

На правах рукописи

ПОТАПОВИЧ НАТАЛИЯ СТАНИСЛАВОВНА

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СОЛНЕЧНОЙ И
ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ АНТИМОНИДА ГАЛЛИЯ.

Специальность 01.04.10 – физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертация 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:
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 “__” _____ 2012 г. в ____ 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 “__” _____ 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физ.-мат. наук:

_____ Л.М. Сорокин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Солнечная энергетика в настоящее время является одной из наиболее быстроразвивающихся отраслей электроэнергетики. Большой потенциал роста этой ветви альтернативной энергетики обусловлен такими глобальными факторами, как необходимость обеспечения национальной энергобезопасности и повышение стоимости ископаемых источников энергии. Солнечная энергетика имеет и другие уникальные преимущества: энергия Солнца доступна всем, бесплатна, практически неисчерпаема, а процесс ее преобразования в электрическую энергию не оказывает негативного влияния на окружающую среду.

Солнечные энергетические установки являются модульными, что позволяет создавать генерирующие системы практически любого желаемого размера и мощности. В солнечных электрогенерирующих системах, где солнечная энергия непосредственно, либо с помощью оптической системы преобразуется в электрическую энергию, конструкция солнечных элементов определяется требованием максимально эффективного преобразования солнечного спектра. Основным подходом для увеличения коэффициента полезного действия (КПД) является создание многопереходных фотоэлементов, преобразующих большую часть солнечного спектра. Менее распространенными являются термофотоэлектрические (ТФЭ) генераторы – фотоэлектрические приборы, в которых фотоэлектрические преобразователи (ФЭП), чувствительные в инфракрасной (ИК) области спектра, преобразуют тепловое излучение нагретого тела в электрическую энергию. Преимуществом такого способа преобразования энергии перед классическими солнечными энергосистемами является возможность выбора источника нагрева: концентрированное солнечное излучение, любое сгораемое топливо, «бросовое» тепло, вырабатываемое, например, в металлургической промышленности и т.д. В отличие от классических

солнечных батарей в ТФЭ генераторах возможно создание обратной связи с источником излучения за счет отражения неиспользованных фотопреобразователями «подзонных» фотонов обратно к эмиттеру, что позволяет обеспечить дополнительный нагрев эмиттера и существенно увеличить КПД всей системы.

Цель настоящей работы заключалась в разработке технологии создания высокоэффективных фотоэлектрических преобразователей на основе антимонида галлия методом жидкофазной эпитаксии, а так же в разработке и исследовании фотоэлектрических систем, преобразующих как солнечное, так и тепловое излучение.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- исследование легирования антимонида галлия донорными примесями в процессе жидкофазной эпитаксии.
- определение оптимальных технологических режимов выращивания антимонида галлия легированного теллуrom методом жидкофазной эпитаксии.
- разработка высокоэффективных фотопреобразователей на основе антимонида галлия с целью создания ТФЭ генераторов и солнечных модулей со спектральным расщеплением света.
- разработка оптимальных конструкций ТФЭ генераторов при нагреве эмиттера как концентрированным солнечным излучением, так и факелом газовой горелки.
- создание и исследование солнечных ТФЭ генераторов с фотопреобразователями на основе антимонида галлия.
- создание и исследование комбинированных «солнечно-газового» ТФЭ генераторов с фотопреобразователями на основе антимонида галлия.
- создание и исследование солнечного концентраторного модуля со спектральным расщеплением света с фотопреобразователями на основе арсенида и антимонида галлия.

Научная новизна и практическая значимость работы заключаются в следующем:

- Исследованы зависимости подвижности от концентрации носителей заряда в антимониде галлия, полученного методом жидкофазной эпитаксии и зависимости концентрации свободных носителей заряда от содержания легирующей примеси в жидкой фазе для разных температур роста слоев. Проведенные исследования позволили разработать оптимальные условия жидкофазной эпитаксии для выращивания слоев антимонида галлия с заданным уровнем легирования.
- На основе исследований легирования антимонида галлия созданы высокоэффективные фотоэлектрические преобразователи, предназначенные для работы в термофотоэлектрических генераторах и в фотоэлектрических системах с расщеплением солнечного излучения.
- Разработаны и исследованы два варианта ТФЭ систем (конического и цилиндрического типов), работающих при нагреве эмиттера концентрированным солнечным излучением. Конструкция генератора конического типа позволяет создавать на внутренней поверхности модуля зеркальный отражатель и использовать более технологичный плоский эмиттер. Цилиндрическая ТФЭ система за счет большего количества фотопреобразователей позволяет получать большую выходную мощность по сравнению с конической ТФЭ системой.
- Впервые в России разработана и протестирована солнечная ТФЭ система на основе GaSb фотопреобразователей.
- Впервые в России разработан и протестирован комбинированный «солнечно-газовый» ТФЭ генератор с возможностью работы как от солнечного концентрированного излучения, так и от газовой горелки.
- Впервые разработан отечественный солнечный концентраторный модуль с расщеплением солнечного света на основе фотопреобразователей GaAs, AlGaAs и GaSb. Суммарная максимальная эффективность ФЭП,

предназначенных для использования в системе со спектральным расщеплением солнечного излучения, составила 39.6 %.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. На основе исследований легирования антимонида галлия, выращенного методом жидкофазной эпитаксии, получены слои с рекордными значениями подвижностей $\mu = 4000-4500 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ для концентрации $n = (4-5)\cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, что позволило получить высокоэффективные фотоэлектрические преобразователи, предназначенные для работы в термофотоэлектрических генераторах и в фотоэлектрической системе с расщеплением солнечного спектра.
2. Разработаны и исследованы четыре типа структур GaSb фотопреобразователей, полученных методами жидкофазной эпитаксии, диффузии цинка и их комбинацией. Фотоэлементы на основе этих структур обеспечили достижение фактора заполнения нагрузочной характеристики 73-74 % при плотности фототока 2-5 А/см².
3. Разработана и исследована система фотопреобразователей на основе AlGaAs, GaAs, GaSb элементов для концентраторной фотоэлектрической системы с расщеплением солнечного спектра. Суммарная эффективность каскада фотоэлектрических преобразователей составила 39.6 %.
4. Созданы и исследованы солнечный и комбинированный «солнечно-газовый» ТФЭ генераторы на основе разработанных GaSb фотопреобразователей. Фактор заполнения нагрузочной характеристики солнечного ТФЭ генератора под концентрированным солнечным излучением составил ~ 67 %, а для комбинированного ТФЭ генератора составил ~ 61 % при работе в солнечном режиме и ~ 62 % при работе в топливном режиме.

Апробация результатов работы

Результаты диссертационной работы докладывались на 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference (Barcelona Spain, 2005); 9-м международном семинаре российские технологии для индустрии (Санкт-Петербург, 2005); 7th World Thermophotovoltaic Generation of Electricity Conference (Madrid Spain, 2006); 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (Dresden Germany, 2006); 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference (Milan Italy, 2007); 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference (Valencia Spain, 2008); 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference (Hamburg Germany, 2009); 25nd European Photovoltaic Solar Energy Conference (Valencia Spain, 2010); 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference (Munich, Germany, 2011).

Публикации. По результатам диссертационной работы опубликовано 20 печатных трудов, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из наименований. Общий объем работы составляет страниц, включая рисунка и таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проведенных в данной работе исследований, сформулированы цели и задачи работы, показана 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 диссертационной работы. В параграфах 1.1 и 1.2 представлены краткие обзоры развития фотоэлектричества и его состояния на настоящий момент в мире в целом и в России в частности.

В параграфе 1.3 описываются основные принципы работы как отдельных компонентов термофотоэлектрических генераторов, так и ТФЭ

системы в целом. Показаны преимущества ТФЭ генераторов как автономных источников энергии по сравнению с другими традиционными и нетрадиционными способами получения электричества.

В параграфе 1.4 рассматриваются полупроводниковые материалы и структуры для создания термофотоэлектрических преобразователей. Приводятся работы, посвященные проблемам создания высокоэффективных фотопреобразователей на основе таких материалов как Ge, InAs и GaSb. Показана перспективность использования GaSb в качестве материала для получения ТФЭ преобразователей.

В параграфе 1.5 рассмотрены основные методы получения эпитаксиальных слоев соединений A^3B^5 . Показаны преимущества метода жидкофазной эпитаксии в комбинации с диффузией цинка из газовой фазы для получения фотоэлектрических преобразователей на основе антимонида галлия и его твердых растворов.

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

Вторая глава посвящена разработке технологии получения фотоэлектрических преобразователей на основе антимонида галлия методом жидкофазной эпитаксии и диффузии цинка из газовой фазы.

В параграфе 2.1 приведено описание технологического оборудования, применяемого для проведения жидкофазной эпитаксии антимонида галлия. Описаны методы, использованные для подготовки поверхности подложек антимонида галлия к жидкофазной эпитаксии.

В параграфе 2.2 исследованы зависимости подвижности носителей заряда от концентрации в антимониде галлия, полученного методом жидкофазной эпитаксии и зависимости концентрации свободных носителей заряда от содержания легирующей примеси в жидкой фазе для разных температур роста слоев. Определены оптимальные условия жидкофазной эпитаксии, позволяющие получать слои антимонида галлия с заданным уровнем и типом легирования.

В параграфе 2.3 рассматриваются разработанные на основании представленных в параграфе 2.2 исследований GaSb фотопреобразователи, созданные методами жидкофазной эпитаксии, диффузии цинка и их комбинацией. Усовершенствованные фотопреобразователи на основе GaSb предназначены для работы в термофотоэлектрических генераторах под излучением нагретого эмиттера и в фотоэлектрической системе с расщеплением спектра для преобразования длинноволновой части солнечного света. Полученные фотоэлементы обеспечивают достижение фактора заполнения нагрузочной характеристики 73-74 % при плотности фототока 2-5 А/см².

Третья глава посвящена разработке и оптимизации конструкции GaSb фотопреобразователей и термофотоэлектрических генераторов на их основе.

В параграфе 3.1 представлены две разработанные конструкции ТФЭ генераторов. Генератор конического типа является более простым с точки зрения монтажа и настройки, поскольку включает в себя значительно меньшее количество фотоэлементов и обладает большей свободой выбора схемы электрического соединения фотоэлементов. В цилиндрической конструкции за счет увеличения количества фотопреобразователей заложена возможность получения большей выходной мощности. Модули этого типа более удобны для создания гибридных ТФЭ систем, работающих в солнечно-топливном режиме.

В параграфе 3.2.1 рассмотрены особенности монтажа GaSb ФЭП в ТФЭ модули. Трудности, возникающие при процессе монтажа фотопреобразователей на основе антимонида галлия, обусловлены малой глубиной залегания р-п перехода (0.3-0.5 мкм в фоточувствительной области) и высоким коэффициентом диффузии материала контакта (золота) в антимониде галлия. Разработанные температурно-временные режимы монтажа позволили получить ТФЭ модули на основе антимонид галлиевых преобразователей без потери эффективности на данном технологическом этапе.

В параграфе 3.2.2 проведены исследования влияния типа изоляционного материала и его толщины на температуру фотоэлемента, работающего под излучением эмиттера в ТФЭ генераторе. Результаты исследований показали, что достаточно дорогая и высокотоксичная керамика ВеО не имеет очевидных преимуществ перед более дешевыми и безопасными изоляционными материалами Al_2O_3 или AlN , несмотря на то, что коэффициенты теплопроводности данных материалов значительно ниже.

В параграфе 3.3.1. представлены результаты исследований ТФЭ модуля разработанного для системы конического типа. Фотоэлектрический модуль состоял из четырех GaSb фотопреобразователей, соединенных последовательно на керамическом основании с медным теплоотводом. В ТФЭ генераторе конического типа использовался плоский излучатель, так как он обеспечивал более высокие значения тока короткого замыкания и выходной мощности. Под излучением эмиттера из карбида кремния в данной системе достигнута максимальная плотность фототока на элементе, равная $I_{кз} = 4,5 \text{ A/cm}^2$.

В параграфе 3.3.2 рассмотрены и исследованы конструкции ТФЭ модулей для систем цилиндрического типа. Для различных видов ТФЭ генераторов и, соответственно, для различных геометрических размеров эмиттеров требуются модули соответствующих размеров и способов коммутации (параллельный, последовательный и т.п.). Так модули, состоящие из трех GaSb ФЭП размером $10 \times 10 \text{ мм}^2$, имели наилучшие характеристики при работе в ТФЭ системе с цилиндрическим эмиттером длиной 25 мм. Модули из четырех GaSb элементов размером $10 \times 10 \text{ мм}^2$ рассчитаны на работу с эмиттером длиной 30-35 мм. В случае необходимости получения на выходе ТФЭГ высокого напряжения требуется последовательное соединение элементов и модулей. Сложность получения последовательного соединения в модуле заключается в необходимости применения изоляционных материалов с разводкой из проводящих материалов или со специальным рельефом.

Четвертая глава посвящена проблемам создания систем преобразующих солнечную и тепловую энергию с помощью полупроводниковых фотоэлементов.

Параграф 4.1 посвящен разработке и исследованиям солнечной и гибридной «солнечно-топливной» ТФЭ систем на основе GaSb модулей, рассмотренных в третьей главе. Особенностью солнечных ТФЭ генераторов, несомненно, является то, что для нагрева эмиттера используется концентрированное солнечное излучение со всеми его преимуществами. В такой системе появляется необходимость использования концентраторной оптической системы и системы слежения за положением Солнца.

ТФЭ генераторы с эмиттером, разогреваемым газовым факелом дают возможность создания систем с большими мощностями (1-1.5 кВт и выше).

Гибридные солнечно-топливные генераторы объединяют в себе преимущества первых двух типов ТФЭ систем. Такие генераторы могут работать круглосуточно, используя Солнце в качестве источника энергии. В этом случае в качестве топлива может использоваться водород, получаемый гидролизом при преобразовании солнечной энергии.

В параграфе 4.1.1 представлены результаты разработок макета солнечного термофотоэлектрического генератора на основе линейных модулей из трех параллельно соединенных GaSb фотопреобразователей. Эффективность термофотоэлектрической части генератора составила 18 %.

В параграфе 4.1.2 рассмотрен комбинированный ТФЭ генератор, с усовершенствованной системой охлаждения, обеспечивающий лучший отвод тепла. Максимальные значения мощности, генерируемой половиной модуля, составили 3.1 Вт для режима работы с концентрированным солнечным излучением и 4.9 Вт для газового (гибридного) генератора. В пересчете на полную систему из 32 элементов эти значения составляют 6.2 Вт и 9.8 Вт, соответственно.

Параграф 4.2 посвящен разработке фотоэлектрической системы со спектральным расщеплением солнечного излучения. Применение принципа

спектрального расщепления света обеспечивает свободу выбора полупроводниковых материалов и позволяет создавать каскад из элементов с различной шириной запрещенной зоны на основе структур с одним p-n-переходом. Это дает возможность упростить как сами ФЭП, так и способы их коммутации.

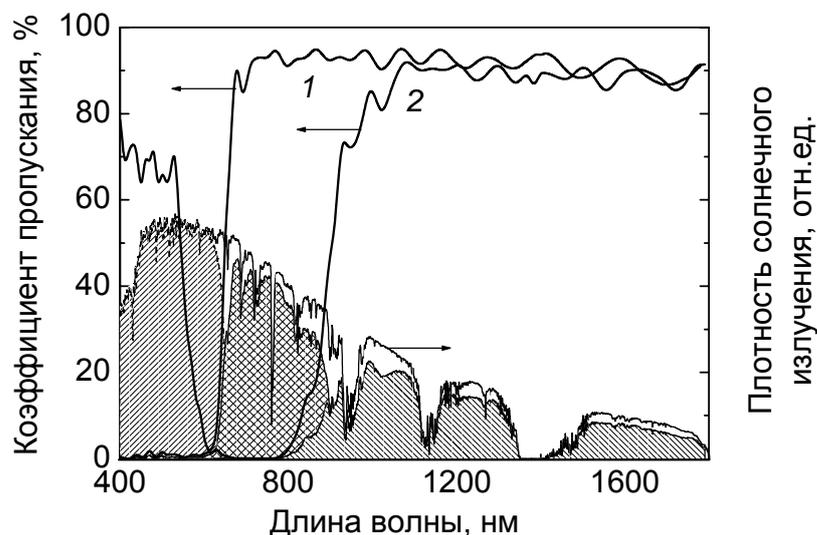


Рис. 1. Зависимость коэффициента пропускания селективных фильтров от длины волны падающего излучения.

1 – фильтр, отражающий солнечное излучение на широкозонный AlGaAs элемент,

2 – фильтр, отражающий солнечное излучение на средний GaAs элемент.

В параграфе 4.2.1 представлены результаты исследований разработанной оптической системы с расщеплением светового потока, состоящей из линзы Френеля и двух дихроических зеркал, пространственно расщепляющих солнечное излучение на три спектральных диапазона (рис. 1). Для преобразования солнечного излучения в каждом из диапазонов использовались однопереходные солнечные элементы на основе AlGaAs, GaAs и GaSb, выращенные методом ЖФЭ. Селективные оптические элементы (дихроичные оптические фильтры) пространственно разделяют сконцентрированное линзой Френеля излучение на три световых потока с длинами

$\Delta\lambda_1 = 300-700$ нм, $\Delta\lambda_2 = 700-900$ нм и $\Delta\lambda_3 = 900-1800$ нм. Солнечные элементы для коротковолновой части спектра были выполнены на основе тройного соединения $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, где $x = 0.3-0.35$ ($E_{g1} = 1.80 - 1.86$ эВ) и на основе бинарного соединения GaAs ($E_{g2} = 1.42$ эВ), соответственно. Для длинноволнового спектрального диапазона было использовано соединение GaSb с $E_{g3} = 0.72$ эВ.

В параграфе 4.2.2. проведена теоретическая оценка эффективности системы со спектральным расщеплением света. При использовании полупроводниковых материалов с $E_{g1} = 1.88$ эВ, $E_{g2} = 1.42$ эВ и $E_{g3} = 1.0$ эВ расчетное значение эффективности достигает максимальной величины $\eta = 49.4$ %.

В параграфе 4.2.3. рассмотрены солнечные элементы для системы с расщеплением света. Внешняя квантовая эффективность ФЭП на основе антимонида галлия в спектральном диапазоне 0.9-1.8 мкм близка к 90 %. Максимальный вклад GaSb элементов в общую эффективность модуля составляет 8.44 % при $Kc = 200$.

В параграфе 4.2.4. представлены результаты исследования модуля со спектральным расщеплением солнечного излучения. Суммарная максимальная эффективность (AM 1.5D) ФЭП, предназначенных для использования в системе со спектральным расщеплением солнечного излучения, составила 39.6 %. Для кратности концентрирования $Kc = 200$ суммарная эффективность составила 38.1 %.

Основные результаты работы можно сформулировать следующим образом:

1. Полученные в данной работе значения подвижностей $\mu = 4000-4500$ см²/В·с для оптимального уровня легирования $n = (4-5) \cdot 10^{17}$ см⁻³ фоточувствительного слоя фотопреобразователей превышают известные из литературы значения подвижностей в антимониде галлия. Данные результаты дают возможность использовать метод жидкофазной эпитаксии для получения высокоэффективных фотоэлектрических преобразователей на основе антимонида галлия.

2. Разработан оптимальный тепловой режим монтажа, позволяющий собирать фотопреобразователи на основе антимонида галлия в модули без снижения выходных характеристик фотоэлементов и обеспечивающий высокий процент выхода годных преобразователей.
3. Исследован тепловой режим работы GaSb модулей в ТФЭ генераторе, смонтированных с использованием керамических оснований Al_2O_3 . Максимальная температура фотоэлементов составила $40\text{ }^{\circ}C$ для солнечного ТФЭ режима работы. В генераторах с эмиттером, разогреваемым газовой горелкой, при максимальных фототоках значения температуры фотопреобразователей не превышали $65\text{ }^{\circ}C$.
4. Разработаны и исследованы два варианта ТФЭ систем (конического и цилиндрического типов), работающих при нагреве эмиттера концентрированным солнечным излучением.
5. Создан и исследован тестовый образец ТФЭ генератора цилиндрического типа на основе GaSb фотоэлементов. При нагреве эмиттера концентрированным солнечным излучением получено значение выходной электрической мощности $P = 3.8\text{ Вт}$.
6. Разработан и создан солнечный ТФЭ генератор, состоящий GaSb фотопреобразователей и концентраторной системы на основе линзы Френеля. Величина фактора заполнения нагрузочной характеристики генератора составила 67.6% , а максимальная снимаемая мощность – 5.5 Вт при мощности солнечного излучения $\sim 850\text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$.
7. Разработан гибридный термофотоэлектрический генератор, работающий при нагреве эмиттера солнечным излучением или газовой горелкой. Собрана и протестирована гибридная ТФЭ система на основе GaSb фотоэлементов. Для “солнечного” режима эксплуатации значения выходной электрической мощности, снимаемой с половины системы, составили 3.1 Вт , что соответствует $P_m=6.2\text{ Вт}$ для полного модуля из 32 элементов ($880\text{ Вт}/\text{см}^2$). Показано, что для полноразмерной системы, работающей с газовой горелкой, значения выходной мощности могут

достигать 9.8 Вт. В гибридном ТФЭ генераторе солнечный режим работы используется для экономного расходования газового топлива.

8. Разработан, создан и исследован солнечный модуль со спектральным расщеплением светового потока, использующий для преобразования солнечного излучения три однопереходных фотопреобразователя на основе GaAs, AlGaAs и GaSb. Суммарная максимальная эффективность ФЭП, предназначенных для использования в системе со спектральным расщеплением солнечного излучения, составила 39.6 %.

Основные результаты диссертационной работы изложены в следующих публикациях:

1. V.P.Khvestikov, O.A.Khvestikova, P.Y.Gazaryan, S.V.Sorokina, N.S.Potapovich, A.V.Malevskaya, N.A.Kaluzhniy, M.Z.Shvarts, V.M.Andreev. Photovoltaic cells based on GaSb and Ge for solar and thermophotovoltaic applications // ASME J. Solar Energy Eng., 2007, vol. 129, N 3, pp. 291-297.
2. S.Luca, J.L.Santailler, J.Rothmana, J.P.Bell, C.Calvat, G.Basset, A.Passero, V.P.Khvestikov, N.S.Potapovich, R.V.Levin. GaSb crystals and wafers for photovoltaic devices // ASME J. Solar Energy Eng., 2007, vol. 129, N 3, pp. 304-313.
3. В.П.Хвостиков, С.В.Сорокина, Н.С.Потапович, О.А.Хвостикова, А.С.Власов, Е.П.Ракова, В.М.Андреев. Исследование свойств эпитаксиального и слиткового антимонида галлия // ФТП, 2008, т. 42, вып. 10, стр. 1198-1205.
4. В.П.Хвостиков, С.В.Сорокина, Н.С.Потапович, О.А.Хвостикова, А.В.Малевская, А.С.Власов, М.З.Шварц, Н.Х.Тимошина, В.М.Андреев. Термофотоэлектрические генераторы на основе антимонида галлия // ФТП, 2010, т. 44, вып. 2, стр. 270-277.
5. А.С.Власов, В.П.Хвостиков, С.В.Сорокина, Н.С.Потапович, В.С.Калиновский, Е.П.Ракова, В.М.Андреев, А.В.Бобыль, Г.Ф.Терещенко.

- Газовый термофотоэлектрический генератор на основе металлических эмиттеров и GaSb-элементов // ФТП, 2010, т. 44, вып. 9, стр. 1284-1289.
6. В.П.Хвостиков, А.С.Власов, С.В.Сорокина, Н.С.Потапович, Н.Х.Тимошина, М.З.Шварц, В.М.Андреев. Высокоэффективный ($\eta=39.6\%$, AM 1.5D) каскад фотопреобразователей в системе со спектральным расщеплением солнечного излучения // ФТП, 2011, т. 45, вып. 6, стр. 810-815.
 7. А.Л.Глазов, В.С.Калиновский, Ю.Г.Лисицина, К.Л.Муратиков, Н.С.Потапович. Исследование процесса отвода тепла от полупроводниковых солнечных элементов с помощью лазерных термоволновых методов // ПЖТФ, 2011, т. 37, вып. 14, стр. 60-67.
 8. V.P.Khvestikov, V.D.Rumyantsev, O.A.Khvestikova, P.Y.Gazaryan, S.V.Sorokina, N.S.Potapovich, M.Z.Shvarts, V.M.Andreev. Narrow bandgap GaSb and InGaAsSb/GaSb based cells for mechanically stacked tandems and TPV converters // Proc. of the 20th European Photovoltaic Solar Energy Conf., Barcelona Spain, 2005, pp. 191-194.
 9. В.М.Андреев, Н.С.Потапович, В.П.Хвостиков, П.Ю.Газарян, О.А.Хвостикова, С.В.Сорокина. Солнечно-топливные термофотоэлектрические генераторы на основе фотопреобразователей из германия и антимонида галлия // Сборник тезисов 9-го международного семинара «Российские технологии для индустрии», Санкт-Петербург, 2005, стр. 15-16.
 10. А.В.Каманин, В.В.Уелин, Р.В.Левин, Н.С.Потапович. Термофотоэлектрические преобразователи, полученные газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений // Сборник тезисов 9-го международного семинара «Российские технологии для индустрии», Санкт-Петербург, 2005, стр. 77-78.
 11. V.P.Khvestikov, O.A.Khvestikova, P.Y.Gazaryan, S.V.Sorokina, N.S.Potapovich, A.V.Malevskaya, M.Z.Shvarts, N.A.Kaluzhniy, V.M.Andreev,

- V.D.Rumyantsev. Photoconverters for solar TPV systems // Proc. of the 4th World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion, Hawaii, 2006, pp. 667-670.
12. V.P.Khvostikov, P.Y.Gazaryan, O.A.Khvostikova, S.V.Sorokina, N.S.Potapovich, A.V.Malevskaya, R.V.Levin, M.Z.Shvarts, V.M.Andreev. GaSb applications for solar thermophotovoltaic conversion // Proc. of the 7th World Thermophotovoltaic Generation of Electricity Conf., Madrid Spain, 2006, pp. 139-148.
 13. V.P.Khvostikov, P.Y.Gazaryan, O.A.Khvostikova, S.V.Sorokina, N.S.Potapovich, A.V.Malevskaya, R.V.Levin, M.Z.Shvarts, V.M.Andreev. Narrow band gap TPV converters of radiation from the emitters heated by concentrated sunlight // Proc. of the 21st European Photovoltaic Solar Energy Conf. and Exhibition, Dresden Germany, 2006, pp. 485-489.
 14. V.P.Khvostikov, S.V.Sorokina, N.S.Potapovich, A.S.Vlasov, A.V.Malevskaya, M.Z.Shvarts, V.M.Andreev. Thermophotovoltaic cells and modules based on GaSb // Proc. of the 22rd European Photovoltaic Solar Energy Conf., Milan Italy, 2007, pp. 165-168.
 15. V.M. Andreev, A.S. Vlasov, V.P. Khvostikov, O.A. Khvostikova, P.Y. Gazaryan, N.S. Potapovich. Full scale solar TPV generator // Proc. of the 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conf., Milan Italy, 2007, pp. 173-176.
 16. V.M.Andreev, V.P.Khvostikov, S.V.Sorokina, N.S.Potapovich, A.S.Vlasov, M.Z.Shvarts, N.Kh.Timoshina. GaSb arrays for solar thermophotovoltaic system // Proc. of the 23nd European Photovoltaic Solar Energy Conf., Valencia Spain, 2008, pp. 616-619.
 17. V.M. Andreev, A.S. Vlasov, V.P. Khvostikov, O.A. Khvostikova, N.S. Potapovich, and E.P. Rakova. Solar/fuel TPV generator based on GaSb cells // Proc. of the 23nd European Photovoltaic Solar Energy Conf., Valencia Spain, 2008, pp. 203-206.
 18. V.P.Khvostikov, S.V.Sorokina, N.S.Potapovich, A.S.Vlasov, M.Z.Shvarts, N.Kh.Timoshina, V.M.Andreev. Powerful high efficiency GaSb TPV and PV

cells // Proc. of the 24th European Photovoltaic Solar Energy Conf., Hamburg Germany, 2009, pp. 174-177.

19.V.P.Khvostikov, S.V.Sorokina, N.S.Potapovich, V.I.Vasil'ev, A.S.Vlasov, M.Z.Shvarts, N.Kh.Timoshina, V.M.Andreev. Single-junction solar cells for spectrum splitting PV system // Proc. of the 25nd European Photovoltaic Solar Energy Conf., Valencia Spain, 2010, pp. 167-171.

20.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 // Proc. of the 26th European Photovoltaic Solar Energy Conf., 2011, pp. 133-136.