

Термофотоэлектрические генераторы на основе антимонида галлия

© 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

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 1 июля 2009 г. Принята к печати 16 июля 2009 г.)

Разработаны, созданы и протестированы конструкции термофотоэлектрических (ТФЭ) генераторов с инфракрасными эмиттерами, разогреваемыми концентрированным солнечным излучением. Исследованы излучатели из карбида кремния, вольфрама или тантала различной формы и геометрических размеров. Для термофотоэлектрических элементов на основе антимонида галлия эффективность преобразования теплового излучения вольфрамовых эмиттеров составила 19%. Рассмотрены особенности работы двух вариантов ТФЭ генераторов — цилиндрического и конического типов. В демонстрационной модели ТФЭ генератора из 12 фотоэлементов при преобразовании концентрированного солнечного излучения значение выходной электрической мощности составило $P = 3.8$ Вт.

1. Введение

Начиная с разработки в 1990-х годах первых узкозонных фотопреобразователей на основе GaSb, предназначенных для использования в термофотоэлектрических (ТФЭ) генераторах, делались неоднократные попытки увеличить КПД таких систем с целью использования их в качестве источника электрической энергии. Усовершенствование технологии GaSb-фотоэлементов [1–5], разработка и создание узкозонных фотопреобразователей на основе твердых растворов, исследования в области получения высокотемпературных эмиттеров привели к созданию автономных ТФЭ генераторов небольшой мощности. Однако до настоящего времени их эффективность остается невысокой [6,7]. Принципы, заложенные в конструкцию таких „традиционных“ топливных термофотоэлектрических генераторов, успешно применяются при разработке ТФЭ систем, работающих с использованием концентрированного солнечного излучения [6,8]. Теоретические расчеты и экспериментальные данные [7–9] показывают, что в ТФЭ системах достижимы КПД фотопреобразователей на уровне $\sim 25\text{--}30\%$ ($E_g \sim 0.7\text{эВ}$). В частности, с увеличением кратности концентрирования солнечного излучения от $K_c = 1000$ до $K_c = 16\,000$ и повышением температуры эмиттера от 1400 до 2000 К эффективность GaSb-термофотоэлектрических преобразователей возрастает от 18 до 33% [9].

В данной работе рассматриваются два варианта конструкции ТФЭ систем (конического и цилиндрического типов) на основе фотоэлементов, полученных диффузией Zn в GaSb. Термофотоэлектрический генератор конического типа разработан для работы с концентрированным солнечным излучением. Смонтированный и протестированный фрагмент цилиндрической ТФЭ системы состоит из 12 фотоэлементов. Такой генератор может использоваться как в дневное время при нагреве концентрированным солнечным излучением, так и круглосуточно при сжигании топлива.

В разработанных опытных моделях ТФЭ генераторов использовались широкополосные эмиттеры на основе SiC или тугоплавких металлов, так как они имеют больший срок службы по сравнению с селективными излучателями (которые быстро деградируют при высоких плотностях излучения), а конструкция излучателя более проста и менее трудоемка при изготовлении. Исследовались эмиттеры различной конфигурации.

2. Эффективность ТФЭ элемента

Преобразование излучения эмиттеров, разогретых концентрированным солнечным излучением [8,9] или газовой горелкой, осуществлялось термофотоэлектрическими элементами на основе GaSb. Приборная структура формировалась методом диффузии цинка из газовой фазы в подложку антимонида галлия [10]. Площадь фотоэлементов составляла 10×10 мм².

На рис. 1 приведена зависимость эффективности для измеренных значений плотности фототока, фактора заполнения и напряжения холостого хода ТФЭ элементов под вольфрамовым эмиттером в диапазоне температур 1600–2000 К. Как следует из представленной кривой, при нагреве эмиттера до температуры 1900–2000 К эффективность преобразования составляет 19%. Для спектрального диапазона излучателя $\lambda = 400\text{--}1820$ нм и в предположении 100% возврата „подзонных“ фотонов к эмиттеру расчетная эффективность фотоэлемента на основе GaSb достигает 27%.

3. Конструкция и изготовление термофотоэлектрических генераторов

На рис. 2 представлен общий вид разработанных ТФЭ генераторов, состоящих из эмиттера, модуля фотопреобразователей и концентраторной системы (или

[¶] E-mail: vlkhv@scell.ioffe.ru

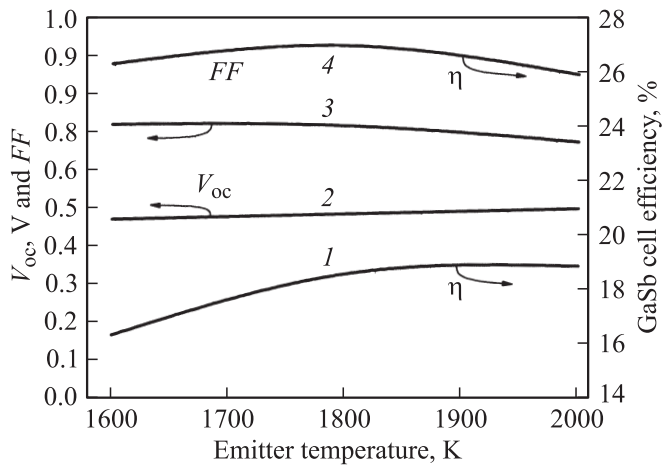


Рис. 1. Зависимости эффективности (1, 4), V_{oc} (2) и фактора заполнения FF (3) ВАХ от температуры вольфрамового эмиттера для фотоэлементов на основе GaSb. Эффективность рассчитана для следующих условий: 1 — полный спектр эмиттера, 4 — спектр в диапазоне $\lambda = 400\text{--}1820$ нм.

системы подачи газового топлива, не показанной на рисунке). В конической системе возможна установка цилиндрического или плоского эмиттера (рис. 2, *a, b*), а в фотоэлектрическом модуле предусматривается квадратичный способ монтажа четырех фотоэлементов. В ТФЭ генераторе цилиндрического типа (рис. 2, *c*) модуль из 24 фотопреобразователей собран из автономных блоков (в таких сборках смонтированы в линейку по 3 фотоэлемента), установленных вокруг эмиттера.

Генератор конического типа является более простым с точки зрения монтажа и настройки, поскольку включает в себя значительно меньшее количество фотоэлементов. В этой системе предусмотрен зеркальный отражатель теплового излучения, созданный на внутренней конической поверхности модуля. Конструкция генератора позволяет использовать плоский эмиттер, форма которого удобна с технологической точки зрения на этапе предварительных экспериментов, например, по выбору материалов излучателя или увеличения его селективности (плоская поверхность упрощает проведение процессов фотолитографии, нанесения селективно излучающих оксидных пленок и др.) Дополнительным преимуществом системы конического типа является большая свобода выбора схемы электрического соединения (последовательного, параллельного и их комбинаций) фотоэлементов.

В цилиндрической конструкции за счет большего количества фотопреобразователей заложена возможность получения большей выходной мощности. Модули этого типа более удобны для создания гибридных ТФЭ систем, работающих в солнечно-топливном режиме. Определенным достоинством цилиндрического генератора является возможность использования двух способов охлаждения: воздушного и водяного (в конической системе применялось только водяное охлаждение). Воздушный способ

охлаждения является более экономичным и относительно простым. Однако с точки зрения эффективности тепловода и предотвращения перегрева линейки ТФЭ преобразователей более предпочтительным выглядит водяной способ охлаждения, особенно при нагреве эмиттера до высоких температур.

Для достижения максимальных значений КПД ТФЭ систем важной задачей является создание эмиттера с оптимальными параметрами (высокой теплопроводностью и механической стабильностью в заданном рабочем диапазоне температур, селективностью спектра излучения и его согласованностью со спектром фотоприемника, стойкостью к термоударам и др.), а также формой и размерами. При высоких плотностях излучения селективные эмиттеры в большинстве случаев разрушаются, поэтому в разработанных прототипах солнечных ТФЭ систем использовались широкополосные излучатели из вольфрама, тантала, карбида кремния разной конструкции и размеров. Во избежание контакта с воздухом и последующего окисления эмиттеры из тугоплавких металлов помещались либо в вакуум, либо в атмосферу инертных газов (аргон или ксенон).

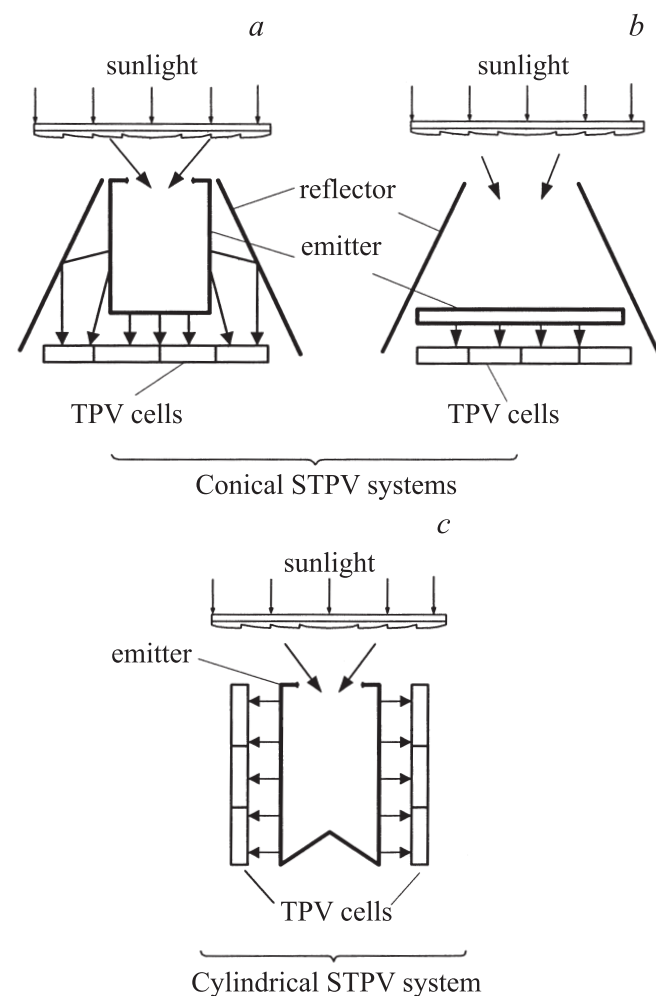


Рис. 2. Схематическое изображение экспериментальных солнечных термофотозлектрических систем различного типа.

4. Изготовление ТФЭ модулей

Для монтажа элементов использовались паяльные пасты на основе сплава PbSnAg (температура плавления $T_{пл} = 180^\circ\text{C}$) и на основе висмута ($T_{пл} = 120^\circ\text{C}$). В качестве теплоотвода использовались медные пластины толщиной 2 мм. К паяльной пасте обычно предъявляются следующие требования: температурный режим пайки должен обеспечивать надежный контакт и не ухудшать электрические характеристики фотопреобразователей; паяные соединения не должны деградировать в течение всего срока службы. Основным критерием качества монтажа являлся выход годных фотоэлементов и способность фотопреобразователей выдерживать температурный режим работы генератора.

Паяльная паста на основе сплава PbSnAg использовалась ранее для пайки фотопреобразователей на основе GaAs. Фотопреобразователи на основе антимонида галлия более чувствительны к высоким температурам, поэтому при использовании рекомендуемого температурно-временного режима монтажа наблюдалась заметная деградация фотоэлементов. При сокращении времени высокотемпературной обработки при монтаже элементов относительно рекомендованного производителями режима не происходило заметного ухудшения выходных характеристик фотоэлементов. На рис. 3 представлены зависимости фактора заполнения (FF) вольт-амперной характеристики (ВАХ) от плотности фототока для двух фотоэлементов размером $3.5 \times 3.5\text{ мм}$ до (кривые 1) и после (кривые 2) пайки с использованием высокотемпературной пасты. Высокие значения FF при плотностях тока до 10 А/см^2 (рис. 3) указывают на то, что после монтажа электрические соединения имели достаточно низкое сопротивление. Кривые 1 и 2 при низких плотностях тока (до 0.5 А/см^2) практически совпадают, что говорит о том, что выбранный температурный режим пайки является оптимальным. При более высоких плотностях тока (выше 0.5 А/см^2) наблюдается увеличение FF напаянных элементов по сравнению с не напаянными, что объясняется улучшением качества контакта. Напряжение холостого хода фотоэлементов при плотностях тока от 0.1 до 10 А/см^2 до и после монтажа не изменялось. Однако выход годных фотоэлементов при „быстром“ режиме пайки составил 60–70%, поэтому были проведены исследования монтажа фотоэлементов с использованием пасты на основе висмута (применение паяльных паст с более низкими значениями $T_{пл}$ является нецелесообразным из-за риска плавления припоя при нагреве в процессе эксплуатации ТФЭ системы).

Исследовались образцы площадью $10 \times 10\text{ мм}^2$. Оценка качества электрических соединений в этом случае также проводилась под импульсной засветкой (рис. 4). При увеличении плотности фототока фактор заполнения ВАХ напаянного элемента падает заметно меньше по сравнению с образцом до монтажа. Такое поведение, вероятно, можно объяснить снижением сопротивления контакта после пайки. Как видно из рис. 4, монтаж фотоэлементов с использованием пасты на основе висмута

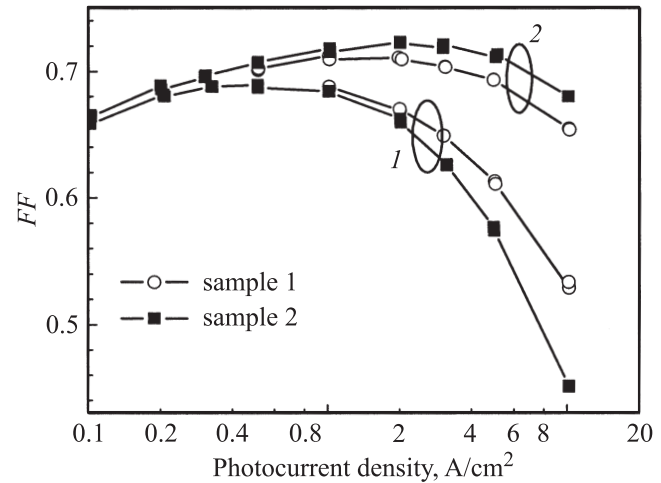


Рис. 3. Зависимость фактора заполнения ВАХ от плотности фототока для двух элементов на основе GaSb до (кривые 1) и после (кривые 2) пайки с использованием высокотемпературной паяльной пасты ($T_{пл} = 180^\circ\text{C}$). Площадь фотоэлементов $3.5 \times 3.5\text{ мм}^2$.

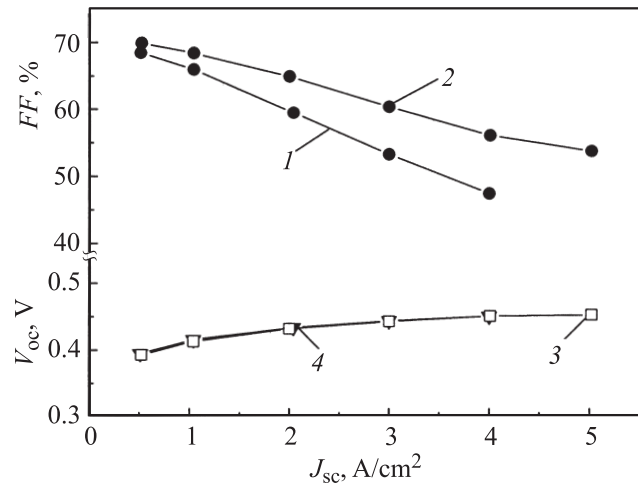


Рис. 4. Зависимость фактора заполнения ВАХ (1, 2) и напряжения холостого хода (3, 4) от плотности фототока для элемента на основе GaSb до (кривые 1, 3) и после (кривые 2, 4) пайки с использованием низкотемпературной паяльной пасты ($T_{пл} = 120^\circ\text{C}$). Площадь фотоэлементов $10 \times 10\text{ мм}$.

($T_{пл} = 120^\circ\text{C}$), также как и применение высокотемпературного припоя, не приводит к изменению напряжения холостого хода. В процессе монтажа с использованием низкотемпературной пасты с рекомендуемым производителями температурно-временным режимом пайки выход годных фотоэлементов составил 90–95%.

5. ТФЭ система конического типа

Для конструкций ТФЭ генераторов, представленных на рис. 2, максимальная плотность фототока

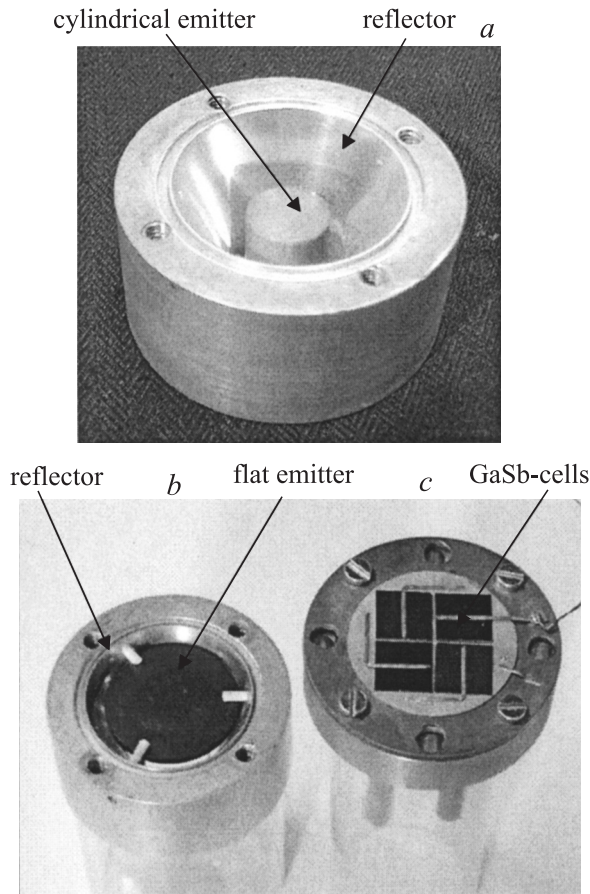


Рис. 5. ТФЭ генератор конического типа (*a, b*) с цилиндрическим (из вольфрама) и с плоским (из карбида кремния) эмиттером и *c* — с четырьмя последовательно соединенными GaSb-элементами размером 10×10 мм каждый.

($J_{sc} = 4.5 \text{ A/cm}^2$ при $V_{oc} = 0.48 \text{ В}$ и $FF = 65\%$) была экспериментально получена на фотоэлементе в системе конического типа под излучением плоского эмиттера на основе SiC. Внешний вид ТФЭ генератора конического типа как с цилиндрическим, так и с плоским эмиттером показан на рис. 5, *a, b*. Так как плоский излучатель обеспечивал бóльшие значения J_{sc} и выходной мощности, то в большинстве экспериментов использовался эмиттер в виде диска из SiC или вольфрама диаметром 28 мм и толщиной 2 мм.

Таблица 1. Параметры модуля из четырех ТФЭ элементов на основе GaSb

	$I_{sc}, \text{ mA}$	$V_{oc}, \text{ В}$	$FF, \%$
Элемент № 1	1032	0.449	63.68
Элемент № 2	1040	0.445	64.32
Элемент № 3	1078	0.443	64.06
Элемент № 4	976	0.404	64.01
Модуль из 4 элементов	1046	1.782	66.27

В конической системе эмиттер был помещен в зеркальный конус и установлен над модулем из четырех последовательно соединенных фотоэлементов (рис. 5, *c*). Элементы монтировались на плате из ВеО-керамики, предварительно напаянной на медное основание. Выбор в качестве электроизолирующего основания керамики ВеО обусловлен хорошей теплопроводностью данного материала ($240\text{--}260 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$), которая превышает теплопроводность керамических диэлектриков из Al_2O_3 ($18\text{--}30 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$) или из AlN ($180 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$). Другим достоинством ВеО является хорошая согласованность по коэффициенту линейного расширения с антимонидом галлия ($\alpha_{\text{GaSb}} = 7.75 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$, $\alpha_{\text{ВеО}} = 7.2\text{--}8.0 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ при температурах $293\text{--}673 \text{ К}$).

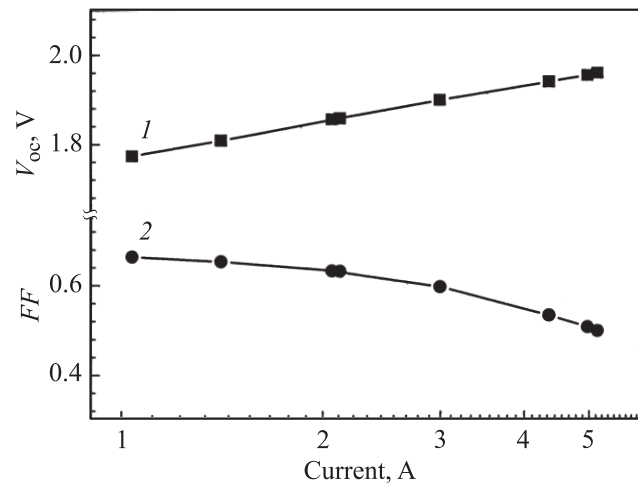


Рис. 6. Зависимость напряжения холостого хода V_{oc} (кривая 1) и фактора заполнения ВАХ (кривая 2) от фототока для модуля из четырех последовательно соединенных элементов на основе GaSb. Измерения проведены при импульсной засветке.

В табл. 1 представлены характеристики отдельных фотоэлементов модуля и сборки из четырех преобразователей при их последовательном соединении. Изменение параметров модуля (фактора заполнения ВАХ и напряжения холостого хода) при увеличении значений фототока отражено на рис. 6. При повышении интенсивности засветки фактор заполнения нагрузочной характеристики модуля меняется незначительно (с 66 до 63%) в диапазоне фототоков до 2 А. Дальнейший рост фототока приводит к падению FF до 55% при 5 А. Таким образом, для разработанных ТФЭ элементов оптимальными являются условия работы, при которых величина генерируемого фототока не превышает 2 А.

6. ТФЭ система цилиндрического типа

Для ТФЭ системы цилиндрического типа были изготовлены линейки из трех напаянных в ряд и соединенных параллельно GaSb-фотоэлементов (рис. 7, *a*) и исследованы характеристики таких автономных блоков.

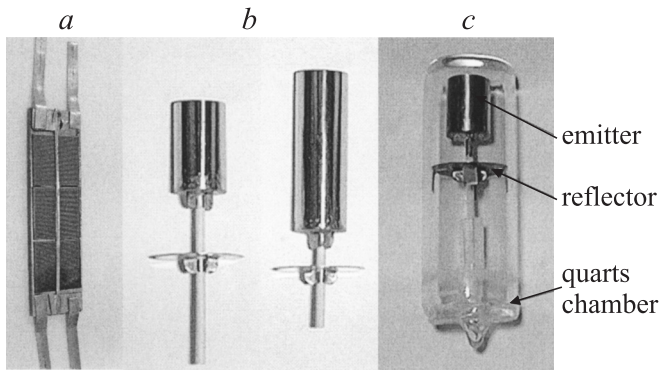


Рис. 7. Линейка из трех параллельно соединенных GaSb-фотоэлементов (а), устанавливаемая вдоль вольфрамового цилиндрического эмиттера (b, c). Масштаб рисунков произвольный.

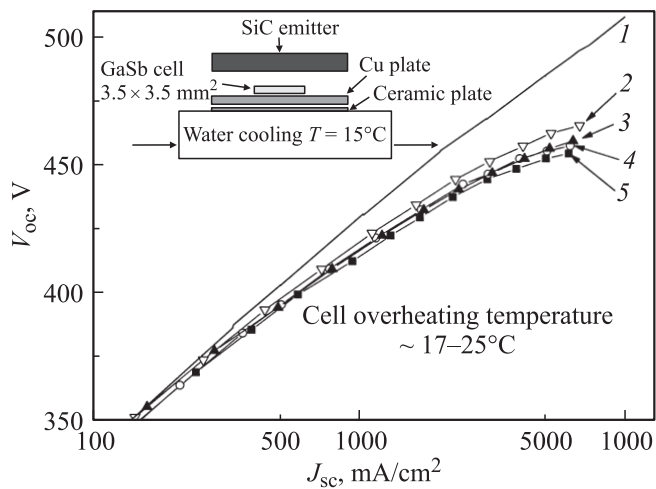


Рис. 8. Исследование различных керамических подложек. 1 — измерения под импульсной засветкой, $T = 25^\circ\text{C}$; измерения под SiC: 2 — Cu; 3 — BeO, толщина 0.5 мм; 4 — Al_2O_3 , толщина 0.5 мм; 5 — Al_2O_3 , толщина 1.0 мм.

Параллельное соединение фотопреобразователей необходимо для компенсации неоднородности распределения световых потоков (особенно в солнечной ТФЭ системе), когда длина линейки фотоэлементов превышает длину эмиттера. В полном варианте ТФЭ модуля предполагается секционная сборка из 8 отдельных блоков, окружающих эмиттер (рис. 7, b) и расположенных параллельно его оси. Такая сборка упрощает процесс монтажа большого числа фотоэлементов и дает возможность заменять блоки в случае необходимости, а их общее количество обеспечивает пропорциональное увеличение тепловой и электрической мощности всей системы.

Для последовательного соединения отдельных линеек фотопреобразователей требуется применение электроизолирующих материалов, характеризующихся высокой теплопроводностью. Наилучшими свойствами с этой точки зрения обладает керамика BeO. Были проведены исследования влияния материала керамики и ее тол-

щины на нагрев фотоэлемента эмиттером на основе SiC (рис. 8). Фотоэлемент напаялся на керамическую подложку, которая монтировалась на охлаждаемом медном основании с помощью паяльной пасты (рис. 8, см. вставку). Эмиттер из карбида кремния, расположенный на расстоянии 4–5 мм от элемента, нагревался электрическим током до температуры 1000–1600°C. Испытания проводились на керамических материалах с сильно различающимися значениями теплопроводности — BeO (толщиной 0.5 мм) и Al_2O_3 (толщиной 0.5 и 1 мм). Температура нагрева определялась по изменению угла наклона ВАХ GaSb-фотоэлемента в реальных условиях эксплуатации ТФЭ системы по сравнению с углом наклона ВАХ фотоэлемента, измеренной под импульсной засветкой при комнатной температуре.

Как следует из рис. 8, при высоких температурах наблюдается уменьшение значений V_{oc} по сравнению с измерениями под импульсной засветкой. Из этого следует, что при высоких плотностях тока ($\sim 4 \text{ A}$) перегрев элемента не превышает в среднем 30–40°C (V_{oc} уменьшается практически линейно с ростом температуры со скоростью 1.5–1.65 мВ/°C [11]). Для обычных режимов эксплуатации ТФЭ элементов их перегрев относительно комнатной температуры составляет $\sim 17\text{--}25^\circ\text{C}$ и достаточно слабо зависит (4–5°C) от материала и толщины керамики. При сравнении фотоэлементов, напаянных на медное основание без керамической изоляции и с керамикой Al_2O_3 толщиной 1 мм, была зафиксирована максимальная разница температур перегрева ($\sim 10^\circ\text{C}$).

Приведенные результаты показывают, что достаточно дорогая и высокотоксичная керамика BeO не имеет очевидных преимуществ перед более дешевыми и безопасными изоляционными материалами Al_2O_3 или AlN (теплопроводность которого выше, чем у Al_2O_3). Учитывая сложность работы с высокотоксичной керамикой BeO, в разработанной цилиндрической ТФЭ системе использовались подложки из Al_2O_3 толщиной 0.5 мм.

6.1. Эмиттеры для цилиндрической системы

В „солнечной“ цилиндрической ТФЭ системе использовались излучатели цилиндрической формы с запаянным дном (рис. 7, b, c), имеющие разные геометрические размеры. Дополнительным усовершенствованием конструкции эмиттера является установка под дном цилиндра отражателя из вольфрама с напыленным слоем золота или нитрида титана толщиной $\sim 1 \mu\text{m}$ (рис. 7, b, c). Отражатель предназначен для возврата к эмиттеру излучения, не попадающего на фотопреобразователи. Такой возврат должен приводить к увеличению температуры излучателя и повышению эффективности ТФЭ преобразования солнечного излучения в целом за счет уменьшения тепловых потерь энергии. Излучатели (изготовленные из тантала или вольфрама) и отражатели крепились на керамический стержень из Al_2O_3 . Поскольку эмиттер разогревался до высоких температур, а тугоплавкие металлы при нагревании на воздухе

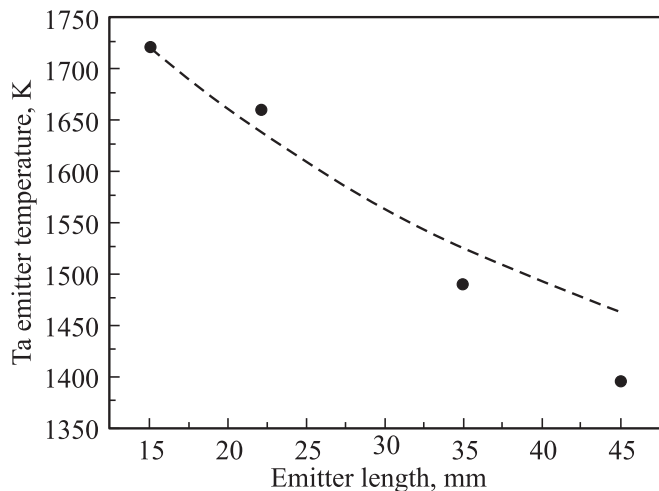


Рис. 9. Температура эмиттера из тантала в зависимости от его длины (диаметр излучателя 12 мм). Точки — экспериментальные значения (солнечное излучение концентрируется линзой Френеля площадью $0.6 \times 0.6 \text{ м}^2$), пунктир — расчетные данные.

быстро окисляются, его помещали в защитную камеру в вакуум или атмосферу инертных газов (рис. 7, с). Защитная камера была изготовлена из тугоплавкого кварцевого стекла (внешний диаметр 24 мм, внутренний — 20 мм, высота 62 мм).

Исследовались эмиттеры цилиндрической формы с толщиной стенки 0.05 мм, диаметром 12 мм и переменной длиной (15, 22, 25, 30, 35, 45 мм). Цилиндрическая форма излучателя необходима для увеличения поглощения солнечной энергии, которое возрастает, согласно вычислениям, в 2–3 раза по сравнению с плоским эмиттером. Выбор диаметра (10–12 мм) определяется параметрами концентрирующей системы, собирающей 75–86% падающего излучения. Использование излучателя с большим диаметром приводит к уменьшению его эффективности и снижению поглощающей способности эмиттера, что отражается в снижении его рабочей температуры. Для цилиндров меньшего диаметра ухудшается эффективность сбора солнечного излучения, что также влияет на ухудшение параметров системы. От длины эмиттера зависят такие его характеристики, как эффективность (возрастает с увеличением длины), температура (повышается для относительно коротких излучателей (рис. 9): увеличение температуры обеспечивает лучшее согласование с шириной запрещенной зоны фотоэлемента), а также диаграмма излучения (более длинные эмиттеры обеспечивают большую однородность излучения тепловой энергии).

Вычисления, выполненные в соответствии с теорией излучающих полостей [12,13], показали, что эффективность поглощения солнечного излучения для таких вольфрамовых эмиттеров с диаметром 10–12 мм и длиной 20–30 мм составляет 60–70% и зависит от соотношения длина/диаметр.

На рис. 9 представлены экспериментальные значения (точки) и расчетные данные (пунктирная кривая) для температуры танталового эмиттера в зависимости от его длины (интенсивность солнечного излучения 800 Вт/м^2). Тантал имеет спектр излучения, близкий к спектру вольфрама, и был выбран благодаря более простой механической обработке. Температура контролировалась с помощью пирометра. Все эмиттеры имели диаметр 12 мм. Из сравнения теоретических данных и экспериментальных значений следует, что длинные излучатели имеют более низкую температуру, чем это следует из вычислений. Это может быть связано с ростом конвективных потерь при увеличении поверхности эмиттера, что не учитывалось в расчетах.

6.2. Исследование сборки из трех фотопреобразователей для ТФЭ системы цилиндрического типа

В табл. 2 приведены характеристики элементов до и после их монтажа в линейку из трех параллельно соединенных фотопреобразователей. В лабораторных условиях измерения проводились при засветке импульсной лампой-вспышкой ($T = 25^\circ \text{C}$) и галогенной лампой (150 Вт), установленной вдоль оси системы.

Результаты исследований линейки из трех параллельно соединенных GaSb-фотоэлементов под импульсной засветкой (кривые 1, 2) и под излучением галогенной лампы (кривые 3, 4) показаны на рис. 10. При увеличении фототока от 1.5 до 4 А фактор заполнения нагрузочной характеристики сборки снижается (кривая 3), что связано с нагревом элементов и неравномерностью их засветки в разных участках линейки.

Эксперименты показали, что при использовании эмиттера из вольфрама длиной 15 мм возникает сильная неоднородность плотности теплового излучения, падающего на фотоэлементы, расположенные в разных частях сборки, что приводит к некоторому снижению тока короткого замыкания и фактора заполнения ТФЭ блока.

Наибольшую выходную мощность имели ТФЭ сборки из трех фотопреобразователей при использовании вольфрамовых эмиттеров длиной 20–25 мм (рис. 11). В табл. 3 показаны результаты измерений плотности тока короткого замыкания для линейки из трех элементов, установленных вдоль эмиттера длиной 25 или 30 мм.

Таблица 2. Параметры сборки из трех ТФЭ элементов на основе GaSb

	$I_{sc}, \text{ mA}$	$V_{oc}, \text{ B}$	$FF, \%$
Элемент № 1	1	0.456	63
Элемент № 2	1	0.456	63
Элемент № 3	1	0.456	64
Линейка из трех элементов (под импульсной засветкой)	3	0.456	69
Линейка из трех элементов (под излучением галогенной лампы)	2.7	0.447	65

Таблица 3. Плотность тока короткого замыкания трех элементов ТФЭ, установленных в ряд вдоль эмиттера из вольфрама длиной 25 или 30 мм

Номер элемента	I_{sc} , А (эмиттер 30 мм, плотность потока солнечного излучения 830 Вт/м ²)	I_{sc} , А (эмиттер 25 мм, плотность потока солнечного излучения 710 Вт/м ²)
1	0.94	1.13
2	1.31	1.42
3	0.96	1.01

Из представленных данных следует, что I_{sc} при установке эмиттера длиной 30 мм оказывается на 10% ниже, чем для эмиттера в 25 мм, несмотря на большую плотность потока солнечного излучения (830 Вт/м² по сравнению с 710 Вт/м²), падающего на концентратор.

6.3. Выходные характеристики цилиндрической ТФЭ системы

Характеристики фрагмента ТФЭ системы из 12 элементов (половина модуля) при различных интенсивностях концентрированного солнечного излучения представлены в табл. 4. В качестве концентратора использовалась линза Френеля размером 60 × 60 см. В лабораторных условиях измерения проводились с использованием галогенной лампы (150 Вт), установленной вдоль оси модуля.

Рассмотренные выше ТФЭ генераторы представляют собой демонстрационные модели, позволяющие оценить достоинства и недостатки каждой из конструкций, в частности, важность снижения омических и оптических потерь во всей системе. С этой целью на следующем этапе работы планируются исследования эмиттеров из селективно-излучающих материалов, а также исследования, направленные на повышение фактора заполнения нагрузочной характеристики как отдельного элемента, так и всего модуля в целом. В промышленном варианте ТФЭ системы количество элементов и, следовательно,

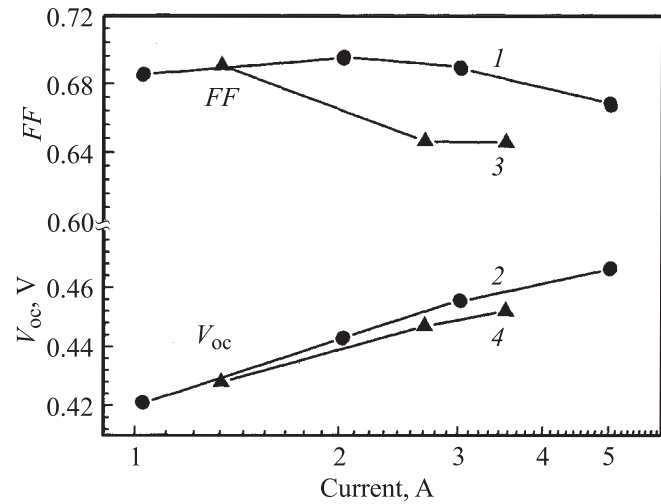


Рис. 10. Зависимости фактора заполнения ВАХ и напряжения холостого хода от фототока для линейки из трех элементов при различных условиях засветки: 1, 2 — измерения при импульсной засветке; 3, 4 — под излучением галогенной лампы.

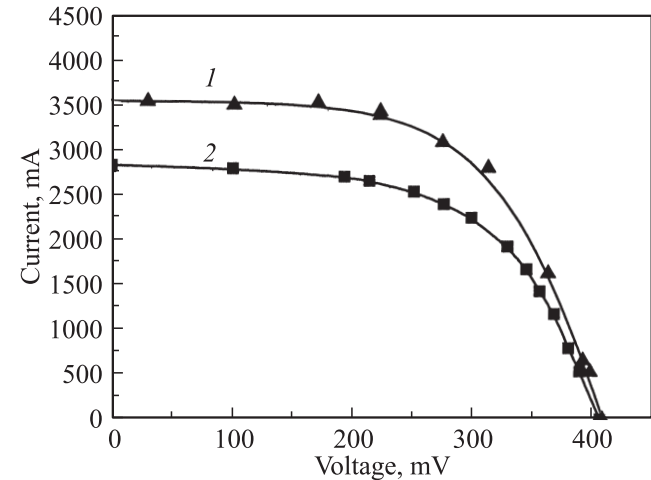


Рис. 11. Нагрузочные характеристики линейки из трех параллельно соединенных GaSb-элементов под облучением эмиттеров из: 1 — W, длина 22 мм; 2 — Ta, длина 25 мм. Диаметр эмиттеров 12 мм.

Таблица 4. Характеристики фрагмента ТФЭ системы (4 × 3 элементов) в условиях засветки концентрированным солнечным излучением и галогенной лампой

Условия измерения	Интенсивность солнечного излучения, Вт/м ²	I_{sc} , А	V_{oc} , мВ	FF	P , Вт	P^* , Вт	кпд, %
Измерения под солнечным излучением	950	3.55	1690	64.1	3.8	7.6	4.5
	880	3.08	1680	65.1	3.3	6.6	4.3
	750	2.29	1650	69.9	2.6	5.2	3.9
Лабораторные измерения	Галогеновая лампа 150 Вт	3.22	1770	63.5			

Примечание. P^* — ожидаемые значения для полноразмерного модуля из 24 элементов

значение выходной электрической мощности могут быть значительно увеличены.

7. Заключение

При термофотоэлектрическом преобразовании теплового излучения вольфрамовых эмиттеров эффективность фотоэлемента на основе GaSb достигает 19%. Для „усеченного“ спектрального диапазона (спектр излучения эмиттера обрезан при $\lambda > 1820$ нм, т.е. в условиях имитации 100% возврата „подзонных“ фотонов к излучателю) эффективность фотоэлемента возрастает до 27%. Для достижения максимальной эффективности фотопреобразователя на основе GaSb оптимальный рабочий диапазон температуры инфракрасных излучателей из вольфрама составляет $T = 1800\text{--}2000$ К.

Разработаны и исследованы два варианта термофотоэлектрических систем (конического и цилиндрического типов), работающих при нагреве эмиттера концентрированным солнечным излучением. Под излучением плоского эмиттера из карбида кремния в данной системе достигнута максимальная плотность фототока на элементе, равная $J_{sc} = 4.5$ А/см².

В цилиндрической системе за счет большего количества фотопреобразователей заложена возможность получения большей выходной мощности. Такие конструкции более удобны для создания гибридных ТФЭ генераторов, работающих в солнечно-топливном режиме. Цилиндрическая система имела наилучшие характеристики при использовании вольфрамовых эмиттеров длиной 20–25 мм. Создан ТФЭ генератор на основе 12 GaSb-фотоэлементов. При нагреве эмиттера концентрированным солнечным излучением получено значение выходной электрической мощности $P = 3.8$ Вт.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 09-08-00243-а).

Список литературы

- [1] V.P. Khvostikov, O.A. Khvostikova, P.Y. Gazaryan, S.V. Sorokina, N.S. Potapovich, A.V. Malevskaya, N.A. Kaluzhniy, M.Z. Shvarts, V.M. Andreev. *ASME J. Solar Energy Eng.*, **129** (August), 291 (2007).
- [2] T. Schlegl, P. Abbott, T. Aicher, F. Dimroth, G. Siefert, R. Szolak, A.W. Bett. *Proc. 20th Eur. Photovoltaic Solar Energy Conf.* (Barcelona, Spain, 2005) p. 258.
- [3] L.M. Fraas, Han X. Huang, Shi-Zhong Ye, She Hui, J. Avery, R. Ballantyne. *AIP Conf. Proc.* (1997) v. 401, p. 33.
- [4] O.V. Sulima, A.W. Bett. *Solar Energy Mater. & Solar Cells*, **66**, 533 (2001).
- [5] V.P. Khvostikov, V.D. Rummyantsev, O.A. Khvostikova, M.Z. Shvarts, P.Y. Gazaryan, S.V. Sorokina, N.A. Kaluzhniy, V.M. Andreev. *Proc. 6th Conf. on Thermophotovoltaic Generation of Electricity* (Freiburg, Germany, 2004) p. 436.
- [6] B. Bitnar, W. Durisch, A. Waser. *Proc. 6th Conf. on Thermophotovoltaic Generation of Electricity* (Freiburg, Germany, 2004) p. 33.
- [7] G. Mattarolo, J. Bard, J. Schmid. *Proc. 6th Conf. on Thermophotovoltaic Generation of Electricity* (Freiburg, Germany, 2004) p. 133.
- [8] V.M. Andreev, V.P. Khvostikov, A.S. Vlasov. In: *Concentrator Photovoltaics*, eds by A. Luque, V. Andreev. Springer Series in Optical Sciences (2007) v. 130, p. 175.
- [9] V.M. Andreev, V.P. Khvostikov, V.D. Rummyantsev, O.A. Khvostikova, P.Y. Gazaryan, A.S. Vlasov, N.A. Sadchikov, S.V. Sorokina, Y.M. Zadiranov, M.Z. Shvarts. *Proc. 20th European Solar Energy Conf.* (Barcelona, Spain, 2005) p. 8.
- [10] В.М. Андреев, С.В. Сорокина, Н.Х. Тимошина, В.П. Хвостиков, М.З. Шварц. *ФТП*, **43** (5), 695 (2009).
- [11] L.M. Fraas, J.E. Avery, P.E. Gruenbaum, V.S. Sundaram, K. Emery, R. Martson. *Proc. 22th IEEE Photovoltaic Specialists Conf.* (Las Vegas, USA, 1991) p. 80.
- [12] С.П. Русин, В.Э. Пелецкий. *Тепловое излучение полостей* (М., Энергоатомиздат, 1987) ч. 5.
- [13] R.E. Bedford, C.K. Ma. *J. Opt. Soc. Amer.*, **64** (3), 339 (1975).

Редактор Л.В. Беляков

Thermophotovoltaic generators based on gallium antimonide

V.P. Khvostikov, S.V. Sorokina, N.S. Potapovich, O.A. Khvostikova, A.V. Malievskaya, A.S. Vlasov, M.Z. Shvarts, N.Kh. Timoshina, V.M. Andreev

Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract Thermophotovoltaic (TPV) generators with infrared emitters heated by the concentrated sunlight have been developed, fabricated and investigated. Emitters of SiC, W, Ta with different shape and dimensions were manufactured. For the TPV cells based on gallium antimonide the thermal radiation conversion efficiency of tungsten emitters was 19%. Prototypes of TPV generators of cylindrical and conical types were investigated. The output electric power of cylindrical type system of 12 photocells under concentrated sunlight was equal to 3.8 W.