данной модели учитываются два механизма протекания прямого тока через $p-n$ переход – инжекционный ($J_{инж}$) и рекомбинационный ($J_{рек}$). Также в модель был включен дополнительный диод ($J_{обр}$) для моделирования обратной ветви вольтамперной характеристики $p-n$ перехода, точность описания которой играет существенную роль при неравномерной засветке

субэлементов многопереходного солнечного элемента. Подобные условия возникают при измерении спектральных характеристик элементов и могут приводить к погрешностям, связанным с несовершенством метода измерений. Оценка данных погрешностей может производиться путем моделирования вольтамперных характеристик в процессе измерения их спектральных характеристик.

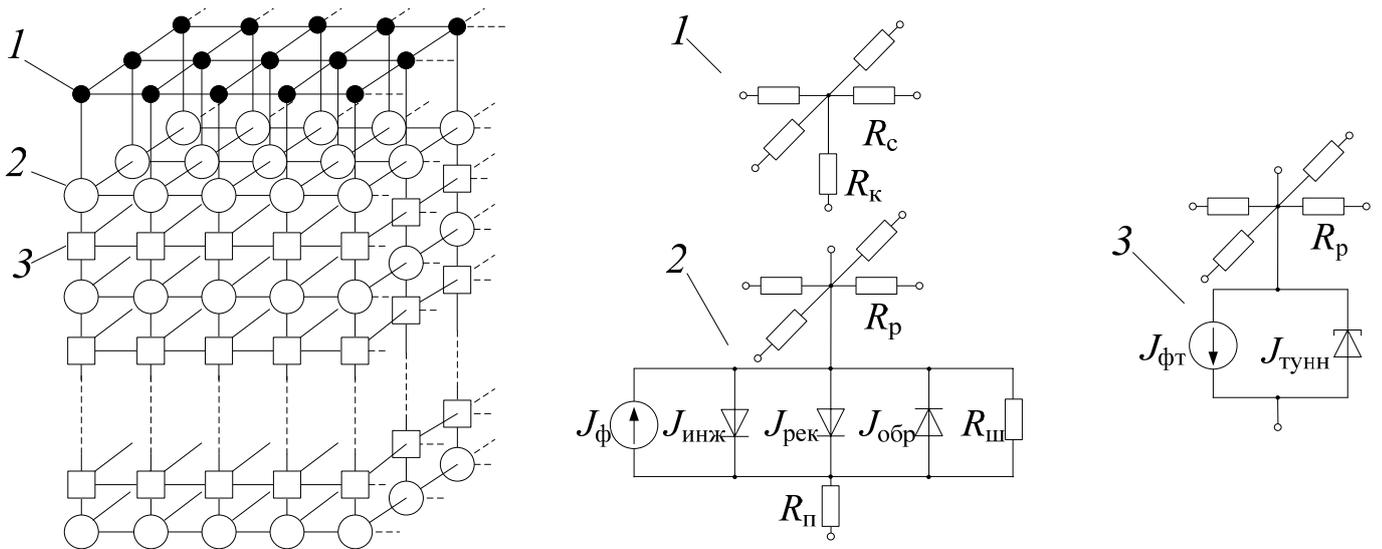


Рисунок 1 – Распределенная трехмерная эквивалентная схема многопереходного солнечного элемента и ее элементарные ячейки, описывающие контактную сетку (1), субэлемент (2) и туннельный диод (3).

Распределенная модель (см. Рис. 1) состоит из большого числа однотипных ячеек. Отдельные ячейки объединяются в единую эквивалентную схему через резисторы R_p , коммутирующие их внутри одного уровня. Величины данных элементов определяются сопротивлением растекания слоя. Вместе с резисторами $R_{\text{п}}$, они моделируют омические потери при протекании в структуре элемента токов в латеральном и нормальном направлениях. Контактная сетка моделируется при помощи резисторов R_c . Протекание тока в контактную сетку из структуры элемента происходит через контактные сопротивления R_k .

При моделировании ячеек туннельных диодов учитывается возможность генерации фототока в них.

В третьей главе представлены результаты моделирования спектральных и вольтамперных характеристик одно-, двух- и трехпереходных солнечных элементов с различными структурами, полученные с использованием разработанной модели, а также сравнение расчетных результатов с экспериментальными данными.

В разделах 3.1–3.3 анализируются спектральные характеристики двухпереходных и трехпереходных солнечных элементов, однопереходных элементов с брэгговскими отражателями, а также исследуется влияние собирания фотогенерированных носителей из широкозонного «окна» и тыльного потенциального барьера. Структуры исследованных фотопреобразователей *n-p* полярности были получены методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений. Элементы имели оптимизированное двухслойное просветляющее покрытие $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$. Для трехпереходного GaInP/GaAs/Ge солнечного элемента расчетная спектральная характеристика в сравнении с экспериментально измеренной представлена на рисунке 2. Видно, что разработанная модель позволяет достигать достаточно хорошего согласования расчетных и экспериментальных спектральных характеристик для многопереходного солнечного элемента.

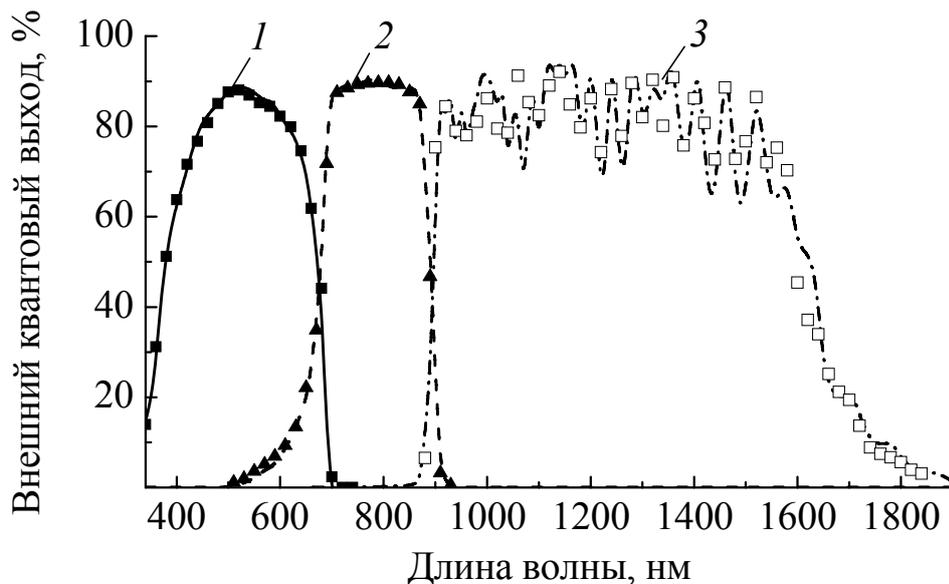
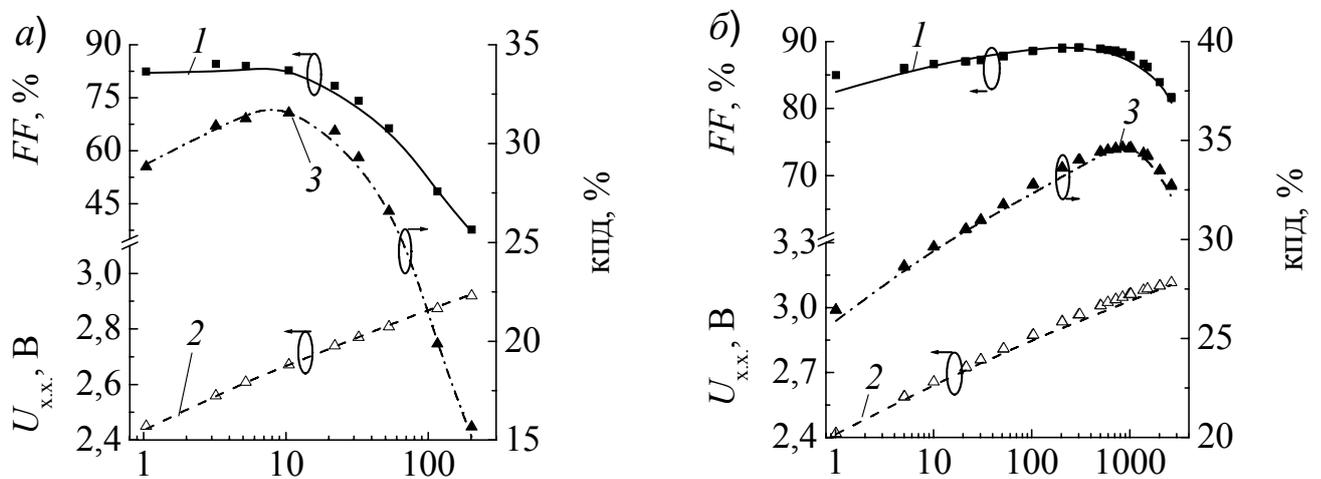


Рисунок 2 – Спектральные зависимости внешнего квантового выхода GaInP/GaInAs/Ge солнечного элемента; символы и линии – экспериментальные и расчетные данные. Представлены субэлементы: 1 – GaInP, 2 – GaInAs, 3 – Ge.

В разделах 3.4–3.7 представлены результаты моделирования вольтамперных характеристик одно- и многопереходных солнечных элементов в различных условиях. На рисунке 3 приведены зависимости напряжения холостого хода, фактора заполнения вольтамперной характеристики и КПД от кратности концентрирования для GaInP/GaInAs/Ge многопереходного солнечного элемента при больших и малых величинах омических потерь под контактной сеткой. Видно, что разработанная модель позволяет добиться хорошего согласования расчетных и экспериментально измеренных зависимостей, в том числе при больших кратностях концентрирования солнечного света.



Кратность концентрирования, X (AM1.5D) Кратность концентрирования, X (AM1.5D)

Рисунок 3 – Параметры исследованных GaInP/GaInAs/Ge МП СЭ при больших (а) и малых (б) омических потерях под контактной сеткой: 1 – фактор заполнения вольтамперной характеристики (FF), 2 – напряжение холостого хода ($U_{x.x.}$), 3 – КПД. Точками показаны измеренные значения.

В четвертой главе рассматривается задача повышения радиационной стойкости GaInP/GaInAs/Ge космических элементов при помощи встроенных брэгговских отражателей. Представлены результаты оптимизации толщин слоев структур под расчетную степень радиационного повреждения высокоэнергетичными электронами с целью продления срока эксплуатации солнечных батарей на геосинхронных орбитах.

В разделах 4.1-4.2 приводится модель деградации солнечных элементов при облучении их высокоэнергетичными частицами и исследуется влияние облучения

электронами с энергией 1 МэВ на характеристики GaInP/GaInAs/Ge солнечных элементов. Показано, что наиболее сильно деградирует GaInAs субэлемент и повышение его радиационной стойкости является первоочередной задачей. В разделе 4.3 рассматривается использование брэгговского отражателя для повышения радиационной стойкости GaInP/GaInAs/Ge многопереходных солнечных элементов. Оптимальными материалами для брэгговского отражателя (БО) в GaInAs-субэлементе являются слои $Al_xGa_{1-x}As$ с различным содержанием алюминия. Они позволяют наиболее сильно варьировать показатель преломления среди всех сплавов с постоянной решетки, близкой к постоянной решетки $Ga_{0,99}In_{0,01}As$, что необходимо для получения высокого и широкого пика отражения от БО. Для обеспечения эффективного отражения света в диапазоне 800-900 нм был разработан БО, состоящий из 20-ти пар слоев $Al_{0,1}Ga_{0,9}As$ (59 ± 1 нм)/AlAs (72 ± 1 нм), обеспечивающих максимум отражения на длине волны 860 нм (Рис. 4, график 1). Для отражения света в диапазоне 750-900 нм был разработан двухсекционный БО, содержащий помимо 20-ти пар слоев $Al_{0,1}Ga_{0,9}As$ (59 ± 1 нм)/AlAs (72 ± 1 нм), дополнительно 20 пар слоев $Al_{0,2}Ga_{0,8}As$ (54 ± 1 нм)/AlAs (64 ± 1 нм), обеспечивающих максимум отражения на длине волны 770 нм (Рис. 4, график 3). Из рисунка 4 видно хорошее согласование рассчитанной характеристики двухсекционного отражателя с экспериментально измеренной.

В разделах 4.4–4.5 представлены результаты моделирования характеристик многопереходных GaInP/GaInAs/Ge солнечных элементов со встроенными отражателями. В разделе 4.5 также приведены результаты оптимизации структур трехпереходных солнечных элементов под расчетный срок эксплуатации на орбите. Оценка эффективности оптимизации СЭ производилась путем расчета зависимости КПД элементов без БО и с двухсекционным БО от дозы 1 МэВ электронов и соответствующего этой дозе времени нахождения фотоэлементов на геосинхронной орбите для различных значений толщин GaInP и GaInAs субэлементов (Рис. 5). Элементы, структуры которых были оптимизированы на начало эксплуатации на орбите, имеют максимальное начальное значение КПД, однако, деградируют с наибольшей скоростью. Снижение КПД СЭ, структуры которых были

оптимизированы на дозу $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ 1 МэВ электронов, до данной дозы обусловлено падением напряжения холостого хода и лишь после этого уменьшением тока короткого замыкания. Дegradaция СЭ, оптимизированных на дозу $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ 1 МэВ электронов, целиком объясняется спадом напряжения холостого хода. Видно, что при дозах от $2 \cdot 10^{14}$ до $(1,5-2) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ электронов наибольшим КПД обладает структура, оптимизированная под расчетную дозу $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ электронов. При больших дозах облучения наивысшим КПД обладает структура, оптимизированная под дозу $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ электронов, а при меньших – оптимизированная на начало эксплуатации.

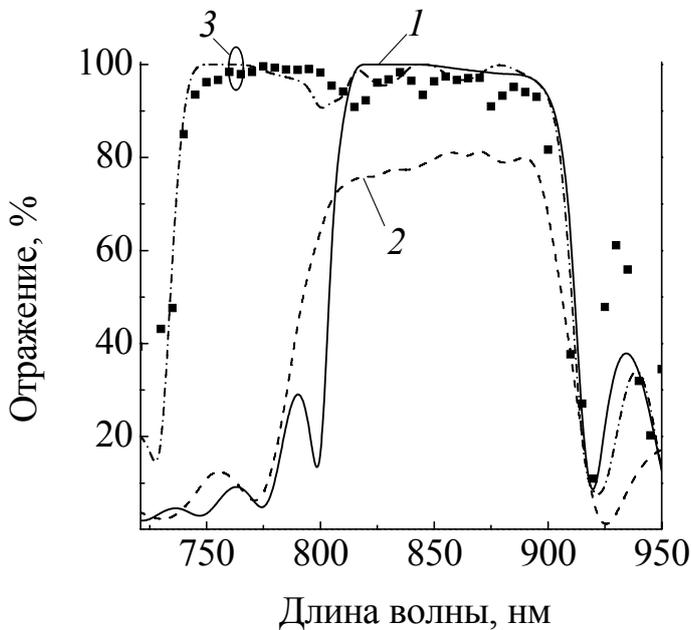


Рисунок 4 – Спектральные характеристики различных отражателей: 1 – разработанный односекционный брэгговский отражатель (БО); 2 – БО из 12 пар слоев GaAs/AlAs [3]; 3 – разработанный двухсекционный БО. Точками показано измеренное отражение от двухсекционного БО.

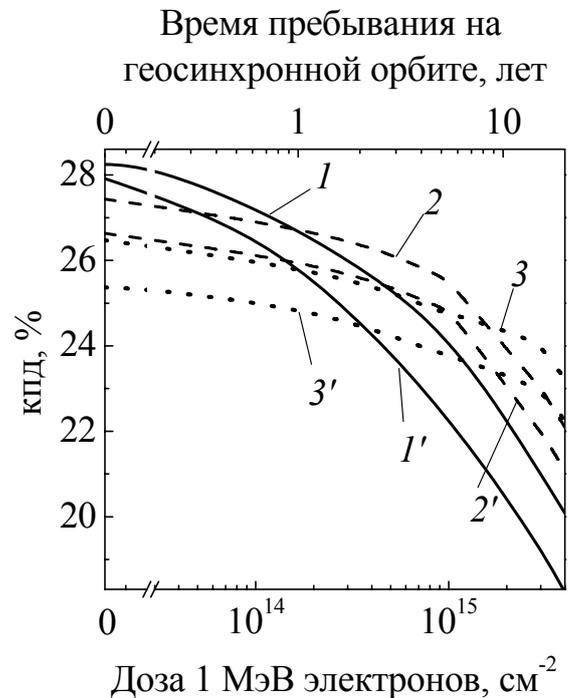


Рисунок 5 – Расчетное изменение КПД в условиях AM0 в GaInP/GaInAs/Ge СЭ без БО (1',2',3') и с двухсекционным БО (1,2,3) в зависимости от дозы 1 МэВ электронов, под которую оптимизировались структуры СЭ: 1,1' – без учета облучения; 2,2' – $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$; 3,3' – $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$.

В пятой главе представлены результаты исследования влияния свойств характеристик распределения освещенности, формируемого линзовым концентратором, параметров эпитаксиальной структуры и конструкции контактной сетки на КПД GaInP/GaInAs/Ge солнечных элементов. Предложены подходы к оптимизации структур и контактных сеток концентраторных GaInP/GaInAs/Ge элементов с целью снижения в них омических потерь и получения максимального КПД.

В разделе 5.1 проведен анализ омических потерь в структурах GaInP/GaInAs/Ge солнечных элементов. Показано, что значительная доля омических потерь в них приходится на латеральные токи, основная часть которых протекает в эмиттерах субэлементов GaInP/GaInAs/Ge солнечных элементов. Снижение омических потерь вследствие протекания латеральных токов в структуре возможно путем оптимизации толщин и уровней легирования эмиттеров GaInP и GaInAs субэлементов.

В разделе 5.2 исследовано влияние параметров структуры на генерацию тока и сопротивление растекания в эмиттерах GaInP и GaInAs субэлементов. Получены диаграммы для определения толщин и уровней легирования эмиттеров GaInP и GaInAs субэлементов в зависимости от значения сопротивления растекания.

В разделе 5.3 проведено исследование влияния параметров структуры на КПД элементов. Определены оптимальные значения сопротивления растекания в эмиттерах GaInP и GaInAs субэлементов трехпереходных GaInP/GaInAs/Ge СЭ, позволяющие добиться максимального КПД при различных кратностях концентрации солнечного света и величинах хроматической аберрации.

В разделе 5.4 рассматривалось влияние конструкции контактной сетки на КПД концентраторного солнечного элемента. Построены зависимости локального КПД от координаты элемента под линзовым концентратором и параметров контактной сетки. Предложен подход к синтезу контактных сеток с нерегулярным шагом для фотопреобразователей концентрированного излучения, позволяющий повысить их КПД за счет оптимизации затенения. При помощи данного подхода были рассчитаны оптимальные шаги контактных сеток двух конструкций для элементов размером 2x2 мм, помещенных под концентратор на основе линзы Френеля со средней кратностью концентрирования 500 X. Материалом для сеток было выбрано серебро, ширина шинок составляла 2, 4 и 6 мкм. Расчетные распределения энергетической облученности и плотностей фототоков по поверхности элемента, а также схемы промоделированных контактных сеток представлены на рисунке 6. Значения КПД для элементов с различными конструкциями сеток приведены в таблице.

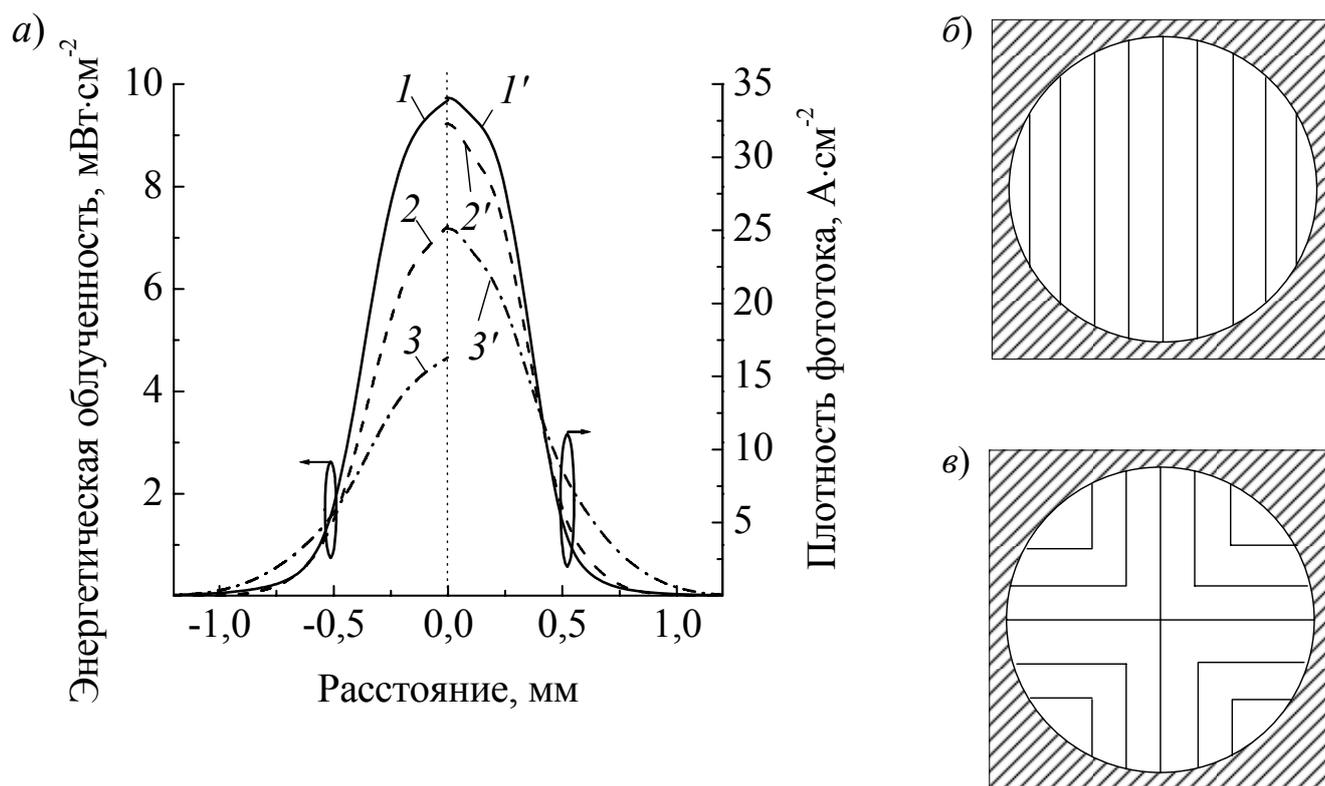


Рисунок 6 – Расчетные распределения облученности [4] и фототоков на поверхности исследованного GaInP/GaInAs/Ge элемента под линзовым концентратором (а) и схемы контактных сеток с одномерным (б) и двумерным (в) рисунками. Облученности и фототоки для субэлементов: 1, 1' – GaInP; 2, 2' – GaInAs; 3, 3' – Ge.

Таблица – Расчетные значения КПД исследованного GaInP/GaInAs/Ge СЭ под линзовым концентратором при различных конструкциях контактной сетки

Ширина контактной шинки	КПД в зависимости от конструкции контактной сетки, %			
	Одномерный рисунок		Двумерный рисунок	
	Регулярный шаг 50 мкм	Нерегулярный шаг	Регулярный шаг 50 мкм	Нерегулярный шаг
2	36,23	36,43	36,24	36,53
4	34,96	35,18	34,97	35,28
6	33,71	34,11	33,71	34,25

В заключении приводятся основные результаты и выводы, вытекающие из проведенного исследования.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Разработана математическая модель и реализующие ее программные модули для многопереходных A^3B^5 солнечных элементов с наноразмерными слоями, основанная на расчете поля световой волны в структуре фотопреобразователя методом матриц Абелеса, решении диффузионно-дрейфовых уравнений методом малого параметра и построении трехмерной распределенной эквивалентной схемы. В модели учитываются интерференционные явления в структуре фотопреобразователя, возможность возникновения в структуре вторичного рекомбинационного излучения, два основных механизма протекания темнового тока при прямом смещении, а также особенности формы обратной ветви вольтамперных характеристик $p-n$ переходов. Исследована применимость разработанной модели при моделировании однопереходных GaInP, GaAs и Ge фотопреобразователей, а также многопереходных солнечных элементов на основе структур GaInP/GaAs и GaInP/GaInAs/Ge. Показано, что разработанная модель позволяет моделировать спектральные и вольтамперные характеристики солнечных элементов, в том числе при высоких кратностях концентрирования солнечного света и рассогласованиях субэлементов многопереходных фотопреобразователей по фототоку.

2. Исследовано влияние величины хроматической аберрации в оптическом концентраторе оптимальной конструкции на основе линзы Френеля из полимерного материала, обеспечивающем среднюю кратность концентрирования 500 X для поля диаметром 1,7 мм. Показано, что хроматическая аберрация оказывает влияние на КПД GaInP/GaInAs/Ge МП СЭ при величинах сопротивлений растекания более 1000 Ом для пары GaInP и GaInAs субэлементов и более 100 Ом для пары GaInAs и Ge субэлементов.

3. Исследовано влияние толщин субэлементов GaInP/GaInAs/Ge МП СЭ на деградацию их характеристик при облучении. Показано, что скорость деградации, в основном, определяется наиболее чувствительным к радиационным повреждениям GaInAs субэлементом. Повышение радиационной стойкости таких МП СЭ

возможно путем уменьшения толщины базы GaInAs субэлементов и встраивания в структуру элемента брэгговских отражателей.

4. Предложены конструкции двух брэгговских отражателей. Первый, состоящий из 20 пар слоев $\text{Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{As}/\text{AlAs}$, центрированных по отражению на длину волны 860 нм, позволяет снизить толщину базы GaInAs субэлемента до 2 мкм (при толщине эмиттера 0,1 мкм) без заметной потери фототока в начале эксплуатации. Второй, состоящий из 20 пар слоев $\text{Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{As}/\text{AlAs}$, центрированных по отражению на длину волны 860 нм, и 20 пар слоев $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,9}\text{As}/\text{AlAs}$, центрированных по отражению на длину волны 770 нм, позволяет снизить толщину базы GaInAs субэлемента до 1,5 мкм (при толщине эмиттера 0,1 мкм). Данные отражатели позволяют увеличить ток МП СЭ со структурой GaInP/GaInAs/Ge после года эксплуатации на геосинхронной орбите на 0,5–1 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$, а КПД – на 1–2 % в сравнении с элементами без брэгговских отражателей.

5. Исследована возможность оптимизации толщин субэлементов GaInP/GaInAs/Ge МП СЭ для обеспечения максимального КПД после их радиационного облучения. Показано, что деградация данных МП СЭ, оптимизированных на большую расчетную дозу облучения, существенно ниже, чем в МП СЭ, структуры которых имели максимальный КПД до облучения. При этом разница КПД между двумя группами СЭ может достигать более 3% к концу срока эксплуатации. Это объясняется тем, что снижение КПД у элементов, оптимизированных на конечный период эксплуатации, в основном, определяется уменьшением напряжения холостого хода, в то время как ток короткого замыкания многопереходного элемента до некоторого момента остается постоянным. Применение брэгговских отражателей дополнительно дает выгоду в 0,5–2% КПД при различных уровнях радиационного повреждения, по сравнению со структурами без отражателей. При этом суммарное увеличение КПД за счет оптимизации гетероструктур под расчетную дозу облучения и встраивания брэгговских отражателей достигает 5%.

6. Исследованы зависимости основных параметров GaInP/GaInAs/Ge МП СЭ с брэгговскими отражателями и без них при облучении в зависимости от той дозы электронов с энергией 1 МэВ, на которую производилась оптимизация их структур. Показано, что солнечные элементы, оптимизированные для дозы $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ 1 МэВ электронов, будут обладать большим кпд, по сравнению с элементами, оптимизированными на начальный период эксплуатации, менее чем через год после начала функционирования на геосинхронной орбите. Солнечные элементы, оптимизированные для дозы $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ 1 МэВ электронов, будут иметь больший кпд, по сравнению с фотопреобразователями, оптимизированными на начало эксплуатации, после 3 лет нахождения на геосинхронной орбите. Использование МП СЭ с двухсекционными БО, оптимизированными на предельную дозу $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ электронов, является предпочтительным при сроках функционирования на геосинхронной орбите до 10 лет. При больших сроках активного функционирования следует использовать СЭ с двухсекционным брэгговским отражателем, структуры которых оптимизированы на предельную дозу $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ электронов и более. Однако, такие СЭ будут иметь меньшее значение кпд в начальный период полета.

7. Было исследовано влияние параметров структуры концентраторных GaInP/GaInAs/Ge СЭ на эффективность преобразования ими солнечного света. Показано, что снижение омических потерь вследствие протекания латеральных токов в структуре возможно путем оптимизации толщин и уровней легирования эмиттеров GaInP и GaInAs субэлементов.

8. Определены оптимальные значения сопротивления растекания в эмиттерах GaInP и GaInAs субэлементов GaInP/GaInAs/Ge МП СЭ, позволяющие добиться максимального кпд при различных кратностях концентрации солнечного света и величинах хроматической аберрации. Произведена оценка влияния величин сопротивлений растекания на кпд СЭ. Получены диаграммы для определения толщин и уровней легирования эмиттеров GaInP и GaInAs субэлементов в зависимости от значения сопротивления растекания. Показано, что оптимальный выбор параметров эмиттерных слоев при больших кратностях концентрирования позволяет увеличить кпд GaInP/GaInAs/Ge СЭ на величину порядка 4%

9. Предложен подход к синтезу контактных сеток с нерегулярным шагом для фотопреобразователей концентрированного излучения, позволяющий увеличить их КПД. Определены оптимальные значения шага контактной сетки для солнечного элемента со структурой GaInP/GaInAs/Ge, установленного под концентратором на основе линзы Френеля со средней кратностью 500 X. Показано, что контактные сетки с оптимальным нерегулярным шагом позволяют увеличить КПД GaInP/GaInAs/Ge МП СЭ на 0,2–0,5 % за счет снижения затенения на краях элемента. Данный эффект достигается благодаря тому, что в связи с неравномерностью освещенности поверхности элемента характерной для концентраторов большой кратности, плотность светового потока в краевых областях существенно ниже, по сравнению с центром элемента, и для контактной сетки в них допустим больший шаг. Контактные сетки с одномерным и двумерным рисунком позволяют достичь одинаковых значений КПД при равных величинах затенения для регулярного шага, однако, в случае нерегулярного шага сетки с двумерным рисунком позволяют получить КПД на 0,1–0,15 % больше.

Разработанная математическая модель и программные модули ее реализующие позволяют проводить моделирование спектральных и вольтамперных характеристик современных многопереходных A^3B^5 солнечных элементов, в том числе при высоких кратностях концентрирования света, и являются эффективным инструментом для оптимизации существующих и разработки новых фотопреобразователей. Предложенные структуры солнечных элементов и конструкции контактных сеток могут найти широкое применение при создании фотоэнергоустановок наземного и космического базирования.

Основные результаты диссертационной работы изложены в следующих публикациях:

1. Andreev V.M., Emelyanov V.M., Kalyuzhnyy N.A., Lantratov V.M., Mintairov S.A., Shvarts M.Z., Timoshina N.K. Rated External Quantum Efficiency of III-V Multijunction Solar Cells // Proc. of the 23rd EPSEC (Valencia, Spain, 2008), p. 375-381.

2. Емельянов В.М., Минтаиров С.А., Андреев В.М. Расчет спектральных характеристик многопереходных солнечных элементов // Тезисы десятой всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике (Санкт-Петербург, 2008), с. 108.

3. Емельянов В.М., Минтаиров С.А., Калюжный Н.А., Лантратов В.М. Внешний квантовый выход фотоответа каскадных солнечных элементов // Научно-технические ведомости СПбГПУ: Физико-математические науки. – 2009. – т. 77, №2. – с.14-27.

4. Shvarts M.Z., Emelyanov V.M., Timoshina N.Kh., Lantratov V.M. Nonlinearity Effects in III-V Multi-Junction Solar Cells // Proc. of the 34th IEEE PVSC (Philadelphia, PA, USA, June 7-12, 2009), p. 545-551.

5. Emelyanov V., Kaluzhniy N., Mintairov S., Shvarts M., Lantratov V., Improvement of radiation resistance of multijunction solar cells by application of Bragg reflectors in International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2009, edited by Kamil A. Valiev, Alexander A. Orlikovsky // Proceedings of SPIE Vol. 7521 (SPIE, Bellingham, WA 2010), 75210D.

6. Емельянов В.М., Минтаиров С.А., Калюжный Н.А., Лантратов В.М. Оптимизация космических GaInP/Ga(In)As/Ge солнечных элементов для увеличения фототока // Тезисы докладов 11-й Всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике (Санкт-Петербург, 2009), с. 116.

7. Lantratov V.M., Emelyanov V.M., Kaluzhnyy N.A., Mintairov S.A., Shvarts M.Z., Improvement of radiation resistance of multijunction GaInP/GaInAs/Ge solar cells with application of Bragg reflectors // Proc. of the 5th Forum on New Materials (Tuscany, Italy) – Advances in Science and Technology. – 2010. – v. 74. – p. 225–231.

8. Emelyanov V.M., Kalyuzhnyy N.A., Mintairov M.A., Mintairov S.A., Shvarts M.Z. and Lantratov V.M. Distributed Resistance Effects Simulation in Concentrator MJ SCs Using 3D-Network Model // Proc. of the 25th EPSEC (Valencia, Spain, 2010), 1DV.2.33.

9. Емельянов В.М., Калюжный Н.А., Минтаиров С.А., Шварц М.З., Лантратов В.М. Многопереходные солнечные элементы с брэгговскими отражателями на основе структур GaInP/GaInAs/Ge // ФТП. – 2010. – т. 44, №12. – с. 1649-1654.

10. Емельянов В.М., Минтаиров М.А., Лантратов В.М.. Оптимизация структур концентраторных GaInP/Ga(In)As/Ge солнечных элементов для увеличения КПД // Тезисы докладов 12-й Всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике, (Санкт-Петербург, 2010), с. 101.

11. Емельянов В.М., Калюжный Н.А., Минтаиров М.А., Минтаиров С.А., Шварц М.З. и Лантратов В.М. Оптимизация концентраторных солнечных элементов на основе структур GaInP/GaInAs/Ge // Научно-технические ведомости СПбГПУ: Физико-математические науки. – 2011. – т. 116, № 1. – с. 11-18.

Список цитированной литературы:

1. Meusel M., Baur C., Guter W. et. al. Development status of European multi-junction space solar cells with high radiation hardness // Proc. 20th EPSEC (Barcelona, Spain, 2005), p. 20–25.

2. Guter W., Schöne J., Philipps S.P. et. al. Current-matched triple-junction solar cell reaching 41.1% conversion efficiency under concentrated sunlight // Appl. Phys. Lett. – 2009. – v. 94. – 223504.

3. Shvarts M.Z., Chosta O.I., Kochnev I.V., Lantratov V.M., Andreev V.M. Radiation resistant AlGaAs/GaAs concentrator solar cells with internal Bragg reflector //Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2001. – v. 68 – p. 105-122.

4. Andreev V.M., Grilikhes V.A., Soluyanov A.A., Timoshina N.H., Vlasova E.V. Shvarts M.Z. Weakening of the chromatic aberration negative effect on the performance of concentrator multi-junction solar cells //Proc. 22ndEPSEC (Milan, Italy, 2007), p.126-132.

Подписано в печать 19.05.2011. Формат 60 x 84/16.

Бумага документная. Печать трафаретная.

Уч.-изд. л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ № 132

Балтийский государственный технический университет

Типография БГТУ

190005, С.-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д. 1.