

На правах рукописи

МИНТАИРОВ Сергей Александрович

МНОГОПЕРЕХОДНЫЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРНЫЕ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ
НА ОСНОВЕ МАТЕРИАЛОВ А³В⁵ И ГЕРМАНИЯ, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ МОС-
ГИДРИДНОЙ ЭПИТАКСИИ

специальность

01.04.10 - физика полупроводников

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (г. Санкт-Петербург) 194021, СПб, ул. Политехническая 26.

Научный руководитель: Андреев Вячеслав Михайлович, доктор технических наук, ФГБУН Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, заведующий лабораторией

Официальные оппоненты: Казанский Андрей Георгиевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» (г. Москва), 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, физический факультет, профессор.
Лунин Леонид Сергеевич, доктор физико-математических наук, ФГБУН «Южный научный центр РАН» (г. Ростов-на-Дону), 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Чехова, 41, профессор.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Защита состоится _____ года в ____ на заседании диссертационного совета

Д 002.205.02 при ФГБУН Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук по адресу: 194021, СПб, ул. Политехническая 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУН Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Автореферат разослан

Ученый секретарь диссертационного _____ Сорокин Л.М.

Совета Д 002.205.02

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы связана с тем, что в последние десятилетия в мире постоянно возрастал интерес к использованию экологически чистой неисчерпаемой энергии солнца для нужд человечества. Это выражается, в частности, в том, что наиболее развитые страны, такие как США, Германия, Япония и другие, реализуют правительственные программы по поддержке и развитию солнечной энергетики, вводя налоговые и тарифные льготы для компаний, генерирующих электроэнергию на солнечных электростанциях. Кроме того, солнечная энергия является основным источником питания космических летательных аппаратов, поэтому увеличение КПД солнечных элементов (СЭ) и срока активной эксплуатации на орбите является первостепенной задачей космической энергетики, которая в настоящее время может быть решена только за счет использования полупроводниковых многопереходных (каскадных) СЭ (КСЭ).

Одним из перспективных путей к достижению паритета солнечной энергии с традиционными источниками для наземных применений является использование энергоустановок на основе каскадных гетероструктурных фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) с концентраторами солнечного излучения. При этом себестоимость получаемой энергии может быть заметно уменьшена при использовании дешевых линз, концентрирующих солнечное излучение на чипы КСЭ малого размера, пропорционально кратности концентрирования, которая для современных КСЭ достигает 500 – 1000 солнц. Однако потенциал каскадных ФЭП пока не реализован полностью, что во многом обусловлено возможностью дальнейшего значительного увеличения их КПД.

Таким образом, разработка эффективных структур КСЭ является актуальной научной и практической задачей, особенно для России, где мощный космический комплекс требует перехода на современные (конкурентоспособные) источники питания отечественной разработки.

Цели и задачи работы.

Дальнейший прогресс в улучшении утилитарных характеристик высокоэффективных КСЭ требует решения следующих **задач**:

- разработка теоретических основ и технологии создания согласованных по параметру решетки каскадных ФЭП на основе GaInP/GaInAs/Ge, пригодных к промышленному производству;
- разработка комплексных методов анализа КСЭ и моделирования их параметров для выявления факторов, ограничивающих эффективность их преобразования;
- выявление факторов, лимитирующих работу КСЭ, и разработка путей снижения их влияния за счет изменения, как дизайна структуры, так и технологии создания КСЭ;
- разработка структур КСЭ, применяемых для преобразования солнечного излучения с различным спектральным составом (космический и наземный спектры);
- выявление структурных особенностей КСЭ для преобразования слабо, средне и сильно концентрированного солнечного излучения.

Основная цель настоящего исследования заключается в разработке научных основ и МОС-гидридной эпитаксиальной технологии для создания высокоэффективных каскадных ФЭП различного назначения (космического и наземного). Для этого необходимо детальное рассмотрение фотовольтаических и электрических процессов, происходящих в структурах КСЭ, основных фундаментальных и технологических ограничений эффективности преобразования КСЭ, а также путей снижения различного вида потерь. Необходимо установить взаимосвязь между параметрами слоев и интерфейсов и основными характеристиками КСЭ, что подразумевает разработку моделей и эквивалентных схем для описания различных физических процессов, происходящих в КСЭ.

Научная новизна полученных результатов.

Впервые проведены расчеты коэффициентов собирания фотогенерированных носителей из слоев эмиттеров и баз каскадных ФЭП на основе GaInP/GaInAs/Ge;

Впервые сделан вывод о преимуществе *p-n* полярности для GaAs ФЭП, ввиду того, что при высоких уровнях легирования *p*-GaAs слои обладают большими диффузионными длинами, по сравнению с *n*-GaAs, а при низких – меньшими;

Впервые установлено, что ухудшение характеристик GaInP ФЭП *p-n* полярности связано с большим разрывом валентной зоны для GaAs/AlInP и AlInP/GaInP интерфейсов, что приводит к формированию высокого потенциального барьера для дырок;

Впервые показано, что для GaInP ФЭП *n-p* полярности особенности зонной диаграммы приводят к тому, что при увеличении плотности дефектов на интерфейсе окно/эмиттер дырки оттягиваются от границы под действием электрического поля, что ведет к снижению скорости рекомбинации и к меньшей чувствительности к дефектам;

Впервые показано, что использование нуклеационного слоя GaInP с оптимальной толщиной (170-180 нм) приводит к дополнительному возрастанию фототока Ge субэлемента;

Впервые теоретически оптимизированы оптические потери в структурах каскадных ФЭП, что позволило повысить фототок, генерируемый средним GaInAs субэлементом;

Впервые обнаружено, что наблюдаемое встречное фотоЭДС в каскадных ФЭП возникает в верхнем туннельном диоде и связано с заметным поглощением фотонов в слое тыльного потенциального барьера *p*-GaInP и предложена его замена на слой $p\text{-(Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8})_{0,52}\text{In}_{0,48}\text{P}$ для нивелирования встречного фотоЭДС;

Впервые предложено использование слоя *p*-GaInP в качестве тыльного барьера среднего GaInAs субэлемента, являющегося одновременно

широкозонным барьером для нижнего туннельного диода;

Впервые показано, что в случае использования слоя $p-(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0,52}\text{In}_{0,48}\text{P}$ при «х» меньше 25% высота барьера для дырок на гетеропереходе оказывается достаточно мала, чтобы обеспечить эффективный транспорт носителей;

Впервые показано, что при величинах времени жизни в базовом слое GaInAs ФЭП порядка 10^{-8} сек и в эмиттерном слое порядка 10^{-11} сек, использование анизотипных гетеропереходов, приводящее к сокращению рекомбинационных потерь в эмиттерном слое, позволяет увеличить КПД ФЭП.

Практическая значимость работы заключается в разработке и оптимизации конструкции каскадных солнечных элементов на основе изопериодичных полупроводниковых материалов GaInP/GaInAs/Ge, пригодных к крупномасштабному производству, и разработке технологии создания таких КСЭ с параметрами, находящимися на уровне лучших достижений в этой области. Это дает перспективную возможность для развития солнечной энергетики, особенно важной для Российской Федерации, реализующей значительное количество космических программ и обладающей наибольшим количеством суммарной падающей наземной солнечной энергии. Разработанные математические модели и подходы к численному моделированию могут быть успешно применены для создания широкого спектра оптоэлектронных приборов. Методики определения диффузионных длин могут применяться в материаловедении для оптимизации технологии синтеза различных полупроводниковых соединений. Кроме того, разработанные однопереходные ФЭП на основе GaInP, GaInAs и Ge могут применяться в качестве фотодетекторов различного спектрального диапазона, в частности, для преобразования лазерного излучения.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Для GaInP/GaInAs/Ge каскадных солнечных элементов сборание фотогенерированных носителей из всех эмиттерных слоев на уровне 95% достигается при трехкратном превышении диффузионной длины над толщиной слоя, для базовых слоев GaInP и GaInAs субэлементов сборание на уровне 95% достигается при двукратном превышении диффузионной длины над толщиной слоя, а для полубесконечного базового слоя в подложке Ge максимальное сборание на уровне порядка 92% достигается при диффузионной длине неосновных носителей более 100 мкм.

2. При выращивании гетероструктур GaAs ФЭП методом МОС-гидридной эпитаксии с использованием атомов кремния и цинка в качестве донорной и акцепторной примеси соответственно, лучшими фотовольтаическими параметрами обладает структура $p-n$ полярности, так как при высоких уровнях легирования ($\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$) p -GaAs слои обладают большими диффузионными длинами, по сравнению с n -GaAs слоями, а при низких уровнях легирования ($< 10^{17} \text{ см}^{-3}$) – меньшими.

3. Для GaInP субэлементов $p-n$ полярности возникает потенциальный барьер на гетерограницах контактный слой/широкозонное окно/эмиттер, связанный с большим разрывом валентной зоны ΔE_v для p -GaAs/ p -AlInP и p -AlInP/ p -GaInP интерфейсов, значительно уменьшающий транспорт основных носителей, при этом для структуры $n-p$ полярности аналогичный барьер не ограничивает транспорт основных носителей вследствие меньшего разрыва зоны проводимости ΔE_c для n -GaAs/ n -AlInP и n -AlInP/ n -GaInP интерфейсов.

4. Использование в гетероструктурах GaInP/GaInAs/Ge КСЭ функциональных широкозонных слоев p -(Al_xGa_{1-x})_{0,52}In_{0,48}P не приводит к возникновению потенциального барьера из-за разрыва валентной зоны ΔE_v для p -AlGaAs/ p -AlGaInP интерфейсов, препятствующего транспорту основных носителей при « x » $\leq 25\%$.

5. Обнаружена встречная фотоЭДС в GaInP/GaInAs/Ge КСЭ, возникающая при разделении носителей, фотогенерированных в слоях базы и ТПБ GaInP субэлемента, верхним туннельным диодом, и показано, что использование слоев $p\text{-(Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0,52}\text{In}_{0,48}\text{P}$ при $\langle x \rangle > 20\%$ в качестве ТПБ GaInP субэлемента позволяет нивелировать встречную фотоЭДС за счет значительного уменьшения поглощения фотонов в этом слое.

6. Использование слабо поглощающих широкозонных эмиттерных слоев $n\text{-AlInP}$, $n\text{-GaInP}$ или $n\text{-AlGaAs}$ в составе GaInAs субэлемента вместо эмиттерного слоя $n\text{-GaInAs}$, позволяющее уменьшить рекомбинационные потери, приводит к увеличению КПД GaInAs субэлемента в случае, когда время жизни неосновных носителей в базовом слое $p\text{-GaInAs}$ составляет более 10 нс; при этом высокая плотность состояний на гетерограницах $n\text{-AlInP}/p\text{-GaInAs}$ и $n\text{-AlGaAs}/p\text{-GaInAs}$ не приводит к падению КПД, что обусловлено особенностями зонных диаграмм.

Апробация работы. Результаты, вошедшие в диссертационную работу, опубликованы в реферируемых российских и международных журналах, главе в монографии, патентах РФ и докладывались на 19 российских и международных конференциях.

Публикации. По результатам исследований, составляющих содержание диссертации, опубликовано 19 печатных работ в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК, 1 глава в монографии, 12 патентов РФ, 30 трудов конференций и тезисов докладов. Список работ размещен в конце автореферата на странице 19.

Личный вклад автора. Все результаты работы, нашедшие отражение в научных положениях и заключении диссертации, получены автором лично. В исследованиях диссертанту принадлежит постановка и проведения экспериментов по МОС-гидриднему эпитаксиальному выращиванию структур ФЭП, построение моделей и электрических эквивалентных схем для описания характеристик фотопреобразователей, обработка и анализ

полученных данных, выработка предложений по улучшению структур и повышению характеристик ФЭП, подготовка и написание статей.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитированной литературы, содержит 173 страницы, включая 75 рисунков и 10 таблиц. Список цитированной литературы содержит 130 наименований.

Содержание работы.

Во **введении** обоснована актуальность проводимых исследований, сформулирована цель, научная новизна и практическая значимость работы, перечислены основные научные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 посвящена обзору каскадных ФЭП различного назначения и МОС-гидридной технологии роста фотопреобразовательных структур. Использование нескольких *p-n* переходов в конструкциях СЭ впервые упоминалось в 1955 году [1]. Они представляли собой механически стыкованные структуры на основе материалов AlSb, Si и GaSb. При механической стыковке тыльный контакт верхнего элемента является не сплошным для обеспечения прохождения света в нижний элемент. В результате исследований к 2004 году на механически стыкованных СЭ GaInP/GaAs-GaSb была достигнута эффективность преобразования около 40% [2]. Первый монокристаллический двухпереходный элемент AlGaAs/InGaAs с туннельным диодом между двумя фоточувствительными *p-n* переходами был запатентован в 1978 году [3]. В 80-е годы прогресс в создании многопереходных элементов в первую очередь был связан с развитием новых ростовых технологий, из которых наиболее перспективным оказался метод МОС-гидридной эпитаксии. В 1994 году был создан двухпереходный СЭ на основе структуры GaInP/GaAs, который обладал эффективностью в 29.5% [4] при одном солнце для AM1.5 и 23.7% для AM0, а в 1996 году трехпереходный на основе GaInP/GaAs/Ge с КПД 25.7% для спектра AM0 [5]. К 2006 году на монокристаллических трехпереходных *n-p* GaInP/GaInAs/Ge СЭ были

достигнуты эффективности преобразования солнечного излучения, составившие 40.7% для наземного спектра (AM1.5D) и 31% для космического спектра (AM0) [6, 7]. В настоящее время, несмотря на существующие тенденции увеличения числа p - n переходов в КСЭ [8, 9], основой промышленного производства является структура GaInP/GaInAs/Ge, выращиваемая методом МОС-гидридной эпитаксии, ввиду целого ряда преимуществ.

Главы 2 — 4 посвящены изложению оригинальных результатов, полученных в диссертационной работе.

Глава 2. В ней представлены результаты исследований однопереходных ФЭП на основе Ge, GaAs и GaInP. Проведены расчеты спектральных характеристик таких ФЭП. Расчет основывался на решении системы уравнений Пауссона и непрерывности для режима короткого замыкания с функцией генерации экспоненциального вида. При этом амплитуда падающей в субэлемент световой волны находилась посредством решения системы уравнений Максвелла для многослойной структуры в формализации его методом матриц Абелеса.

Аппроксимация спектральных характеристик ФЭП позволила установить зависимости диффузионных длин неосновных носителей заряда (ННЗ) в слоях p -Ge, p -GaAs и n -GaAs от уровня легирования (рис. 1а) Было показано, что диффузионная длина в 100 мкм для p -Ge достигается при уровне легирования подложки $\sim 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ или менее. При высоких уровнях легирования ($\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$) p -GaAs слои обладали большими диффузионными длинами, по сравнению с n -GaAs, а при низких ($< 10^{17} \text{ см}^{-3}$) – меньшими, что обуславливает наибольшую перспективность GaAs ФЭП p - n полярности с сильно легированным эмиттером из p -GaAs и слабо легированной базой из n -GaAs.

Экспериментально показана возможность получения эффективных ФЭП на основе Ge при использовании диффузии атомов цинка в подложку n -типа и диффузии атомов фосфора в подложку p -типа. Однако лучшими

параметрами обладали ФЭП *n-p* полярности, создаваемые на основе *p-Ge* подложки.

Рассчитаны коэффициенты сбора носителей из эмиттерных и базовых слоев субэлементов GaInP/GaAs/Ge КСЭ *n-p* полярности (рис. 1б). Показано, что зависимости коэффициентов сбора, за исключением полубесконечной базы Ge субэлемента, укладываются в две группы. Для всех трех типов эмиттеров сбор порядка 95% достигается при трехкратном превышении диффузионной длины над толщиной слоя. При этом сбор на уровне 95% для баз GaAs и GaInP субэлементов достигается уже при двукратном превосходстве диффузионной длины над толщиной слоя, потому что в слоях эмиттеров основная доля неравновесных носителей генерируется на максимальном удалении от перехода, в то время как в базе – близки от него. Для полубесконечной базы в *p-Ge* подложке увеличение диффузионной длины не позволяет обеспечить полное сбор, достигая 92.4% при диффузионной длине в 100 мкм и практически не меняясь впоследствии из-за возможности диффузии носителей к тыльной стороне подложки с их последующей рекомбинацией.

Экспериментально показано, что при создании GaInP ФЭП *p-n* полярности возникает потенциальный барьер на границах контактный слой/широкозонное окно/эмиттер, проявляющийся в «хвостах» на ВАХ и в падении КПД. С использованием программы AFORS-HEТ v2.4.1 проведено численное моделирование структур GaInP ФЭП и установлено, что ухудшение характеристик ФЭП *p-n* полярности связано с большими разрывами валентной зоны ΔE_v для GaAs/AlInP и AlInP/GaInP интерфейсов *p-n* структуры, которые приводят к формированию высокого потенциального барьера (около 0.54 эВ) для дырок. Для структуры *n-p* полярности барьер для основных носителей (электронов), проходящих через слой широкозонного окна, не превышает 0.15 эВ и не ограничивает их транспорт. При этом для GaInP ФЭП *n-p* полярности особенности зонной диаграммы приводят к тому, что при увеличении плотности дефектов на интерфейсе окно/эмиттер дырки

оттягиваются от границы под действием электрического поля, что ведет к снижению скорости рекомбинации и к меньшей чувствительности к дефектам.

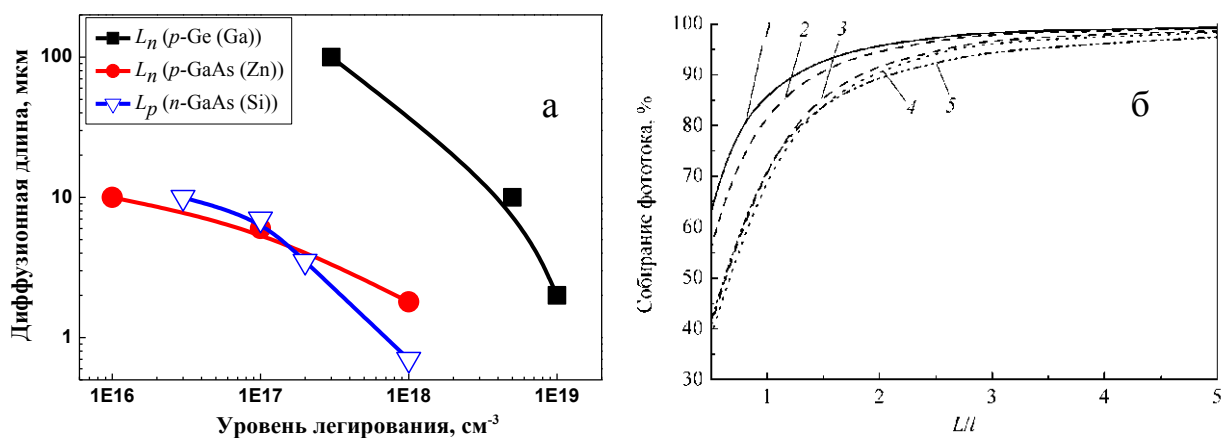


Рис. 1 а) Зависимости диффузионных длин для ННЗ p-Ge, n-GaAs и p-GaAs слоев от уровня легирования. б) Собираение фототока из различных слоев GaInP/GaAs/Ge СЭ от отношения диффузионной длины неосновных носителей в данном слое (L) к его толщине (l): 1 – p-GaAs база, 2 – p-GaInP база, 3 – n-GaInP-эмиттер, 4 – n-Ge-эмиттер, 5 – n-GaAs-эмиттер.

Глава 3. Описанные в главе 2 особенности однопереходных субэлементов КСЭ выявили перспективность разработки структуры GaInP/GaInAs/Ge $n-p$ полярности. Это связано в первую очередь со сложностью создания эффективного субэлемента GaInP $p-n$ полярности, который значительно ограничивает КПД GaInP/GaInAs/Ge ФЭП. Кроме того, большей эффективностью обладают и ФЭП на основе Ge $n-p$ полярности. В данной главе рассмотрены различные виды оптических и электрических потерь в структурах GaInP/GaInAs/Ge КСЭ, а также пути нивелирования таких потерь.

Проведены расчеты спектральных характеристик и коэффициентов вхождения света в субэлементы GaInP/GaInAs/Ge КСЭ. Показано, что использование нуклеационного слоя GaInP с оптимальной толщиной (170-180 нм) приводит к дополнительному возрастанию фототока Ge субэлемента на величину порядка 1.5 мА/см² за счет уменьшения отражения света от поверхности Ge субэлемента; повышенное пропускание в области

чувствительности GaInAs субэлемента, достигается уменьшением отражения за счет использования оптимизированных толщин широкозонного окна ($\text{Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$ - 100 нм, $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ - 110 нм, $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ - 115 нм), что позволяет повысить ток короткого замыкания на величину порядка 0.5 мА/см^2 .

Обнаружен загиб зависимости напряжения холостого хода от плотности падающего излучения для КСЭ на основе GaInP/GaAs/Ge (рис. 2а), что было обусловлено наличием встречного фото-ЭДС. Составлена эквивалентная схема, позволяющая описать данные процессы, разработана математическая модель для выявления природы встречной фото-ЭДС и проведено численное моделирование. Наблюдаемое встречное фото-ЭДС возникало в верхнем туннельном диоде и было связано с заметным поглощением фотонов в слое ТПБ p -GaInP. Для нивелирования встречного фото-ЭДС был использован слой p - $(\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8})_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}$ в качестве ТПБ верхнего субэлемента, который эффективно препятствовал выходу носителей, генерированных в базе GaInP субэлемента в туннельный диод.

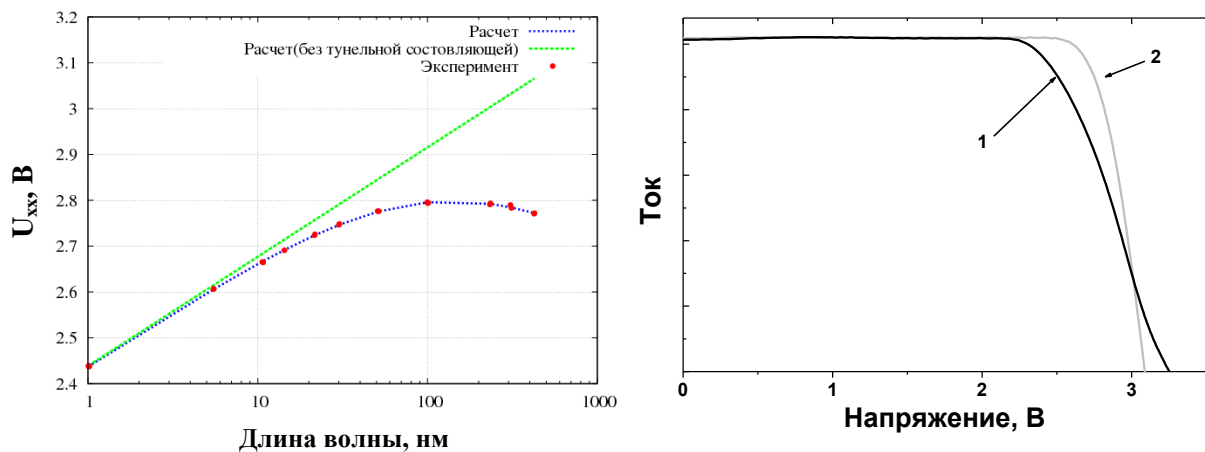


Рис. 2 а) Численный расчет зависимости напряжения холостого хода от степени концентрирования солнечного излучения. б) Экспериментально полученные нагрузочные характеристики GaInP/GaInAs/Ge КСЭ, 1 - с нижним туннельным диодом, включающим p^+ -AlGaInP барьер; 2 - с нижним туннельным диодом, включающим p -GaInP барьер (1000 солнц AM1.5D).

Было обнаружено наличие «хвостов» на ВАХ исследуемых КСЭ, связанное с p/p изотипным гетеропереходом между фосфидными и

арсенидными, возникающим при использовании $p-(Al_{0.3}Ga_{0.7})_{0.52}In_{0.48}P$ широкозонного слоя в нижнем туннельном диоде (рис. 2б).

Численное моделирование зонных диаграмм и ВАХ КСЭ с различными конструкциями нижнего туннельного диода с использованием программы AFORS-HET показало, что барьер для протекания основных носителей возникает именно на границе раздела изотипных гетеропереходов $p-AlGaInP/p-Al_{0.4}Ga_{0.6}As$. Предложено и реализовано использование слоя $p-GaInP$ в качестве ТПБ среднего $GaInAs$ субэлемента, являющегося одновременно широкозонным барьером для нижнего туннельного диода. Показано, что в случае использования слоя $p-(Al_xGa_{1-x})_{0.52}In_{0.48}P$ при «х» меньше 25% высота барьера для дырок на гетеропереходе оказывается достаточно мала, чтобы обеспечить эффективный транспорт носителей.

Глава 4. В ней рассматриваются фотоэлектрические параметры созданных ФЭП с оптимизированной структурой и возможности дальнейшего улучшения этих параметров. Были созданы однопереходные германиевые ФЭП $n-p$ полярности с КПД 10.29% (AM0), и показано, что при выращивании на подложке Ge верхних субэлементов КСЭ происходит заглубливание диффузионного перехода в подложке со 140 нм для однопереходного ФЭП до 500 нм для $GaAs/Ge$ двухпереходного ФЭП и до 700 нм для трехпереходного $GaInP/GaInAs/Ge$ КСЭ. При этом значение диффузионной длины в эмиттере не изменяется и составляет 400 нм. Были созданы $GaAs$ ФЭП $p-n$ и $n-p$ полярностей с КПД 25.33% и 23.42 (AM1.5D) соответственно. Как и в случае субэлементов на основе Ge, диффузионная длина в эмиттере $GaInAs$ субэлементов менялась от 500 нм для однопереходного ФЭП до 300 нм для двух- и трехпереходных КСЭ на основе $GaInP/GaAs$ и $GaInP/GaInAs/Ge$, а в базах от 10 мкм для однопереходной структуры до 8 мкм для $GaInP/GaAs$ и до 4 мкм для $GaInP/GaInAs/Ge$ КСЭ.

КПД двухпереходных КСЭ на основе $GaInP/GaAs$, согласованных по току для спектров AM0 и AM1.5D, составил 27.2% и 30% соответственно. Получены трехпереходные $GaInP/GaInAs/Ge$ КСЭ, оптимизированные для

преобразования прямого космического и концентрированного наземного спектров. Такие КСЭ продемонстрировали КПД 30% при освещении космическим спектром AM0 и 40% при концентрации 500 солнц (AM1.5D).

При помощи моделирования с использованием программы AFORS-NET показано, что для среднего субэлемента, выполненного с эмиттерным слоем GaAs, низкие значения времени жизни неосновных носителей заряда приводят к их рекомбинации, что выражается в падении напряжения и тока, генерируемых средним переходом. При этом использование широкозонных эмиттерных слоев AlInP, GaInP или AlGaAs позволяет значительно сократить эти потери. Однако, в случае, когда время жизни ННЗ в базе (τ_b) не превосходит 10 нс, КПД ограничен временем жизни базового слоя, и анизотипный гетеропереход не дает преимуществ по сравнению с гомопереходом (рис. 3а). С дальнейшим увеличением времени жизни базы повышение КПД гомоперехода насыщается, т.к. потери переходят в эмиттер, поэтому их КПД зависит от времени жизни в эмиттере (τ_e) (рис. 3а). В то же самое время, КПД для солнечных элементов на основе анизотипных гетеропереходов продолжает монотонно расти с повышением времени жизни в базе и практически не зависит от времени жизни в эмиттере (рис. 3а).

Дефекты на гетерогранице эмиттер/база для n -AlInP/ p -GaInAs и n -AlGaAs/ p -GaInAs гетеропереходов вплоть до плотности состояний на гетероинтерфейсе $D_{it}=10^{11} \text{ см}^{-2}\cdot\text{эВ}^{-1}$ не влияют на значения U_{xx} и η (рис. 3б), в то время как субэлемент на основе n -GaInP/ p -GaInAs гетероперехода обладает намного более высокой чувствительностью к плотности поверхностных состояний (рис. 3б) и значительное сокращение U_{xx} и η наблюдается уже при $D_{it}=10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$.

Таким образом, использование анизотипных гетеропереходов при величинах времени жизни в базовом слое порядка 10^{-8} сек и в эмиттерном слое порядка 10^{-11} сек позволяет увеличить КПД ФЭП на величину порядка 3%.

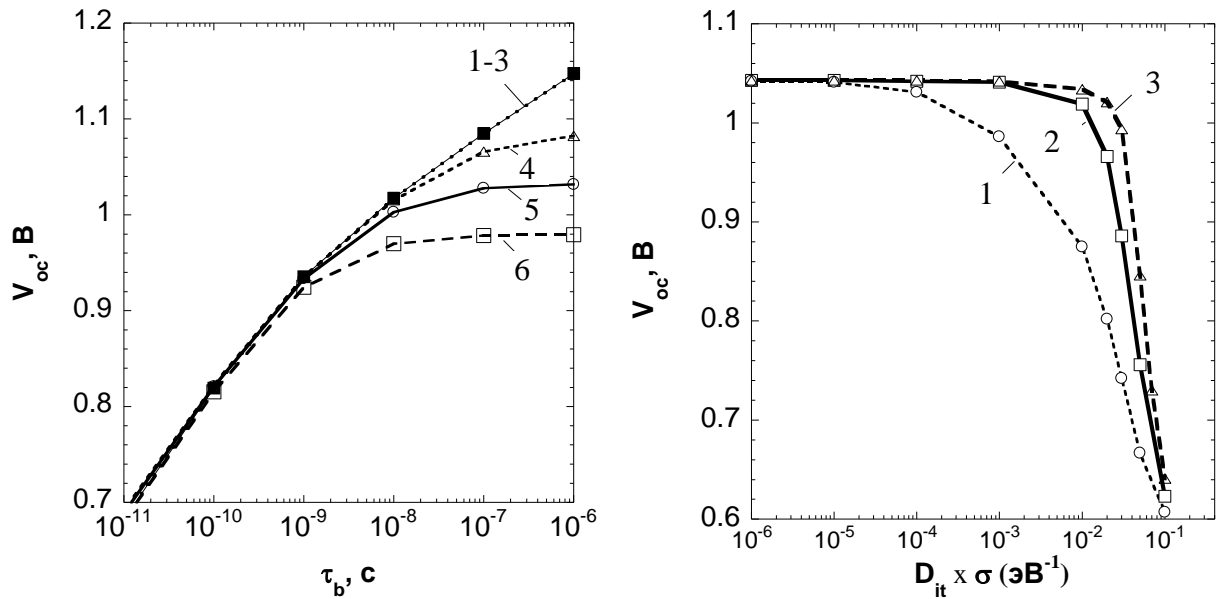


Рис. 3 а) Расчетные зависимости напряжения холостого хода от времени жизни базового слоя (τ_b) для субэлементов на основе 1 - $n\text{-GaInP}/p\text{-GaAs}$, 2- $n\text{-AlInP}/p\text{-GaAs}$, 3- $n\text{-Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}/p\text{-GaAs}$ и гомоперехода $n\text{-}p$ GaAs при времени жизни в эмиттере 4 - 1 нс, 5- 0.1 нс, 6- 0.01 нс. б) Расчетные зависимости напряжения холостого хода от произведения плотности поверхностных состояний и площади сечения захвата ($D_{it} \times \sigma$) на границе раздела для субэлементов на основе 1- $n\text{-GaInP}/p\text{-GaAs}$, 2 - $n\text{-AlInP}/p\text{-GaAs}$, 3 - $n\text{-Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}/p\text{-GaAs}$ гетеропереходов.

В заключении сформулированы общие результаты работы:

1. Проведены расчеты коэффициентов сбора фотогенерированных носителей из слоев эмиттеров и баз для КСЭ на основе GaInP/GaInAs/Ge, установлена разница сбора носителей из базы и эмиттера ФЭП на основе германия. Показано, что для всех эмиттеров сбор порядка 95% достигается при трехкратном превышении диффузионной длины над толщиной слоя, а сбор в 95% для баз GaAs и GaInP субэлементов достигается уже при двукратном превосходстве диффузионной длины над толщиной слоя. Сделан вывод о преимуществе GaAs $p\text{-}n$ полярности, ввиду того, что при высоких уровнях легирования ($\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$) $p\text{-GaAs}$ слои обладают большими диффузионными длинами, по сравнению с $n\text{-GaAs}$, а при низких ($< 10^{17} \text{ см}^{-3}$) $p\text{-GaAs}$ слои обладают меньшими диффузионными длинами, по сравнению с $n\text{-GaAs}$.

2. Проведено численное моделирование структур GaInP ФЭП и установлено, что падение характеристик ФЭП p - n полярности связано с большим разрывом валентной зоны ΔE_v для GaAs/AlInP и AlInP/GaInP интерфейсов p - n структуры, что приводит к формированию высокого потенциального барьера (около 0,54 эВ) для дырок. При этом для структуры n - p полярности барьер для основных носителей (электронов), проходящих через слой широкозонного окна, не превышает 0,15 эВ, и не ограничивает их транспорт. Показано, что для GaInP ФЭП n - p полярности особенности зонной диаграммы приводят к тому, что при увеличении плотности дефектов на интерфейсе окно/эмиттер дырки оттягиваются от границы под действием электрического поля. Предложено использование слоя p -GaInP в качестве ТПБ среднего GaInAs субэлемента, и показано, что в случае использования слоя p - $(Al_xGa_{1-x})_{0,52}In_{0,48}P$ при «х» меньше 25% высота барьера для дырок на гетеропереходе оказывается достаточно мала, чтобы обеспечить эффективный транспорт носителей.

3. Показано, что использование нуклеационного слоя GaInP с оптимальной толщиной GaInP слоя (170-180 нм) приводит к дополнительному возрастанию фототока Ge субэлемента на величину порядка $1,5 \text{ mA/cm}^2$ за счет уменьшения отражения света от поверхности Ge субэлемента, при этом теоретически оптимизированы оптические потери в структурах КСЭ, что позволило повысить фототок, генерируемый средним GaInAs субэлементом на величину порядка 2.5 mA/cm^2 .

4. Обнаружен загиб на зависимости напряжения холостого хода от плотности падающего излучения для КСЭ на основе GaInP/GaAs/Ge, что было обусловлено наличием встречного фото-ЭДС, возникающего в структуре КСЭ из-за присутствия туннельных диодов, представляющих собой встречно включенные p - n переходы, что было подтверждено численным моделированием. Было показано, что наблюдаемое встречное фотоЭДС возникает в верхнем туннельном диоде и связано с заметным поглощением фотонов в слое тыльного потенциального барьера (ТПБ) p -

GaInP, и предложено использование слоя $p\text{-(Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8})_{0,52}\text{In}_{0,48}\text{P}$ в качестве ТПБ верхнего субэлемента для нивелирования встречного фотоЭДС.

5. Показано, что при выращивании на подложке Ge верхних субэлементов КСЭ происходит заглубливание диффузионного перехода в подложку со 140 нм для однопереходного ФЭП к 500 нм для GaAs/Ge двухпереходного ФЭП и до 700 нм для трехпереходного GaInP/GaInAs/Ge КСЭ. При этом значение диффузионной длины в эмиттере не изменяется и составляет 400 нм. В случае GaInAs субэлементов в эмиттере диффузионная длина уменьшалась от 500 нм для однопереходного ФЭП до 300 нм для двух- и трехпереходных КСЭ на основе GaInP/GaAs и GaInP/GaInAs/Ge, а в базах от 10 мкм для однопереходной структуры, до 8 мкм для GaInP/GaAs и до 4 мкм для GaInP/GaInAs/Ge КСЭ.

6. Показано, что для среднего субэлемента, выполненного с сильно легированным эмиттерным слоем GaAs или GaInAs, низкие значения времени жизни неосновных носителей заряда приводят к рекомбинации значительного количества фотогенерированных носителей, что выражается в падении напряжения и тока, генерируемых средним переходом. Предложено использование широкозонных эмиттерных слоев AlInP, GaInP или AlGaAs для сокращения рекомбинационных потерь. При этом при величинах времени жизни в базовом слое (τ_b) порядка 10^{-8} сек и в эмиттерном слое (τ_e) порядка 10^{-11} сек, использование гетеропереходов, приводящее к сокращению рекомбинационных потерь в эмиттерном слое, позволяет увеличить КПД ФЭП на величину порядка 3%.

Публикации по теме диссертации

Публикации в периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК:

- A1. V. M. Lantratov, N. A. Kalyuzhnyy, S. A. Mintairov, N. Kh. Timoshina, M. Z. Shvarts and V. M. Andreev, High-efficiency dual-junction GaInP/GaAs tandem solar cells obtained by the method of MOCVD, // *Semiconductors* vol.41, (2007) #6, pp. 727-731.
- A2. A.S. Gudovskikh, N.A. Kaluzhniy, V.M. Lantratov, S.A. Mintairov, M.Z. Shvarts, V.M. Andreev, Numerical modelling of GaInP solar cells with AlInP and AlGaAs windows // *Thin Solid Films*, v.516 (2008), 20 pp: 6739-6743.
- A3. A.S. Gudovskikh, R. Chouffot, J.P. Kleider, N.A. Kaluzhniy, V.M. Lantratov, S.M. Mintairov, J. Damon-Lacoste, D. Eon, P. Roca i Cabarrocas, P. Ribeyron, New method for interface characterization in heterojunction solar cells based on diffusion capacitance measurements, // *Thin Solid Films*, v.516 (2008), 20 pp: 6786-6790.
- A4. С.А. Блохин, А.В. Сахаров, А.М. Надточий, А.С.Паюсов, М.В. Максимов, Н.Н. Леденцов, А.Р. Ковш, С.С. Михрин., В.М. Лантратов, С.А. Минтаиров, Н.А. Калюжный. М.З. Шварц, Фотоэлектрические преобразователи AlGaAs/GaAs с массивом квантовых точек InGaAs, // 2009, ФТП, т.43, 4 страницы: 537-542.
- A5. В.М. Емельянов, С.А. Минтаиров, Н.А. Калюжный, В.М. Лантратов, Внешний квантовый выход фотоответа каскадных солнечных элементов, // 2009, НТВ СПбГУ, т.2(77) стр.:14-23.
- A6. A.S. Gudovskikh, N.A. Kalyuzhnyy, V.M. Lantratov, S.A. Mintairov, M.Z. Shvarts, V.M. Andreev, Свойства границ раздела в солнечных элементах на основе GaInP, // *Физика и техника полупроводников* (2009) Vol. 43, No. 10, pp. 1403-1408.
- A7. A.S. Gudovskikh, J. P. Kleider, R. Chouffot, N.A. Kalyuzhnyy, S.A. Mintairov, and V.M. Lantratov, III-phosphides heterojunction solar cell interface properties from admittance spectroscopy, // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 42 (2009) 165307 (9pp).
- A8. A.S. Gudovskikh, J. P. Kleider, N.A. Kalyuzhnyy, V.M. Lantratov, S.A. Mintairov, Band structure at heterojunction interfaces of GaInP solar cells, // *Solar Energy Materials & Solar Cells* 94 (2010) pp.1953–1958.
- A9. S.A. Mintairov, V.M. Andreev, VM, V.M. Emelyanov, N.A. Kalyuzhnyy, N.K. Timoshina, M.Z. Shvarts, V.M.Lantratov, Study of minority carrier diffusion lengths in photoactive layers of multijunction solar cells, // *Semiconductors* (2010,) v.44, 8 pp: 1084-1089.
- A10. Н.А. Калюжный, А.С. Гудовских, В.В. Евстропов, Лантратов, В.М. С.А. Минтаиров, Н.Х. Тимошина, М.З. Шварц, В.М. Андреев Германиевые субэлементы для многопереходных фотоэлектрических преобразователей GaInP/GaInAs/Ge, // *ФТП*, 44 (11), 1568-1576 (2010).

- A11. В.М. Емельянов, Н.А. Калюжный, С.А. Минтаиров, М.З. Шварц, В.М. Лантратов Многопереходные солнечные элементы с брэгговскими отражателями на основе структур GaInP/GaInAs/Ge, // ФТП, 44 (12), 1649-1654 (2010).
- A12. V. M. Lantratov, V. M. Emelyanov, N. A. Kalyuzhnyy, S. A. Mintairov, M. Z. Shvarts. Improvement of radiation resistance of Multijunction GaInP/Ga(In)As/Ge solar cells with application of Bragg reflectors, // Advances in Science and Technology Vol. 74 (2010) pp 225-230.
- A13. A.S. Gudovskikh, K.S. Zelentsov, N.A.Kalyuzhnyy, V.M. Lantratov, S.A. Mintairov, J.P.Kleider, Characterization of GaInP/Ge heterostructure solar cells by capacitance measurements at forward bias under illumination, // Energy Procedia, v.3, pp. 76-83, 2011 ELSEVIER.
- A14. М.А. Минтаиров, В.В. Евстропов, Н.А. Калюжный, С.А. Минтаиров, Н.Х. Тимошина, М.З. Шварц, В.М. Лантратов, Фотоэлектрическое определение последовательного сопротивления многопереходных солнечных элементов, // ФТП, 46 (8), стр.1074-1081 (2012).
- A15. A S Gudovskikh , K S Zelentsov , N A Kalyuzhnyy , V V Evstropov , V M Lantratov and S A Mintairov, Interface properties of GaInP/Ge hetero-structure sub-cells of multi-junction solar cells, //J. Phys. D: Appl. Phys. 45 (2012) 495305 (бпр).
- A16. М.А. Минтаиров, В.В. Евстропов, Н.А. Калюжный, С.А. Минтаиров, Н.Х. Тимошина, М.З. Шварц, В.М. Р.А. Салий, В.М. Лантратов Разностный способ получения темновой вольт-амперной характеристики и ее виды для остаточной (негенерирующей) части многопереходного солнечного элемента, // 2014, ФТП, т.48, 5 страницы: 671-676
- A17. N. A. Kalyuzhnyy, V. V. Evstropov, V. M. Lantratov, S. A. Mintairov, M. A. Mintairov, A. S. Gudovskikh, A. Luque, and V. M. Andreev, Characterization of the Manufacturing Processes to Grow Triple-Junction Solar Cells, // International Journal of Photoenergy, vol. 2014 (2014).
- A18. М.А.Минтаиров, В.В.Евстропов, С.А.Минтаиров, Н.Х.Тимошина, М.З.Шварц, Н.А.Калюжный, Оценка потенциальной эффективности многопереходного солнечного элемента при предельном балансе фотогенерированных токов // ФТП, 2015, т. 49, выпуск 5, стр.682-687.

Главы в монографиях:

- A19. A. S. Gudovskikh, N. A. Kalyuzhnyy, S. A. Mintairov, V. M. Lantratov, Chapter 18. Interfaces in III–V High Efficiency Solar Cells, В книге (сборнике): High-Efficiency Solar Cells. Physics, Materials, and Devices Springer Series in Materials Science, v.190, pp: 545-570, 2014 656 стр., SPRINGER INTERNATIONAL PUBLISHING ISSN: 0933-033X ISBN: 978-3-319-01987-1

Патенты РФ:

- A20. В.М. Андреев, Н.А. Калюжный, В.М. Лантратов, С.А. Минтаиров Многослойный фотопреобразователь, RU 2364007 С1, Опубликовано: 10.08.2009
- A21. В.М. Андреев, Н.А. Калюжный, В.М. Лантратов, С.А. Минтаиров Способ получения структуры многослойного фотоэлектрического преобразователя, RU 2366035 С1, Опубликовано: 27.08.2009,
- A22. В.М. Андреев, Н.Д. Ильинская, Н.А. Калюжный, В.М. Лантратов, С.А. Минтаиров, А.В. Малевская Способ изготовления чипов многослойных фотопреобразователей, RU 2368038 С1, Опубликовано: 20.09.2009, Бюл. № 26.
- A23. В.М. Андреев, Н.Д. Ильинская, Н.А. Калюжный, В.М. Лантратов, С.А. Минтаиров, А.В. Малевская Способ изготовления фотоэлектрических преобразователей на основе многослойной структуры, RU 2354009 С1, Опубликовано: 27.04.2009, Бюл. № 12
- A24. В.М. Андреев, Н.А. Калюжный, В.М. Лантратов, С.А. Минтаиров, В.М. Емельянов Каскадный фотопреобразователь и способ его изготовления, RU 2382439 С1, Опубликовано: 20.02.2010
- A25. В.М. Андреев, Н.Д. Ильинская, Н.А. Калюжный, В.М. Лантратов, С.А. Минтаиров, А.В. Малевская Способ изготовления чипов фотоэлектрических преобразователей, RU 2391744 С1, Опубликовано: 10.06.2010 Бюл. № 16
- A26. Андреев В.М., Ильинская Н.Д., Калюжный Н. А., Лантратов В.М., Малевская А.В., Минтаиров С.А. «Способ изготовления каскадных солнечных элементов (варианты)», RU 2391745 С1, Опубликовано: 10.06.2010 Бюл. № 16
- A27. Андреев В.М., Ильинская Н.Д., Калюжный Н. А., Лантратов В.М., Малевская А.В., Минтаиров С.А. «Способ получения чипов солнечных фотоэлементов», RU 2419918 С1, Опубликовано: 27.05.2011 Бюл № 15
- A28. В.М. Андреев, Н.А. Калюжный, В.М. Лантратов, Ф.Е.Солдатенков, А.А. Усикова Способ формирования контакта для наногетероструктуры фотоэлектрического преобразователя на основе арсенида галлия, RU 2428766 С1, Опубликовано: 10.09.2011 Бюл. № 25
- A29. В.М. Андреев, Н.А. Калюжный, В.М. Лантратов, С.А. Минтаиров, А.С. Гудовских Многопереходный преобразователь, RU 24442242 Опубликовано: 10.02.2012.
- A30. Андреев В.М., Калюжный Н.А., Лантратов В.М., Минтаиров С.А. «Концентраторный каскадный фотопреобразователь» RU 2515210 С1, Опубликовано: 10.09.2011 Бюл. № 25
- A31. В.М. Андреев, Н.А. Калюжный, В.М. Лантратов, С.А. Минтаиров Многопереходный солнечный элемент RU 2539103 С1, Опубликовано: 10.01.2015 Бюл. № 1

Тезисы докладов и труды конференций:

- A32. С.А. Минтаиров Солнечные элементы на основе AlGaAs с Брегговскими зеркалами, // Тез. Докл. на II-й Всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике, 4-8 декабря 2000г, НОЦ ФТИ
- A33. V.M. Andreev, I.V. Kochnev, V.M. Lantratov, S.A. Mintairov, V.D. Rummyantsev, M.Z. Shvarts Ultra-violet Sensitive Infra-red Reflective AlGaAs/GaAs Solar Cells With Two Bragg Reflectors, // Proceedings of the 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Glasgow, May 2000.
- A34. M.Z. Shvarts, P.Y. Gazaryan, N.A. Kaluzhniy, V.P. Khvostikov, V.M. Lantratov, S.A. Mintairov, S.V. Sorokina, N.K. Timoshina, InGaP/GaAs-GaSb and InGaP/GaAs/Ge-InGaAsSb Hybrid Monolithic/Stacked Tandem Concentrator Solar Cells // Proceedings of the 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference, Dresden, Germany, 4-8 September, 2006, pp133-136.
- A35. V.M. Andreev, N.A. Kalyuzhnyy, V.M. Lantratov, S.A. Mintairov, M.Z. Shvarts, N.K. Timoshina, Concentrator GaInP/GaAs tandem solar cells with in-situ monitoring of the MOCVD growth, // Proceedings of the 22th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Milan, Italy, 3-7 September, 2007, pp542-547.
- A36. V.S. Kalinovsky, V.M. Andreev, V.V. Evstropov, N.A. Kaluzhniy, V.P. Khvostikov, V.M. Lantratov & S.A. Mintairov, Current Flow Mechanisms and Potential Efficiency of Single- and Multi-Junction Solar Cells, // Proceedings of the 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Milan, Italy, 3-7 September 2007, pp. 675-679.
- A37. N.A. Kalyuzhnyy, V.M. Lantratov, S.A. Mintairov, M.A. Mintairov, M.Z. Shvarts, N.Kh. Timoshina and V.M. Andreev, In-situ monitoring during mocvd growth of the triple-junction GaInP/Ga(In)As/Ge solar cells, // Proceedings of the 23th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia, Spain, 1-5 September, 2008, pp.803-810.
- A38. V.S. Kalinovsky, V.V. Evstropov, N.A. Kaluzhniy, V.M. Lantratov, S.A. Mintairov and V.M. Andreev, Structure of the dark I-V characteristic of multijunction solar cells and their efficiency, Proceedings of the 23th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia, Spain, 1-5 September, 2008, pp. 773-776.
- A39. V.M. Andreev, V.M. Emelyanov, N.A. Kalyuzhnyy, V.M. Lantratov, S.A. Mintairov, M.Z. Shvarts, N.K. Timoshina., Rated external quantum efficiency of III-V multijunction solar cells, Proceedings of the 23th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia, Spain, 1-5 September, 2008, pp.375-380.
- A40. A.S. Gudovskikh, J. P. Kleider, R. Chouffot, N.A. Kalyuzhnyy, V.M. Lantratov, S.A. Mintairov, Study of GaInP heterojunction solar cell interface properties by admittance spectroscopy, Proceedings of the 23th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia, Spain, 1-5 September, 2008, pp.358-353.

- A41. М.А. Минтаиров, С.Б. Мусалинов, Особенности фотоэлектрических свойств многопереходных (InGaP/GaAs и InGaP/GaAs/Ge) монокристаллических солнечных элементов при концентрированном солнечном освещении. // Тезисы 10-й всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектроник, СПб, 1-5 декабря 2008.
- A42. N.A. Kalyuzhnyy, S.A. Mintairov, M.A. Mintairov & V.M. Lantratov, Investigation of photovoltaic devices crystallization in mocvd with in-situ monitoring, // Proceedings of the 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburg, Germany, 21-25 September, 2009, pp.538-544.
- A43. М.А., Mintairov, V.V. Evstropov, N.A. Kalyuzhnyy, V.S. Kalinovskiy, S.A. Mintairov, V.M. Lantratov Peculiarities of photovoltaic characteristics and equivalent circuits of GaInP/GaAs and GaInP/GaAs/Ge multijunction monolithic solar cells, // Catalogue of abstracts of the 3rd Nordic PV Conference Tallinn, Estonia, 18-19 May 2009
- A44. Н.А. Калюжный, Р.А. Салий, С.А. Минтаиров, В.В. Евстропов Германиевые р-п переходы, сформированные при МОС-гидридной эпитаксии для термофотовольтаических преобразователей и трехпереходных солнечных элементов GaInP/GaAs/Ge, // тезисы докладов конференции по физике и астрономии для молодых ученых Санкт-Петербурга и Северо-запада («Физика.СПб»), 29-30 октября 2009г, стр. 65.
- A45. Р.А. Салий, Н.А. Калюжный, С.А. Минтаиров, В.М. Лантратов, Влияние механизмов протекания тока на эффективность солнечных элементов и термофотопреобразователей на основе германия, // Тез. Докл. XI Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике, 30 ноября- 4 декабря 2009 г., Санкт-Петербург, стр. 105.
- A46. К.С. Зеленцов, Н.А. Калюжный, С.А. Минтаиров, А.С. Гудовских Теоретическая оценка перспективности использования анизотропных гетеропереходов на основе соединений АЗВ5 в каскадных солнечных элементах, // Тез. Докл. XI Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике, 30 ноября- 4 декабря 2009 г., Санкт-Петербург, стр. 104.
- A47. М.А. Минтаиров, В.М. Лантратов, В.В. Евстропов, Н.А. Калюжный, С.А. Минтаиров, Поведение трех-переходных GaInP/GaInAs/Ge СЭ при высоких кратностях концентрирования солнечного освещения, // Тез. Докл. XI Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике, 30 ноября- 4 декабря 2009 г., Санкт-Петербург, стр. 112.

- A48. В.М. Емельянов, С.А. Минтаиров, Н.А. Калюжный, В.М. Лантратов Оптимизация толщин слоев космических GaInP/GaInAs/Ge СЭ для увеличения фототока, // Тез. Докл. XI Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике, 30 ноября- 4 декабря 2009 г., Санкт-Петербург, стр. 116.
- A49. N.A. Kalyuzhnyy, A.S. Gudovskikh, V.V. Evstropov, V.M. Lantratov, S.A. Mintairov, N.Kh. Timoshina, M.Z. Shvarts, V.M. Andreev, Current flow and efficiency of Ge p-n junctions in triple-junction GaInP/Ga(In)As/Ge solar cells for space applications, // Proceedings of the 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Valencia, Spain, 6-10 September, 2010, pp.865-871.
- A50. V.M. Emelyanov, N.A. Kalyuzhnyy, M.A. Mintairov, S.A. Mintairov, M.Z. Shvarts, V.M. Lantratov Distributed resistance effects simulation in concentrator MJ SCs using 3D-network model, // Proceedings of the 25th European PV Solar Energy Conference and Exhibition, Valencia, Spain, 6-10 September 2010, pp: 406-411.
- A51. A.S. Gudovskikh , K.S. Zelentsov , N.A. Kalyuzhnyy, V.M. Lantratov , S.A. Mintairov, Anisotype GaAs based heterojunctions for iii-v multijunction solar cells, // Proceedings of the 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Valencia, Spain, 6-10 September, 2010, pp.865-871.
- A52. A.S. Vlasov, V.P. Khvostikov, L.B. Karlina, S.V. Sorokina, N.S. Potapovich, M.Z. Shvarts, N.Kh. Timoshina, V.M. Lantratov, S.A. Mintairov, N.A. Kalyuzhnyy, E.P. Rakova, V.I. Vasil'ev, V.M. Andreev Spectral splitting CPV modules with AlGaAs/GaAs/GaSb and GaInP/GaAs/InGaAs(P) solar cells, // Proceedings of the 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 5-9 September 2011, Hamburg, Germany, pp. 113-136.
- A53. M.A. Mintairov, V.V. Evstropov, N.A. Kalyuzhnyy, S.A. Mintairov, V.D. Rumyantsev, N.K. Timoshina, M.Z. Shvarts, V.M. Lantratov, Determination of Series Resistance of Multijunction Solar Cells by Using their Photoelectric Characteristic // Proceedings of the 24th European PV Solar Energy Conference and Exhibition, Frankfurt, Germany, 24-28 September 2012, pp: 459-463
- A54. M.Z. Shvarts, E.A. Aronova, V.M. Emelyanov, N.A. Kalyuzhnyy, V.M. Lantratov, S.A. Mintairov, A.A. Soluyanov, N.Kh Timoshina, Multijunction Solar Cell With Intermediate IR Reflector, // 8th International Conference on Concentrating Photovoltaic Systems (CPV-8) Book Series: AIP Conference Proceedings V: 1477 (2012) Pages: 28-31.
- A55. K.S. Zelentsov, A.S. Gudovskikh, N.A. Kalyuzhnyy, V.M. Lantratov, S.A. Mintairov, J. Alvarez, J. P. Kleider. Characterization of the III-V/Ge interface by

- capacitance measurements for III-V multijunction solar cells development // EMRS Spring Meeting, Strasbourg, France , 27-31 May 2013, D.PII. 83
- A56. M.Z. Shvarts, A.S. Gudovskikh, N.A. Kalyuzhnyy, S.A. Mintairov, A.A. Soluyanov, N.Kh. Timoshina, A. Luque High intensity low temperature (HILT) performance of space concentrator GaInP/GaInAs/Ge MJ SCs, // Proceedings of the 10th Int. Conf. on Concentrating Photovoltaics (CPV-10), 7-9 April 2014, Albuquerque, NM, USA. AIP Conf. Proc., v. 1616, 2014, pp. 29-32.
- A57. K.S. Zelentsov, A.S. Gudovskikh, N.A. Kalyuzhnyy, S.A. Mintairov. Study of diffusion processes at the III-V/IV interface in multijunction solar cells // E-MRS Spring Meeting 2014, Lille, France, 26-30 May 2014, X.7-2
- A58. M.A. Mintairov, V.V. Evstropov, N.A. Kalyuzhnyy, S.A. Mintairov, M.Z. Shvarts, N.Kh. Timoshina Photogenerated currents imbalance in MJ SC: IV curve and efficiency variations, // Proceedings of the 10th Int. Conf. on Concentrating Photovoltaics (CPV-10), 7-9 April 2014, Albuquerque, NM, USA
- A59. V.M. Andreev, A. Luque, V.M. Emelyanov, N.A. Kalyuzhnyy, S.A. Mintairov, M.Z. Shvarts, Nanostructured III-V Solar Cells // XII International Conference on Nanostructured Materials (NANO 2014) July 13-18, 2014 Moscow, Russia.
- A60. A.S. Vlasov, V.M. Emelyanov, E.S. Aronova, O.I. Chosta, N.A. Kalyuzhnyy, S.A. Mintairov, M.Z. Shvarts and A.N. Trufanov Radiation resistant III-V photovoltaic converters for ultimate applications, // Proceedings of the 29th European PV Solar Energy Conference and Exhibition, 22-25 September 2014, Amsterdam, The Netherlands.
- A61. A.S. Vlasov, V.M. Emelyanov, E.S. Aronova, O.I. Chosta, N.A. Kalyuzhnyy, S.A. Mintairov, M.Z. Shvarts and A.N. Trufanov Radiation resistant III-V photovoltaic converters for ultimate applications, // Proceedings of the 29th European PV Solar Energy

Список литературы

1. Sharps P.R., Stan M.A., Aiken D. J., Newman F.D., Hills J.S., and Fatemi N.S., High efficiency multi-junction solar cells – past, present, and future” // 19th EPSEC (Paris, France, 7-11 June 2004) pp.3569- 3574.
2. Fraas L.M., Avery J.E., Huang H.X., Shifman E., Edmondson K. and King R.R., Toward 40% and higher solar cells in a new in a new cassegrainian PV module// Proc. of the 31st PVSC, Fl. (Lake Buena Vista, FL, 2005) pp.751-753
3. Lamorte M. F. Cascade solar cells // U.S.Patent 4179702 (December 18, 1979)
4. K. A. Bertness, Sarah R. Kurtz, D. J. Friedman, A. E. Kibbler, C. Kramer, and J. M. Olson. 29.5%-efficient GaInP/GaAs tandem solar cells. Appl. Phys. Lett. 65 (8), 22 August 1994.

5. P. K. Chiang, J. H. Ermer, W. T. Nishikawa, D. D. Krut, D. E. Joslin, J. W. Eldredge and B. T. Cavicchi. Experimental results of GaInP/GaAs/Ge triple junction cell development for space power systems. // PVSC, May E-17, 1996; Washington, D.C.
6. Meusel M., Baur C., Guter W. et al. Development status of European multijunction space solar cells with high radiation hardness // Proc. of the 20th EPSEC (Barcelona, Spain, 2005), p. 20–25.
7. Dimroth F., Baur C., Bett A.W., Meusel M., Strobl G. 3-6 junction photovoltaic cells for space and terrestrial concentrator applications // Proc. of the 31th IEEE PVSC (Lake Buena Vista, FL, 2005) pp. 525-529
8. Dimroth F. , Baur C., Meusel M., S. van Riesen, Bett A.W., 5-Junction III-V Solar Cells For Space Applications // WCPEC-3 (Osaka, Japan, May 11-18, 2003) 30-D9-01.
9. Law D.C., Bhusari D. , Mesropian S. , Boisvert J.C. , Hong W.D. , Boca A. , Larrabee D.C. , Fetzer C.M. , King R.R. and Karam N.H. Semiconductor-bonded III–V multijunction space solar cells // Proc. 34th IEEE PVSC (Philadelphia, PA, 2009) pp. 2237 - 2239