

На правах рукописи

ХВОСТИКОВА ОЛЬГА АНАТОЛЬЕВНА

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ИЗЛУЧЕНИЯ НА
ОСНОВЕ УЗКОЗОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ (GaSb, Ge, InAs).

Специальность 01.04.10 – физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2009

Работа выполнена в учреждении Российской академии наук Физико-техническом институте им. А.Ф.Иоффе РАН.

Научный руководитель:

доктор тех. наук,
профессор

В.М. Андреев
Физико-технический институт
им. А.Ф.Иоффе

Официальные оппоненты:

доктор физ.-мат. наук,
профессор

С.А. Немов
Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет

доктор физ.-мат. наук,
профессор

В.И. Иванов-Омский
Физико-технический институт
им. А.Ф.Иоффе

Ведущая организация:

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
“ЛЭТИ”

Защита состоится “ 21 “ мая 2009 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 002.205.02 в учреждении Российской академии наук Физико-техническом институте им. А.Ф.Иоффе РАН по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФТИ им. А.Ф.Иоффе.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан “ 17 “ апреля 2009 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

доктор физ.-мат. наук: _____ Л.М. Сорокин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

В последнее время в связи с энергетическим кризисом большое внимание уделяется проблеме поиска альтернативных возобновляемых экологически чистых источников энергии. Основным направлением гелиоэнергетики с точки зрения достижения максимально возможных значений КПД является использование каскадных солнечных элементов. В этом случае прирост эффективности осуществляется за счет преобразования длинноволнового излучения солнечного спектра при добавлении в конструкцию фотопреобразователя узкозонного фотоэлемента. В качестве материала для нижнего элемента механически стыкованного каскада могут успешно использоваться такие узкозонные полупроводники, как германий или антимонид галлия.

Помимо солнечных элементов, принцип фотоэлектрического преобразования излучения также реализуется в термофотоэлектрических (ТФЭ) преобразователях. Метод позволяет осуществлять преобразование энергии излучения нагретых тел (эмиттеров) в электроэнергию с помощью полупроводниковых фотоэлементов, чувствительных в инфракрасной области спектра. Этот менее известный способ преобразования излучения несомненно перспективен, потому что ТФЭ генераторы могут работать в условиях, независимых от природных факторов (днем, ночью и в пасмурные дни). Полупроводниковые ТФЭ преобразователи должны иметь ширину запрещенной зоны 0.4-0.8 эВ для эффективного преобразования относительно длинноволнового инфракрасного излучения нагретого эмиттера. ТФЭ генераторы, также как и солнечные энергоустановки, являются перспективными для их использования в качестве автономных, бесшумных и экологически чистых источников электрической энергии.

Таким образом, актуальность настоящей работы определяется необходимостью получения высокоэффективных узкозонных фотопреобразователей, предназначенных для использования в качестве концентраторных солнечных элементов каскадного типа, а также в качестве термофотоэлектрических преобразователей.

Цель настоящей работы заключалась в разработке технологии получения высокоэффективных узкозонных фотоэлементов на основе Ge и GaSb с использованием методов диффузии из газовой фазы и

эпитаксиального выращивания для создания термофотоэлектрических преобразователей и механически стыкованных солнечных элементов.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- определение оптимальных технологических режимов газовой диффузии цинка для формирования *p-n*-перехода в германии.
- исследование технологических условий получения высокоэффективных фотопреобразователей на основе Ge с широкозонным «окном» GaAs с помощью методов эпитаксиального выращивания и диффузии из газовой фазы.
- исследование влияния электрофизических параметров слиткового материала GaSb на рабочие характеристики фотоэлементов.
- исследование влияния постдиффузионного прецизионного удаления высоколегированной части эмиттера на параметры GaSb фотоэлементов.
- разработка «тыльного» зеркала для ТФЭ преобразователей на основе Ge и GaSb и исследование его отражательных свойств.
- создание высокоэффективных фотопреобразователей на основе Ge и GaSb, предназначенных для преобразования падающего излучения высокой плотности.
- разработка режимов эпитаксиального роста и диффузионного легирования с целью создания фотоэлементов на основе арсенида индия.

Научная новизна и практическая значимость работы заключаются в следующем:

- Исследована зависимость глубины залегания *p-n*-перехода в германии от длительности диффузионного отжига в условиях квазизамкнутого объема. Определены технологические режимы диффузии, обеспечивающие получение высокоэффективных Ge фотоэлементов.
- Разработана технология получения Ge фотоэлементов с GaAs широкозонным «окном» с использованием эпитаксиальных и диффузионных методов. Показано, что выращивание широкозонного GaAs «окна» приводит к возрастанию напряжения холостого хода и эффективности фотоэлементов на основе Ge.

- Впервые в отечественной практике созданы фотоэлементы на основе Ge с широкозонным «окном» GaAs, которые по эффективности фотоэлектрического преобразования не уступают лучшим зарубежным аналогам.
- Разработана методика увеличения эффективности фотоэлементов на основе GaSb путем прецизионного удаления высоколегированной части *p*-эмиттера после диффузии из газовой фазы.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Эпитаксиальное выращивание GaAs на Ge в комбинации с диффузией цинка обеспечивает получение фотопреобразователей с близкой к 100% внутренней квантовой эффективностью фотоответа и высокими значениями генерируемого напряжения.
2. Разработанные фотопреобразователи на основе GaAs/Ge гетероструктуры обеспечивают достижение КПД 10-11% при преобразовании концентрированного (50-300 солнц) солнечного излучения. КПД термофотоэлектрического преобразования составляет 16.5% для поглощенного в Ge ($\lambda < 1940$ нм) излучения вольфрамового эмиттера при $T = 2000$ К.
3. Низкотемпературная диффузия цинка в GaSb в сочетании с постдиффузионным прецизионным удалением высоколегированной части *p*-эмиттера обеспечивают получение фотопреобразователей с КПД 18-19% при преобразовании излучения вольфрамового эмиттера ($T = 1800-2000$ К) и 49% при преобразовании мощного (100 Вт/см^2) узкополосного излучения с длиной волны 1680 нм.

Апробация результатов работы.

Результаты диссертационной работы докладывались на 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference (Munich, Germany, 2001); 5th ISTC Scientific Advisory Committee Seminar (St. Petersburg, 2002); 29th Photovoltaic Specialists Conference (New Orleans, Louisiana, 2002); 5th Conference on Thermophotovoltaic Generation of Electricity (Rome, Italy, 2002); 3rd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, (Japan, Osaka, 2003), 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference (Paris, France, 2004); 6th Conference on Thermophotovoltaic Generation of Electricity (Freirburg, Germany, 2004); 31th Photovoltaic Specialists Conference (Florida,

USA, 2005); 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference (Barcelona, Spain, 2005); 4th World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion (Hawaii, USA, 2006); 21th European Photovoltaic Solar Energy Conference (Dresden, Germany, 2006); 7th Conference on Thermophotovoltaic Generation of Electricity (Madrid, Spain, 2006); 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference (Milan, Italy, 2007).

Публикации. По результатам диссертационной работы опубликовано 33 печатных труда, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 102 наименований. Общий объем работы составляет 131 страницу, включая 62 рисунка и 5 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проведенных в данной работе исследований, сформулирована цель работы, показаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены основные научные положения, выносимые на защиту и краткое содержание диссертации по главам.

Первая глава содержит краткий обзор литературы по теме диссертации. В параграфе 1.1 показана актуальность использования узкозонных полупроводников (в частности, Ge и GaSb) в фотоэнергетике как в качестве солнечных элементов каскадного типа, так и в качестве ТФЭ преобразователей.

В параграфе 1.2 описываются основные принципы работы как отдельных компонентов ТФЭ генераторов и ТФЭ системы в целом. Показаны преимущества ТФЭ генераторов при их использовании в качестве автономных источников энергии.

В параграфе 1.3 рассматриваются полупроводниковые материалы и гетероструктуры для создания ТФЭ преобразователей. Приводятся работы, посвященные проблемам пассивации поверхности германия и совершенствования конструкции фотоэлементов на основе GaSb. Показана перспективность использования InAs в качестве ТФЭ преобразователя, работающего при низких температурах эмиттера ($T < 1300$ °С).

В последнем параграфе главы на основе анализа литературы сформулированы основные задачи диссертационной работы.

Вторая глава посвящена технологии получения фотоэлектрических преобразователей на основе германия методом диффузионного легирования из газовой фазы в объемный материал подложки.

В параграфе 2.1 рассмотрены особенности легирования германия, приведены основные модели диффузионного распределения примесных атомов. Показаны преимущества использования квазизамкнутого контейнера для осуществления процесса диффузии по сравнению с методами легирования в замкнутом объеме (ампуле) и в потоке газа носителя.

В параграфе 2.2 на основании коэффициентов диффузии и основных параметров различных примесей в германии обоснован выбор донорной (сурьмы) и акцепторной (цинка) примеси при диффузионном легировании Ge в условиях квазизамкнутого объема. Легирование осуществлялось в графитовой кассете пенального типа с плотно задвигающейся крышкой и многоярусной горизонтальной укладкой подложек.

В параграфе 2.3 приведен основной технологический маршрут изготовления фотопреобразователей на основе Ge, показаны условия проведения эксперимента, а также представлены характеристики фотоэлементов, сформированные диффузией сурьмы и цинка. С помощью газовой диффузии цинка в квазизамкнутом контейнере были получены фотоэлементы (ФЭ) площадью от $2.5 \times 2.5 \text{ мм}^2$ до $10 \times 10 \text{ мм}^2$ с внутренним (близким к 100 %) и внешним (80-90 %) квантовым выходом в широком спектральном диапазоне $\lambda = 800-1600 \text{ нм}$. Этот результат соответствует параметрам лучших зарубежных аналогов (рис. 1).

В параграфе 2.4 рассматривается возможность повышения эффективности ТФЭ преобразования за счет создания отражающего зеркала на тыльной стороне фотоэлементов, при формировании которого возможно изготавливать ТФЭ преобразователи на основе Ge с коэффициентом отражения “подзонных” фотонов 90-95% ($\lambda > 1.9 \text{ мкм}$).

Третья глава посвящена технологии создания фотопреобразователей на основе Ge с широкозонным «окном» GaAs методами жидкофазной и газофазной эпитаксии и диффузионного легирования. Для достижения высоких значений фототока в Ge фотоэлементах необходимо формировать неглубокий *p-n*-переход (до 0.3 мкм), что вызывает чрезвычайную чувствительность фотопреобразователей на основе германия к поверхностной рекомбинации. Пассивация поверхности Ge, например,

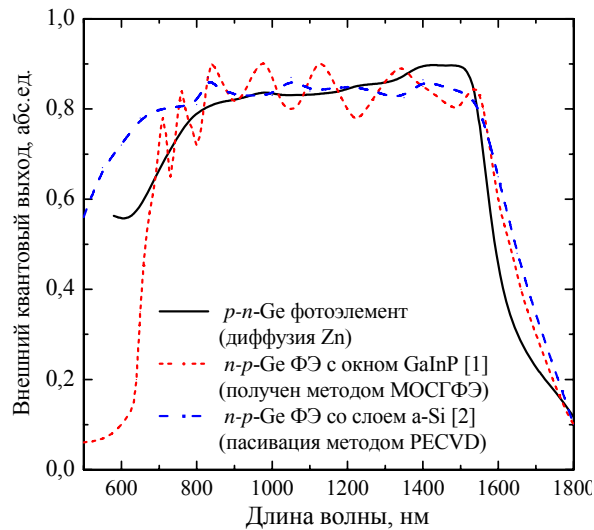


Рис. 1. Спектральные характеристики фотоответа фотопреобразователей на основе Ge, полученных с помощью различных технологических методов.

слоем GaAs позволяет снизить скорость поверхностной рекомбинации, тем самым повысить эффективность фотоэлементов за счет достижения больших значений напряжения холостого хода.

В параграфе 3.1 рассмотрены особенности процесса пассивации подложек германия слоем GaAs методом жидкофазной эпитаксии. Известные способы эпитаксии из жидкой фазы не позволяют получать гетероэпитаксиальные слои соединений A^3B^5 , и в частности GaAs, на подложках Ge. Трудности при получении эпитаксиальных слоев соединений A^3B^5 на подложках Ge методом ЖФЭ обусловлены особенностями диаграмм состояния перечисленных систем, а также ретроградной растворимостью Ge в большинстве расплавов, используемых при эпитаксии соединений A^3B^5 .

В данной работе с целью получения слоев GaAs на подложках Ge разработан метод ЖФЭ при быстром охлаждении раствора-расплава. Скорость охлаждения составляла приблизительно $2 - 2,5$ $^{\circ}C/сек$. При

данных технологических условиях появляется возможность проводить процесс при большем начальном пересыщении раствора-расплава в значительно неравновесных условиях, т.е. снижалась вероятность растворения подложки. Несмотря на высокую скорость охлаждения, скорость роста была относительно невысока (0,05 мкм/с). Это давало возможность получать тонкие (0,1÷0,5 мкм) эпитаксиальные слои GaAs на подложках Ge, что является необходимым условием для реализации свойств широкозонного «окна».

Достаточно высокий внешний квантовый выход (80-85 %) Ge фотоэлементов в спектральном диапазоне 900–1550 нм говорит о достаточно низкой плотности рекомбинационных центров на гетерогранице *p*-GaAs/*p*-Ge.

В параграфе 3.2 представлены результаты исследования по поиску оптимального технологического маршрута получения фотоэлементов на основе Ge с широкозонным «окном» GaAs, выращенным методом МОСГФЭ на установке с горизонтальным типом реактора при атмосферном давлении.

Для получения Ge фотопреобразователей было исследовано несколько технологических способов получения фоточувствительных структур, различающихся последовательностью технологических операций при изготовлении фотоэлементов. Показана, что оптимальная температура выращивания широкозонного «окна» GaAs составила ~ 550 °С для всех маршрутов получения фотопреобразователей. Максимальные значения напряжения холостого хода были получены на фотоэлементах, изготовленных по маршруту, в котором сначала осуществлялся планарный рост GaAs (что обеспечивало однородность растущего слоя), а затем проводилась локальная диффузия цинка в окна защитной маски диэлектрика (при которой *p-n*-переход не выходит на поверхность фотоэлемента). Внешний квантовый выход полученных фотопреобразователей составил (80-85 %), что свидетельствует о высоком качестве гетерограницы GaAs/Ge.

В параграфе 3.3 приведен сравнительный анализ основных параметров Ge фотоэлементов, полученных различными способами. При пассивации поверхности германия эпитаксиальным слоем широкозонного «окна» GaAs достигается значительный прирост значения напряжения холостого хода фотопреобразователей на основе Ge (рис. 2). В фотопреобразователях на

основе гетероструктуры GaAs/Ge была достигнута эффективность преобразования 8-11% концентрированного солнечного излучения ($K_c = 50-1000$ солнц, AM1.5D) и более 4% за верхним GaAs элементом в механически-стыкованном каскаде, что соответствует параметрам лучших зарубежных аналогов. Разработанные GaAs/Ge фотопреобразователи обеспечивают достижение эффективности термофотоэлектрического преобразования 16.5% для поглощенного в Ge ($\lambda < 1940$ нм) излучения.

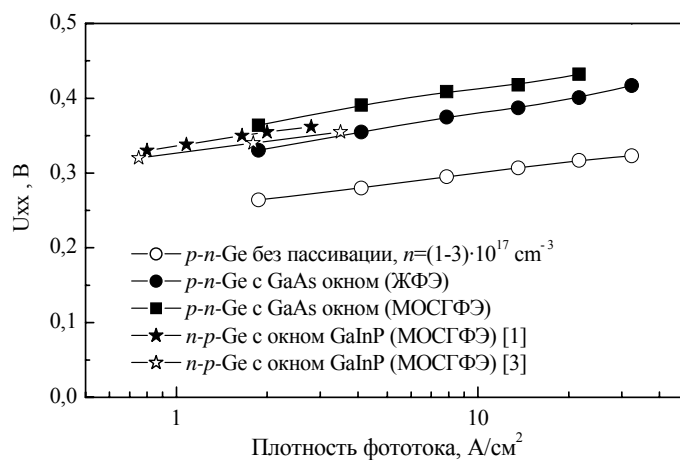


Рис.2. Зависимость напряжения холостого хода (U_{xx}) от плотности фототока фотоэлементов на основе Ge, полученных различными способами.

Четвертая глава посвящена оптимизации параметров фотопреобразователей на основе GaSb и разработке технологии создания фотоэлементов на основе InAs.

В GaSb за счет низкой скорости поверхностной рекомбинации имеется возможность изготавливать фотопреобразователи диффузией Zn в объемный материал подложки. Качество полупроводниковых приборов, создаваемых таким образом, в значительной степени зависит от совершенства монокристаллов. В связи с этим на первый план выходит необходимость получения GaSb, характеризующегося не только высокими абсолютными значениями подвижности и времени жизни носителей заряда, но и минимальными отклонениями электрофизических параметров

монокристалла по всему слитку. В параграфе 4.1.1 представлены результаты исследования влияния электрофизических параметров слиткового материала GaSb на рабочие характеристики фотоэлементов, полученных на его основе. Показано, что для создания высокоэффективных фотопреобразователей оптимальный уровень легирования подложек GaSb(Ge) составляет $n = (2-7) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

В параграфе 4.1.2 представлены результаты исследований по снижению сопротивления омических контактов к p - и n -GaSb для различных вариантов контактных систем, поскольку для фотоэлементов, работающих при концентрированном падающем излучении, особенно актуальна проблема минимизации омических потерь. Минимальные значения удельного сопротивления контактов $\rho_c = (1-3) \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ к p -GaSb с уровнем легирования 10^{20} см^{-3} были получены при использовании контактной системы Ti/Pt/Au. Для низколегированного n -GaSb с концентрацией носителей тока $4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (оптимальный уровень легирования) минимальное контактное сопротивление $2 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ было достигнуто при использовании системы Au/Ni/Au.

В параграфе 4.1.3 показаны результаты по увеличению эффективности фотоэлементов на основе GaSb. Формирование p - n -перехода в GaSb фотоэлементах традиционно осуществляется легированием цинка. Единственный недостаток при легировании цинком заключается в том, что диффузионные GaSb фотоэлементы характеризуются высокими значениями поверхностной концентрации легирующей примеси ($\sim 10^{20}$ - 10^{21} см^{-3}), что приводит к снижению времени жизни неосновных носителей заряда в высоколегированном слое, и, следовательно, к некоторому снижению эффективности GaSb фотопреобразователей. Для устранения данного недостатка в настоящей работе исследовалась возможность улучшения рабочих характеристик фотоэлементов с помощью прецизионного удаления фотоактивной поверхности образцов после диффузии анодным окислением с последующим травлением оксида. Исследования показали, что прецизионное удаление высоколегированной части эмиттера приводит к дополнительному увеличению эффективности фотоэлементов на основе GaSb на 3-4 абс. процента за счет изменения как глубины p - n -перехода, так и формы диффузионного профиля.

В параграфе 4.1.4 представлены результаты по формированию «тыльного» зеркала для ТФЭ преобразователей на основе GaSb и

исследованы его отражательные свойства. Для GaSb фотоэлементов максимальный коэффициент отражения от «тыльного» зеркала, состоящего из диэлектрика MgF_2 (обеспечивающего отражение от тыльной поверхности полупроводника) и точечных металлических контактов Au, составил 70-80%.

В параграфе 4.1.5 на основании полученных фотоэлектрических характеристик оптимизированных GaSb фотоэлементов была оценена их эффективность КПД фотопреобразователей на основе GaSb составил 18-19% (теоретический максимум: 22%) при преобразовании излучения вольфрамового эмиттера ($T = 1800-2000$ К). Оптимизация технологии создания GaSb фотоэлементов, преобразующих излучение высокой плотности, позволила получить фотопреобразователи на основе GaSb, предназначенные для преобразования мощного (до 100 Вт/см²) узкополосного излучения с длиной волны 1600-1700 нм. Были получены высокоэффективные GaSb фотоэлементы, максимальный КПД преобразования которых составил 49% на длине волны падающего излучения 1680 нм.

В параграфе 4.2 представлены результаты по поиску оптимальных условий для выращивания гетероструктур на основе InAs. Получены и исследованы приборные гетероструктуры InAsSbP/InAs, в которых слой InAsSbP выступал как в качестве широкозонного «окна», так и в качестве фотоактивной области эмиттера с красной границей fotocувствительности 2,7 мкм. Внутренний квантовый выход полученных фотопреобразователей составил 60 % ($\lambda = 550-3500$ нм) и 50-90 % ($\lambda = 550-2500$ нм), соответственно.

В заключении сформулированы основные результаты работы:

1. Исследована зависимость глубины залегания *p-n*-перехода в германии от длительности диффузионного отжига цинка в квазизамкнутом объеме при $T = 670$ °С. Экспериментальные данные указывают на соответствие распределения примеси дополнительной функции ошибок.
2. Разработана технология изготовления диффузионных фотоэлементов на основе Ge, позволяющая получать фотопреобразователи с близкой к 100% внутренней квантовой эффективностью фотоответа.

3. Разработана методика получения Ge фотоэлементов с широкозонным «окном» GaAs с помощью методов эпитаксиального выращивания и диффузии из газовой фазы. Эффективность фотопреобразователей на основе гетероструктуры GaAs/Ge при преобразовании концентрированного (50-300 солнц) солнечного излучения составляет 10-11%. КПД термофотоэлектрического преобразования составляет 16.5% для поглощенного в Ge ($\lambda < 1940$ нм) излучения.
4. Исследовано влияние электрофизических параметров слиткового материала GaSb на рабочие характеристики фотоэлементов. Показано, что для создания высокоэффективных фотопреобразователей оптимальный уровень легирования подложек GaSb (Te) составляет $n = (2-7) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.
5. Исследованы омические характеристики различных вариантов контактов к *n*- и *p*-GaSb, а также определены оптимальные температуры их отжига. Минимальные значения удельного сопротивления контактов $(1-3) \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ к *p*-GaSb с уровнем легирования 10^{20} см^{-3} были получены при использовании контактной системы Ti/Pt/Au и $2 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ для низколегированного *n*-GaSb ($n = 4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) при использовании Au/Ni/Au.
6. Разработана методика увеличения эффективности фотоэлементов на основе GaSb путем прецизионного удаления высоколегированной части поверхности *p*-эмиттера после диффузии, позволяющая получать фотопреобразователи с КПД 18-19% при преобразовании излучения вольфрамового эмиттера ($T = 1800-2000 \text{ К}$) и 49% при преобразовании мощного узкополосного излучения с длиной волны 1680 нм.
7. Исследована отражательная способность ТФЭ преобразователей на основе Ge и GaSb для длин волн более 1.9 мкм при различном легировании, толщине подложки и комбинаций материалов «тыльного» зеркала. Для Ge фотоэлементов максимальный коэффициент отражения от «тыльного» зеркала составил 90-95%, для GaSb – 70-80%.
8. Получены и исследованы приборные гетероструктуры InAsSbP/InAs, в которых слой InAsSbP выступал как в качестве широкозонного «окна», так и в качестве фотоактивной области эмиттера с красной границей fotocувствительности 2,7 мкм. Внутренний квантовый выход полученных фотопреобразователей составлял 60 % ($\lambda = 550-3500 \text{ нм}$) и 50-90 % ($\lambda = 550-2500 \text{ нм}$), соответственно.

Основные результаты диссертационной работы изложены в следующих публикациях:

1. Andreev V.M., Khvostikov V.P., Khvostikova O.A., Oliva E.V., Rummyantsev V.D., Shvarts M.Z., Thermophotovoltaic cells with sub-bandgap photon recirculation // *Proceed. of 17th European Photovoltaic Solar Energy Conf.*, Munich, 2001, pp.219-222.
2. Rummyantsev V.D., Khvostikov V.P., Khvostikova O.A., Oliva E.V., Shvarts M.Z., Improvement of GaSb based TPV cells by nano-etching of diffused emitter // *Proc. 5th ISTC SAC Seminar: Nanotechnologies in the area of physics, chemistry and biotechnology*, St.Petersburg, 2002, p.392-395.
3. Khvostikov V.P., Rummyantsev V.D., Khvostikova O.A., Oliva E.V., Shvarts V.M.Andreev M.Z., Thermophotovoltaic cells based on *p-GaAs/p-Ge/n-Ge* nanoheterostructures // *Proc. 5th ISTC SAC Seminar*, St.Petersburg, 2002, p.387-391.
4. Khvostikov V.P., Khvostikova O.A., Oliva E.V., Rummyantsev V.D., Shvarts M.Z., Tabarov T.S., Andreev V.M., Zink-diffused InAsSbP/InAs and Ge TPV cells // *29th Photovoltaic Specialists Conference*, New Orleans, Louisiana, 2002, pp. 943-946.
5. Andreev V.M., Khvostikov V.P., Khvostikova O.V., Oliva E.V., Rummyantsev V.D., Shvarts M.Z., Low-Bandgap Ge and InAsSbP/InAs-Based TPV Cells // *5th Conf. on Thermophotovoltaic Generation of Electricity*, 2002, Rome, AIP Conf. Proc., v.653, p.383.
6. Хвостиков В.П., Олива Э.В., Хвостикова О.А., Андреев В.М., Румянцев В.Д., Шварц М.З., Высокоэффективные ТФЭ элементы на основе Ge и GaSb // *Известия вузов, Северо-Кавказский регион, технические науки, спецвыпуск*, 2002, стр.31-35.
7. Хвостиков В.П., Лунин Л.С., Ратушный В.И., Олива Э.В., Шварц М.З., Хвостикова О.А., Фотопреобразователи на основе GaAs/Ge гетероструктур, полученных методом низкотемпературной ЖФЭ // *Письма в ЖТФ*, 2003, т.29, в.14, стр.46-49.
8. Хвостиков В.П., Лунин Л.С., Кузнецов В.В., Ратушный В.И., Олива Э.В., Хвостикова О.А., Шварц М.З., Многокомпонентные твердые растворы на основе InAs для термофотоэлектрических преобразователей // *Письма в ЖТФ*, 2003, т.29, вып.20, стр.33-37.
9. Andreev V.M., Khvostikov V.P., Khvostikova O.A., Kaluzhniy N.A., Oliva E.V., Rummyantsev V.D., Titkov S.S., Shvarts M.Z., Low-bandgap PV

- and thermophotovoltaic cells // *Proceedings of 3rd World Conf. on Photovoltaic Solar Energy Conversion*, 2003, Osaka, Japan.
10. Андреев В.М., Хвостиков В.П., Калужный Н.А., Титков С.С., Хвостикова О.А., Шварц М.З., Фотоэлементы на основе гетероструктур GaAs/Ge, полученные комбинацией методов МОСГФЭ и диффузии цинка // ФТП, 2004 т.38, в.3, стр. 369-373.
 11. Андреев В.М., Хвостиков В.П., Калужный Н.А., Хвостикова О.А., Газарян П.Ю., Увеличение эффективности термофотоэлектрических преобразователей на основе германия и антимонида галлия // Известия вузов, Северо-Кавказ. регион, тех. науки, спецвыпуск, 2004, стр.44-52.
 12. Хвостиков В.П., Хвостикова О.А., Газарян П.Ю., Шварц М.З., Румянцев В.Д., Андреев В.М., Термофотоэлектрические преобразователи теплового и концентрированного солнечного излучения // ФТП, 2004, т.38, вып.8, стр.988-993.
 13. Rumyantsev V.D., Khvostikov V.P., Khvostikova O.A., Gazaryan P.Y., Sadchikov N.A., Vlasov A.S., Ionova E.A., Andreev V.M., Structural features of solar TPV systems // *Proceedings of the 6th Conference on Thermophotovoltaic Generation of Electricity*, Freiburg, 2004, pp. 79-87.
 14. Andreev V.M., Khvostikov V.P., Khvostikova O.A., Rumyantsev V.D., Gazaryan P.Y., Vlasov A.S., Solar thermophotovoltaic converters: efficiency potentialities // *Proceedings of the 6th Conference on Thermophotovoltaic Generation of Electricity*, Freiburg, 2004, pp. 96-104.
 15. Khvostikov V.P., Rumyantsev V.D., Khvostikova O.A., Shvarts M.Z., Gazaryan P.Y., Sorokina S.V., Kaluzhniy N.A., Andreev V.M., Thermophotovoltaic cells based on low-bandgap compounds // *Proceedings of the 6th Conference on Thermophotovoltaic Generation of Electricity*, Freiburg, 2004, pp. 436-444.
 16. Khvostikov V.P., Rumyantsev V.D., Khvostikova O.A., Gazaryan P.Y., Kaluzhniy N.A., Andreev V.M., TPV cells based on Ge, GaSb and InAs related compounds for solar powered TPV systems // *Proceedings of the 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Paris, 2004, pp. 105-108.
 17. Andreev V.M., Grilikhes V.A., Khvostikov V.P., Khvostikova O.A., Rumyantsev V.D., Sadchikov N.A., Shvarts M.Z., Concentrator PV modules and solar cells for TPV systems // *J. Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2004, v.84, pp.3-17.

18. Khvostikov V.P., Rumyantsev V.D., Khvostikova O.A., Gazaryan P.Y., Sorokina S.V., Shvarts M.Z., Vlasov A.S., Andreev V.M., Photovoltaic cells for solar powered TPV systems // *Proceedings of the 31st Photovoltaic Specialists Conference*, Florida, 2005, pp. 655-658.
19. Andreev V.M., Khvostikov V.P., Khvostikova O.A., Vlasov A.S., Gazaryan P.Y., Sadchikov N.A., Rumyantsev V.D., Solar thermophotovoltaic system with high temperature tungsten emitter // *Proceedings of the 31st Photovoltaic Specialists Conference*, Florida, 2005, pp. 671-674.
20. Andreev V.M., Khvostikov V.P., Rumyantsev V.D., Khvostikova O.A., Gazaryan P.Y., Vlasov A.S., Sadchikov N.A., Sorokina S.V., Zadiranov Y.M., Shvarts M.Z., Thermophotovoltaic converters with solar powered high temperature emitters // *Proceedings of the 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Barcelona, 2005, pp. 8-13.
21. Kalinovskiy V.S., Andreev V.M., Evstropov V.V., Khvostikov V.P., Khvostikova O.A., The mechanism of a current flow in the space charge region of illuminated and nonilluminated GaSb *p-n* junctions // *Proc. 20th European Photovoltaic Solar Energy Conf.*, Barcelona, 2005, pp.503-506.
22. Khvostikov V.P., Rumyantsev V.D., Khvostikova O.A., Gazaryan P.Y., Sorokina S.V., Potapovich N.S., Shvarts M.Z., Andreev V.M., Narrow bandgap GaSb and InGaAsSb/GaSb based cells for mechanically stacked tandems and TPV converters // *Proceedings of the 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Barcelona, 2005, pp. 191-194.
23. Хвостиков В.П., Растегаева М.Г., Хвостикова О.А., Сорокина С.В., Малевская А.В., Шварц М.З., Андреев А.Н., Давыдов Д.В., Андреев В.М., Высокоэффективные (49%) мощные фотоэлементы на основе антимида галлия // *ФТП*, 2006, т.40, в.10, стр.1275-1279.
24. Khvostikov V.P., Khvostikova O.A., Gazaryan P.Y., Sorokina S.V., Potapovich N.S., Malevskaya A.V., Shvarts M.Z., Kaluzhniy N.A., Andreev V.M., Rumyantsev V.D., Photoconverters for solar TPV systems // *Proceedings of the 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, 2006, Hawaii, pp. 667-670.
25. Andreev V.M., Vlasov A.S., Khvostikov V.P., Khvostikova O.A., Gazaryan P.Y., Sadchikov N.A., Rumyantsev V.D., Solar thermophotovoltaic converter with Fresnel lens and GaSb cells // *Proceedings of the 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, 2006, Hawaii, pp. 644-647.

26. Andreev V.M., Vlasov A.S., Khvostikov V.P., Khvostikova O.A., Gazaryan P.Y., Sadchikov N.A., Sun powered TPV converters based on GaSb cells // *Proc. of 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Dresden, 2006, pp. 35-38.
27. Khvostikov V.P., Gazaryan P.Y., Khvostikova O.A., Sorokina S.V., Potapovich N.S., Malevskaya A.V., Levin R.V., Shvarts M.Z., Andreev V.M., Narrow band gap TPV converters of radiation from the emitters heated by concentrated sunlight // *Proc. of 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Dresden, 2006, pp. 485-488.
28. Vlasov A.S., Khvostikov V.P., Khvostikova O.A., Gazaryan P.Y., Sorokina S.V., Sadchikov N.A., Andreev V.M., TPV systems with solar powered tungsten emitters // *Proc. of 7th World Conference on Thermophotovoltaic Generation of Electricity*, 2006, Madrid, pp. 327-334.
29. Khvostikov V.P., Gazaryan P.Y., Khvostikova O.A., Sorokina S.V., Potapovich N.S., Malevskaya A.V., Levin R.V., Shvarts M.Z., Andreev V.M., GaSb applications for solar thermophotovoltaic conversion // *Proc. of 7th World Conference on Thermophotovoltaic Generation of Electricity*, 2006, Madrid, pp. 139-148.
30. V.M. Andreev, A.S. Vlasov, V.P. Khvostikov, O.A. Khvostikova & P.Y. Gazaryan, Full Scale Solar TPV Generator // *Proc. 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conf.*, Milan, 2007, pp. 173-176.
31. Khvostikov V.P., Khvostikova O.A., Gazaryan P.Y., Sorokina S.V., Potapovich N.S., Malevskaya A.V., Kaluzhniy N.A., Shvarts M.Z., Andreev V.M., Photovoltaic cells based on GaSb and Ge for solar and thermophotovoltaic applications // *ASME Journal of Solar Energy Engineering*, 2007, v.129, №3, pp 291-298.
32. Andreev V.M., Vlasov A.S., Khvostikov V.P., Khvostikova O.A., Gazaryan P.Y., Sorokina S.V., Sadchikov N.A., Solar thermophotovoltaic converters based on tungsten emitters // *ASME Journal of Solar Energy Engineering*, 2007, v.129, №3, pp 298-304
33. Хвостиков В.П., Сорокина С.В., Потапович Н.С., Хвостикова О.А., Власов А.С., Ракова Е.П., Андреев В.М., Исследование свойств эпитаксиального и слиткового антимонида галлия // *ФТП*, 2008, т.42, вып.4, стр.1198-1205.

Цитированная литература:

1. Fernández J., Dimroth F., Oliva E., Hermle M., Bett A.W. Back-surface Optimization of Germanium TPV Cells // AIP Conf. Proceed. (7th Conf. on Thermophotovoltaic Generation of Electricity) 2007, v.890, pp.190-197.
2. van der Heide J., Posthuma N., Flamand G., Poortmans J. Development of Low-cost Thermophotovoltaic Cells Using Germanium Substrates // AIP Conf. Proceed. (7th Conf. on Thermophotovoltaic Generation of Electricity) 2007, v.890, pp.129-138.
3. Friedman D.J., Olson J.M., Ward S. et.al. Ge Concentrator Cells for III-V Multijunction Devices // 28th Photovoltaic Specialists Conf. Proc., 2000, Anhorage, pp. 965-967.