

05;06;07;12

## Оптимизация параметров солнечных модулей на основе линзовых концентраторов излучения и каскадных фотоэлектрических преобразователей

© В.М. Андреев, Н.Ю. Давидюк, Е.А. Ионова, П.В. Покровский, В.Д. Румянцев, Н.А. Садчиков

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: vmandreev@mail.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 19 мая 2009 г.)

Рассмотрены два основных аспекта, определяющих конструктивный облик солнечного концентраторного модуля с трехкаскадными наногетероструктурными фотоэлектрическими преобразователями (ФЭП) — это условие эффективного концентрирования излучения линзами Френеля и условие эффективного отвода тепла от ФЭП. С использованием методов теоретического и экспериментального моделирования этих процессов определены конструктивные параметры соответствующих элементов модуля. Изготовлены тестовая партия полноразмерных модулей. Каждый модуль состоит из фронтальной панели малоразмерных линз Френеля (144 линзы при расположении  $12 \times 12$ ) и соответствующего количества ФЭП с многослойной структурой на основе материалов InGaP/GaAs/Ge. Смонтированные на теплопроводящие пластины, ФЭП также объединены в панель. Измеренное в натуральных условиях значение КПД концентраторного модуля с входной апертурой  $0.5 \times 0.5$  м составило 24.3%, что в два с лишним раза превосходит значение КПД обычных (без концентратора) модулей на основе кремния. В тестовых модулях меньшего размера при введении коррекции на стандартную ( $25^\circ\text{C}$ ) температуру ФЭП значение КПД достигало 26.5%.

### Введение

В настоящее время в мировой практике созрели предпосылки для становления „новой энергетики“, базирующейся на все более широком использовании энергии солнечного излучения. Причинами этого являются как проблемы, накопившиеся в традиционной энергетике (экологические опасности разного рода, истощение ресурсов ископаемого топлива и неравномерное распределение их по странам), так и значительный прогресс в разработке полупроводниковых фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) и солнечных энергосистем на их основе. Энергетическая программа Евросоюза предусматривает выработку электроэнергии за счет солнечных установок в объеме не менее 3% уже к 2020 г., причем к этому времени будет достигнут ценовой паритет „солнечного“ электричества по отношению к „обычному“ для большинства европейских стран [1]. В США программа под названием Dolar America Initiative предполагает достижение конкурентоспособности цен на электроэнергию уже к 2015 г. и объем „фотоэлектрического“ рынка на уровне 5–10 млрд. долларов с увеличением рынка до 20–30 млрд. к 2030 г. [2].

Снижение стоимости „солнечной“ электроэнергии может быть достигнуто при использовании высокоэффективных наногетероструктурных ФЭП, работающих совместно с имеющими низкую себестоимость оптическими концентраторами солнечного излучения, например, круговыми линзами Френеля [3–6]. Разработанные в последние годы ФЭП каскадного типа на основе материалов  $A^3B^5$  являются наиболее эффективными и имеют в наземных условиях КПД до 41%

с перспективой увеличения до 50% [7–9]. Площадь ФЭП, необходимая для выработки заданной электрической мощности, уменьшается в соответствии с кратностью концентрирования излучения, достигающей значений  $500\times$  и более. На сегодняшний день освоенными на практике являются трехкаскадные ФЭП с гетероструктурой (Al)GaInP/Ga(In)As/Ge. Три фотоактивных  $p-n$ -перехода, расположенных в указанных материалах, соединены последовательно с помощью двух встроенных туннельных  $p^+-n^+$ -переходов.

Хотя ключевым элементом солнечной энергосистемы является каскадный фотопреобразователь, тем не менее разработка концентраторно-фотоэлектрического модуля требует взаимного согласования параметров всех составляющих элементов — оптического концентратора, ФЭП, устройства отвода тепла и системы слежения за Солнцем. Нами рассматривается конструкция концентраторных модулей, разработанная в последние годы в лаборатории фотоэлектрических преобразователей ФТИ им. А.Ф. Иоффе [6,10,11]. Проблеме оптимизации параметров составляющих элементов и концентраторного модуля в целом и посвящена настоящая работа.

### Конструкция концентраторного солнечного модуля

Концентраторный модуль представляет собой фронтальную линзовую панель и тыльную электрогенерирующую панель, скрепленные между собой при помощи алюминиевых стенок на расстоянии, равном фокусному расстоянию линз. Линзовая панель — это лист сили-

катного стекла, на внутренней поверхности которого вплотную расположены малоразмерные линзы Френеля, выполненные из прозрачного силиконового компаунда. Светопринимающая часть панели состоит из 144 квадратных линз размером  $40 \times 40$  мм каждая (расположение линз  $12 \times 12$ ). Каждая линза фокусирует солнечное излучение на расположенный под ней ФЭП с диаметром фотоувствительной поверхности 1.7 или 2.3 мм. Каждый из 144 чипов ФЭП смонтирован на теплопроводящую пластину из листовой меди. Все теплопроводящие пластины приклеены на выполненное из силикатного стекла тыльное основание модуля, осуществляющее теплосброс. В образовавшейся таким образом электрогенерирующей панели ФЭП скоммутированы в параллельно-последовательную цепь. Преимущества данного конструктивного решения состоят в облегчении условий отвода генерируемого тока и тепла от ФЭП малых размеров, в снижении расхода конструкционных материалов при малых значениях фокусного расстояния концентраторов солнечного излучения и в использовании в качестве основного материала недорогого и исключительно стойкого в атмосферных условиях силикатного стекла. Подробнее эти преимущества описаны, например, в [4,6].

На рис. 1 показаны варианты оптических схем пары „линза—ФЭП“ для разрабатываемых модулей. В варианте рис. 1, *a* ФЭП помещен во внутренний объем модуля. Защита от окружающей среды осуществляется фронтальной и тыльной стеклянными панелями, а также стенками модуля. Следует отметить, что внутренний объем модуля не может быть полностью герметизирован из-за значительных вариаций рабочей температуры и возникающих при этом перепадов давления по отношению к окружающей среде. Воздушный соединительный канал должен быть снабжен устройством для предотвращения попадания пыли и влаги. В варианте рис. 1, *b* ФЭП размещен на внешней стороне тыльного стеклянного основания модуля. Защита от окружающей среды здесь осуществляется благодаря полной герметизации тонкого

воздушного зазора между профилированной теплопроводящей пластиной и стеклянным основанием. Однако оптическая схема включает дополнительный элемент — плоскую стеклянную панель.

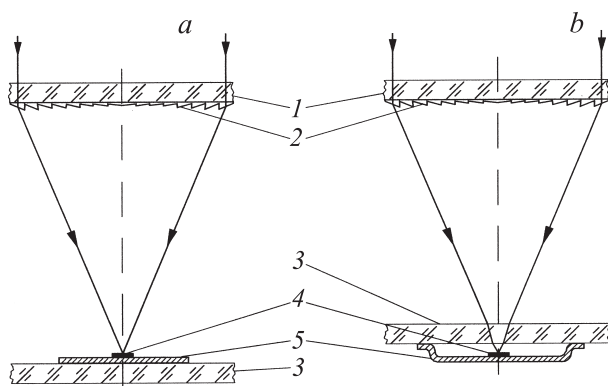
Ниже рассматривается принцип оптимизации профиля линзы применительно к трехкаскадным ФЭП. Обосновывается выбор параметров пары „концентратор—ФЭП“ в составе элементов модуля, схема которого представлена на рис. 1, *a*. Очевидно, что принцип такой оптимизации будет применим и к схеме рис. 1, *b*.

## Расчет эффективности пары „концентратор—ФЭП“ для определения параметров линзы Френеля

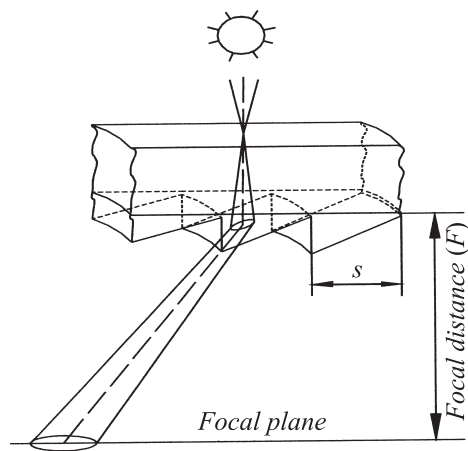
Эффективность функционирования каждой пары „концентратор—ФЭП“ в фотоэлектрическом модуле зависит от выбора таких параметров, как размеры линзы Френеля в плане, ее фокусное расстояние, диаметр фотопринимающей поверхности ФЭП. При этом на выбор параметров влияет учет технологических условий изготовления и конструктивные ограничения. В экономическом аспекте нужно, чтобы ФЭП, стоимость которого составляет значительную часть общей стоимости солнечной установки, имел минимальную площадь и соответственно кратность концентрирования была максимальной. Ограничения здесь накладываются способностью структуры ФЭП эффективно работать при больших плотностях фототока, однако в настоящей статье этот аспект не рассматривается.

При угловом размере Солнца в  $32'$  минимальный размер фокусного пятна составляет  $0.0093F$ , где  $F$  — фокусное расстояние линзы. В рассматриваемой конструкции модуля используются круговые линзы Френеля с коническими микропризмами постоянной ширины  $s$ . На это значение увеличивается фокальное пятно. Шаг профиля выбран равным  $0.25$  мм исходя из ограничений, накладываемых технологией изготовления прецизионных матриц для линз Френеля. Простые оценки показывают, что в этом случае размер фокального пятна увеличивается в основном за счет хроматической аберрации.

Для определения других параметров, оптимальных для пары „концентратор—ФЭП“ была создана математическая модель, описывающая проход через линзу Френеля той части солнечного излучения, которая, поглощаясь в ФЭП, вносит вклад в фототок. Падающее излучение представляется состоящим из конусов монохроматических лучей с углом при вершине, равным угловому диаметру Солнца (рис. 2). Вершины конусов расположены на фронтальной поверхности стеклянного основания линзы на одинаковом расстоянии друг от друга. Рассматривается преломление внешних лучей конуса на наклонной поверхности микропризмы и определяется их местоположение в фокальной плоскости. Каждой области в фокальной плоскости, ограниченной внешними



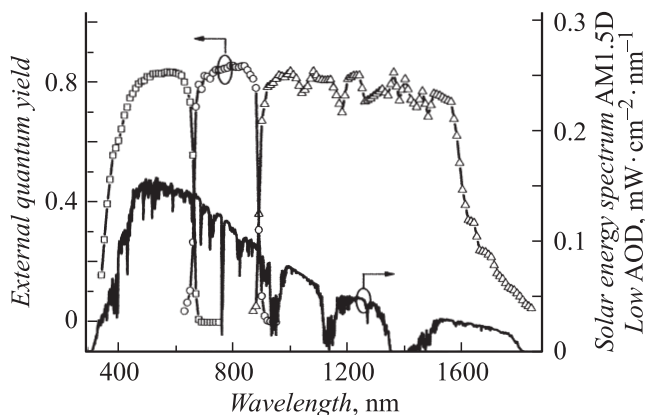
**Рис. 1.** Варианты оптических схем разрабатываемых модулей: 1 — фронтальная стеклянная панель; 2 — силиконовый профиль линзы Френеля; 3 — тыльное стеклянное основание; 4 — ФЭП; 5 — теплопроводящая пластина.



**Рис. 2.** Ход лучей в математической модели концентрации излучения.

лучами, сопоставляется энергия излучения, относящаяся ко всем лучам исходного конуса с учетом потерь из-за отражения на границах сред с разными показателями преломления. Разница по энергии внутри конуса, возникающая после преломления, и влияние эффекта краевого затемнения диска Солнца не учитываются. Влияние этих факторов несущественно, а учет их в незначительной степени уменьшил бы фокальное пятно.

Монохроматическое распределение интенсивности излучения в фокальной плоскости получается суммированием вкладов исходных конусов. Общее распределение получается суммированием распределений, построенных для последовательности длин волн с постоянным шагом. Шаг последовательности и плотность конусов лучей выбраны так, чтобы их значения не влияли на конечный результат. Каждому монохроматическому распределению сопоставляется доля солнечного излучения, пропорциональная вкладу в фототок ФЭП. Для определения этой доли использовались стандартный спектр



**Рис. 3.** Спектр Солнца AM1.5 (прямое излучение) и спектр фоточувствительности трехкаскадного ФЭП в абсолютных единицах.

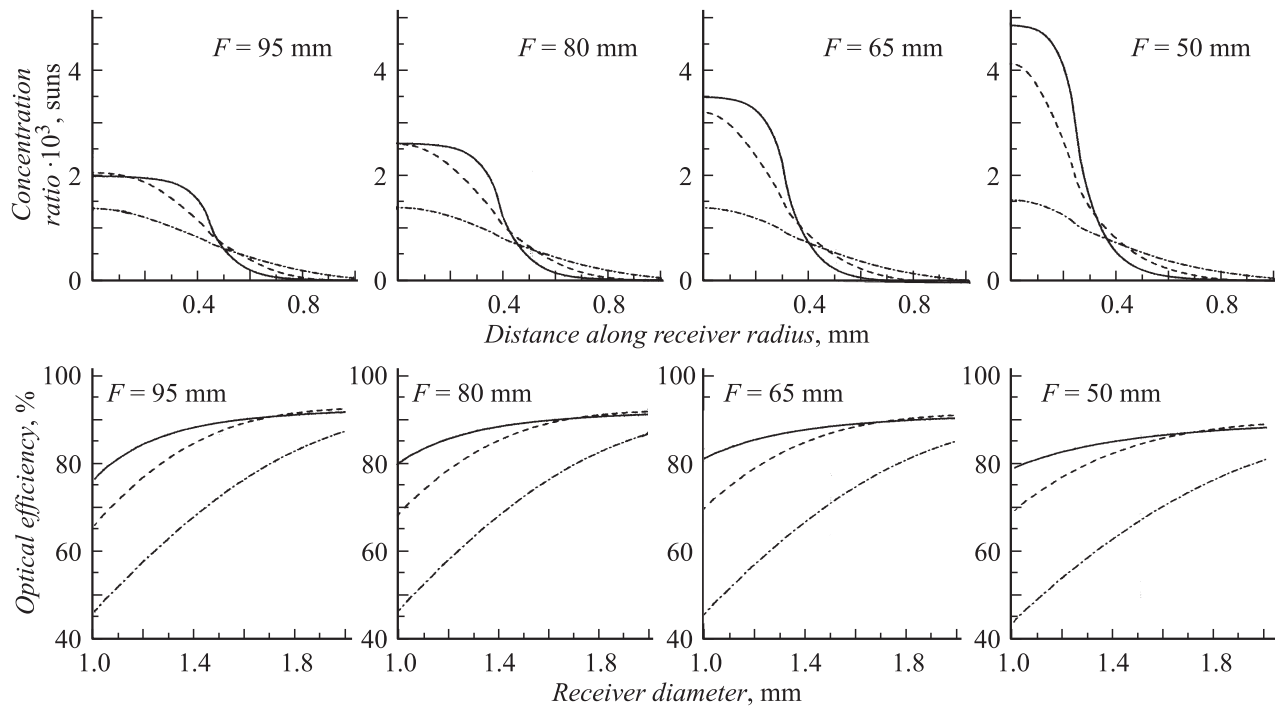
Солнца AM1.5 (прямое излучение) и типичный спектр фоточувствительности высокоэффективного трехкаскадного ФЭП, приведенные на рис. 3. Рассматривается ограниченный диапазон длин волн со значениями  $\lambda$ , отстоящими от выбранной длины волны на половину шага последовательности.

Для расчета хода лучей необходимо знать зависимости показателя преломления материала линзы от длины волны и температуры. Нами была построена дисперсионная кривая для двухкомпонентного силикона ELASTOSIL RT 604 фирмы Wacker при комнатной температуре в диапазоне длин волн  $\lambda = 350 - 1600$  nm. Измерения проводились путем определения углов отклонения лучей тестовой призмой. Температурная зависимость показателя преломления измерялась для одной длины волны  $\lambda = 633$  nm в диапазоне от 5 до 45°C. Предполагалось, что дисперсионная кривая при изменении температуры не меняет свою форму и целиком сдвигается вдоль оси показателей преломления.

Оптическая эффективность пары „концентратор—ФЭП“ вычисляется из распределения излучения в фокальной плоскости интегрированием по всей фоточувствительной поверхности ФЭП (затенение контактной сеткой не учитывалось, поскольку оно уже учтено в величине внешнего квантового выхода для ФЭП, см. рис. 3). Известно, что фототок в ФЭП с монокристаллической структурой InGaP/GaAs/Ge равен наименьшему среди токов каждого каскада. В связи с этим оптическая эффективность линзы определялась отдельно для каждого каскада. Результирующая оптическая эффективность принималась равной наименьшей из значений эффективности, относящихся к верхнему или среднему каскадам ФЭП, значения эффективности линзы для нижнего каскада, которое в этом случае должно быть умножено на коэффициент 1.5, что учитывает избыточную генерацию фототока в этом каскаде.

## Подбор оптимальных параметров линзы Френеля

Угол наклона каждой микропризмы рассчитывается из условия, что луч, падающий перпендикулярно основанию линзы, преломляется в середине наклонной поверхности и пересекает оптическую ось в фокальной плоскости на заданном фокусном расстоянии  $F$ . Величина угла наклона также зависит от местоположения микропризмы и используется в расчетах показателя преломления  $n$ . Именно при этом значении  $n$  при данной температуре для луча с соответствующей, согласно дисперсионной зависимости, длиной волны расстояние  $F$  будет фокусным расстоянием линзы. Необходимо, чтобы во всех остальных спектральных интервалах лучи были расфокусированы оптимальным образом. При определении углов наклона всех микропризм данной линзы расчетный показатель преломления не изменялся. Подбор параметра  $n$  производился с помощью вычислительной



**Рис. 4.** Сверху — кратность концентрирования солнечного излучения вдоль радиуса ФЭП, снизу — зависимости оптической эффективности линз от диаметра ФЭП. Сплошные кривые, пунктир и штрих-пунктир относятся к верхнему, среднему и нижнему каскадам соответственно.

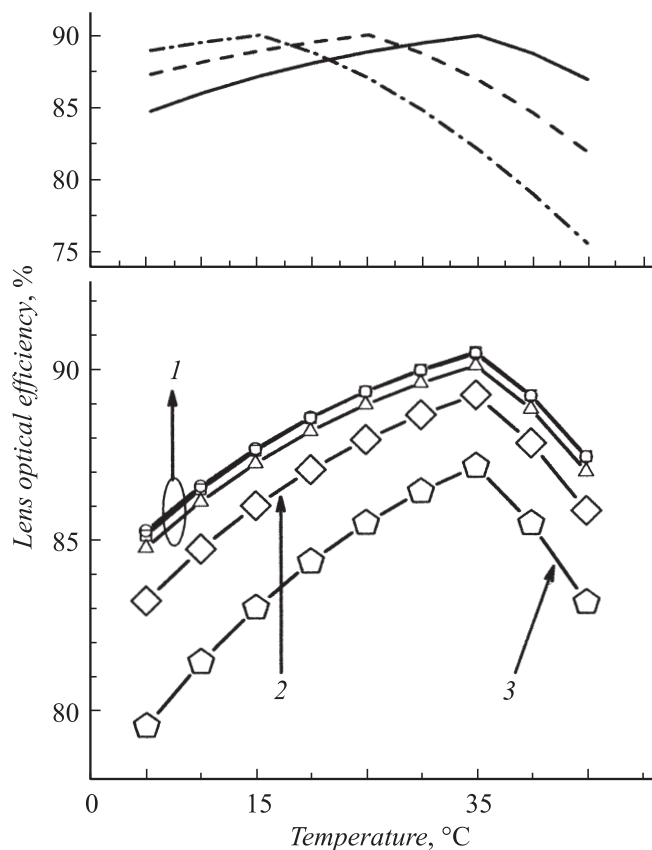
программы. Для заданных параметров (фокусное расстояние, размер линзы и диаметр  $d$  фотоприемной поверхности ФЭП) и варьируемого показателя преломления строился профиль линзы Френеля и рассчитывалась ее оптическая эффективность; критерий выбора профиля — максимальное значение оптической эффективности пары „концентратор—ФЭП“.

На рис. 4 (вверху) приведены расчетные значения кратности концентрирования солнечного излучения вдоль радиуса фотоактивной поверхности для трех каскадов ФЭП при заданных расстояниях между линзой и ФЭП  $F = 95, 80, 65$  и  $55$  mm. Снизу — зависимости оптической эффективности линз от диаметра ФЭП при тех же значениях  $F$ . Параметр  $n$  подбирался для каждой линзы размером  $40 \times 40$  mm с температурой  $25^\circ\text{C}$  и ФЭП с  $d = 1.7$  mm. С помощью распределений, представленных на рис. 4, можно оценить преимущества и недостатки линз с разным фокусным расстоянием.

Известно, что чем больше фокусное расстояние, тем более равномерно освещается ФЭП, однако с увеличением фокального пятна перестает выполняться требование минимальной площади ФЭП. При уменьшении фокусного расстояния улучшается разориентационная характеристика модуля. Однако при меньшем фокусном расстоянии возрастает несоответствие локальных концентраций в разных каскадах, что приводит к росту латеральных токов, протекающих внутри структуры между каскадами, т.е. повышаются омические потери. Существенное повышение кратности концентрирования

солнечного излучения в центре может приводить к ограничениям из-за омических потерь в контактной сетке и из-за локального перегрева ФЭП. В целом рис. 4 может быть использован для ориентировки при выборе значений фокусного расстояния линзы и диаметра ФЭП с учетом конкретных фотоэлектрических параметров ФЭП (его способности работать при повышенных уровнях освещенности) и приемлемой величины оптической эффективности концентрирующей системы. Например, близкие к предельно возможным значения оптической эффективности достигаются при использовании сравнительно „длиннофокусных“ линз и ФЭП диаметром 1.7 mm и более.

Работы по выяснению влияния температуры на характеристики линз Френеля проводились в рамках завершающего этапа (2008 г.) проекта FULLSPECTRUM, финансируемого Европейской комиссией. На рис. 5 (вверху) проиллюстрировано влияние выбора расчетного показателя преломления на вид зависимости оптической эффективности пары „линза—ФЭП“ от температуры ( $F = 70$  mm,  $d = 1.7$  mm). Можно видеть, что наиболее эффективно будет работать модуль с линзами, расчет которых проводился для  $T = 35^\circ\text{C}$ . При этом кривая зависимости эффективности от температуры симметрична в наиболее реальном ожидаемом диапазоне работы концентраторных модулей ( $T = 10\text{--}45^\circ\text{C}$ ). Также для профилей линз со значением расчетной температуры  $T = 35^\circ\text{C}$  были построены результирующие зависимости в диапазоне  $F = 50\text{--}90$  mm (рис. 5, внизу). Видно,



**Рис. 5.** Зависимость результирующих значений оптической эффективности линз от температуры. Сплошная кривая, пунктир и штрихпунктир относятся к линзам с  $F = 70$  mm, расчет которых велся для  $T = 35, 25$  и  $15^\circ\text{C}$  соответственно.  $F = 90, 80, 70$  (1),  $60$  (2),  $50$  mm (3).

что наиболее предпочтительное значение фокусного расстояния для линз размером  $40 \times 40$  mm и трехкаскадным ФЭП с  $d = 1.7$  mm находится в диапазоне 70–90 mm.

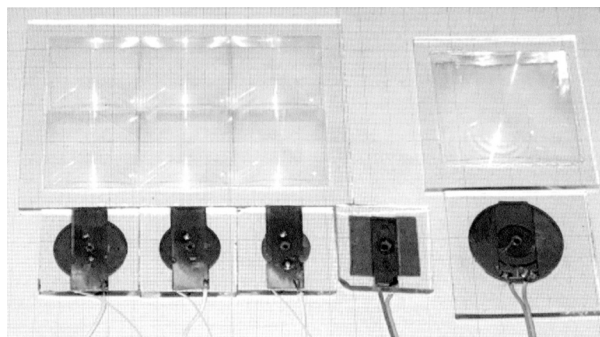
Следует отметить, что полученные результаты могут быть распространены и на линзы других размеров при пропорциональном изменении фокусного расстояния и диаметра ФЭП. При движении в сторону уменьшения будет возрастать влияние фиксированного шага нарезки линзы Френеля. Дополнительным негативным фактором в этом случае может быть чрезмерное уменьшение размеров ФЭП, что может затруднить их монтаж и электрическое коммутирование. При движении в сторону увеличения размеров концентраторной линзы наиболее критичным становится условие обеспечения достаточного теплоотвода от ФЭП. Для практического конструирования солнечных концентраторных модулей нами выбраны два типоразмера линз Френеля:  $40 \times 40$  mm при  $F = 70$  mm;  $60 \times 60$  mm при  $F = 105$  mm. Диаметр фоточувствительной площадки ФЭП в первом случае составляет 1.7 mm, во втором — 2.3 mm.

## Физическое моделирование процесса отвода тепла от каскадного ФЭП

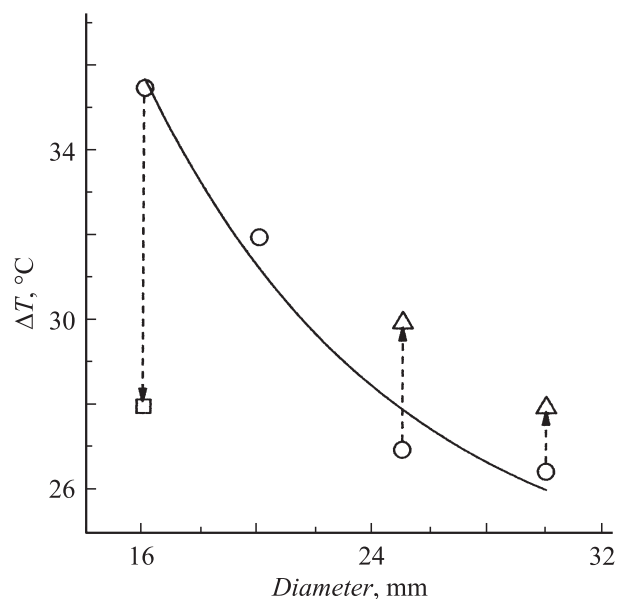
Обеспечение приемлемого теплового режима ФЭП является одной из задач оптимизации конструкции солнечного фотоэлектрического модуля. Отвод тепла от ФЭП осуществляется путем начального разведения теплового потока по медной пластине и последующего сброса во внешнюю среду за счет излучения и контакта с окружающим воздухом. Благодаря существенному снижению плотности теплового потока, который оказывается порядка плотности мощности падающего солнечного излучения до концентрирования, эффективный теплосброс может осуществляться через толщу тыльного стеклянного основания модуля несмотря на низкую теплопроводность стекла. Следует отметить, что тыльная пластина могла бы изготавливаться и из более теплопроводящего и недорогого материала, например, из листовой стали. Однако применение стекла оправдано его исключительно высокой стойкостью к условиям внешней среды, малым коэффициентом теплового расширения (фокальные пятна линз мало смещаются относительно площадок ФЭП при изменении температуры) и отличными диэлектрическими свойствами (коммутация смонтированных ФЭП в параллельно-последовательную цепь может быть произвольной при обеспечении электробезопасности модуля). Кроме того, в этом случае имеется возможность его использования в качестве защитного стекла для ФЭП (рис. 1, b). Каждый ФЭП припаян на медную теплопроводящую пластину, а эта пластина, в свою очередь, приклеена к тыльному основанию модуля.

Из-за неопределенностей, связанных со свойствами тепловых контактов в системе и условиям воздушно-конвекционного теплосброса, для прогнозирования теплового режима ФЭП в модуле нами было предпринято не компьютерное, а физическое моделирование процесса отвода тепла. Были изготовлены фрагменты тыльного основания модуля с размерами, соответствующими размерам одиночных концентраторных линз Френеля (рис. 6).

Каждый образец содержал медную теплопроводящую пластину варьируемых размеров и смонтированный на пластине трехкаскадный ФЭП. Тепловыделение в ФЭП обеспечивалось при пропускании через него прямого тока от внешнего источника. Значения тока и падения напряжения на ФЭП подбирались так, чтобы выделяемая мощность была равна тепловой, образующейся в ФЭП при концентрированной солнечной засветке и подключении его к электрической нагрузке с оптимальными параметрами. Например, в случае идеальной линзы Френеля размером  $40 \times 40$  mm при плотности мощности прямого солнечного излучения  $850 \text{ W/mm}^2$  на ФЭП попадало бы излучение мощностью 1.36 W. С учетом потерь в линзе (в основном на отражение) и отвода примерно трети мощности, генерируемой током во внешнюю электрическую нагрузку, тепловыделение в ФЭП, предназначенное для рассеяния, принималось равным 1 W. Для линз



**Рис. 6.** Фотография тестовых образцов линз Френеля ( $40 \times 40$  и  $60 \times 60$  mm) и физических моделей теплоотводов, соответствующих размерам линз, со смонтированными на них каскадными ФЭП.



**Рис. 7.** Зависимость перегрева  $\Delta T$  чипов ФЭП относительно температуры окружающей среды от диаметра медной теплопроводящей пластины. Кружки и треугольники — для пластин толщиной 1 и 0.5 mm соответственно, причем сами пластины приклеены к стеклянному основанию толщиной 4 mm; квадрат — для пластины толщиной 1 mm. Площадь теплосбора соответствует квадратной концентраторной линзе со стороной 40 mm (подводимая тепловая мощность равна 1 W).

Френеля размером  $60 \times 60$  mm подводимая к ФЭП в экспериментах электрическая мощность составляла 2.2 W. Термопарами измерялась температура непосредственно под ФЭП и температура окружающего воздуха. Образцы теплоотводов располагались в пространстве под наклоном  $45^\circ$  к горизонту, приближаясь к тем условиям, которые имеют место в реальном модуле при слежении за Солнцем. В ряде экспериментов применялся слабый обдув теплоотводов с тыльной стороны при скорости потока воздуха 1–2 m/s. Для более полной имитации условий работы ФЭП в модуле сторона каждого образца,

обращенная к „Солнцу“, закрывалась коробочкой из теплоизолирующего материала со стеклянным верхом, причем высота коробочки делалась равной фокусному расстоянию линзы Френеля. Это обеспечивало конвекцию воздуха в замкнутом объеме „модуля“ и частичный теплоперенос к его фронтальной поверхности. В соответствии с рис. 1 медные теплопроводящие пластины приклеивались как на внутреннюю, так и на наружную сторону тыльного основания. Во втором случае медная пластина могла покрываться теплорегулирующей краской.

Значения перегрева  $\Delta T$  чипов ФЭП по сравнению с температурой окружающей среды в зависимости от диаметра медной теплопроводящей пластины для различных условий эксперимента представлены на рис. 7 и в табл. 1, 2. На рис. 7 демонстрируется влияние диаметра медной теплопроводящей пластины при ее расположении внутри модуля и теплоподводе, соответствующем работе с линзой Френеля размером  $40 \times 40$  mm. Здесь также показано изменение значения  $\Delta T$  при уменьшении толщины пластины от 1 до 0.5 mm и при наклеивании на стальное основание вместо стеклянного.

Данные табл. 1 соответствуют условиям работы ФЭП при более интенсивном теплоподводе, соответствующем освещению от большей по размерам линзы 60 mm. Из данных табл. 2 можно оценить влияние теплорегулирующей

**Таблица 1.** Значения перегрева  $\Delta T$  чипов ФЭП по сравнению с температурой окружающей среды для указанных случаев теплосбора и при использовании концентраторной линзы со стороной 6 mm (расположение теплопроводящей пластины внутри модуля; подводимая тепловая мощность 2.2 W)

Размеры медной теплопроводящей пластины, mm	$\Delta T$ , при наклеивании пластины:	
	на стеклянное основание толщиной 4 mm	на стальное основание толщиной 1 mm
$\varnothing 24 \times 1$	49	–
$\varnothing 40 \times 1$	34	32
$\varnothing 40 \times 0.5$	40	–

**Таблица 2.** Влияние обдува на величину перегрева  $\Delta T$  чипов ФЭП по сравнению с температурой окружающей среды при расположении теплопроводящей пластины на внешней поверхности модуля (подразумевается использование концентраторной линзы со стороной 40 mm при подводимой тепловой мощности 1 W)

Медная теплопроводящая пластина размером $30 \times 30 \times 0.5$ mm	$\Delta T$ , °C
Поверхность меди без покрытия:	
– без обдува, наклон поверхности $45^\circ$ к горизонту	26.5
– обдув при скорости ветра 1–2 m/s	10
Поверхность окрашена теплорегулирующей краской:	
– без обдува, наклон поверхности $45^\circ$ к горизонту	22
– обдув при скорости ветра 1–2 m/s	12

рующего покрытия на медных пластинах и обдува при расположении пластин на внешней стороне модуля.

Обобщая данные рис. 7 и таблиц, можно заключить, что при работе ФЭП с линзой размером  $40 \times 40$  мм следует ожидать перегрева на  $25\text{--}30^\circ\text{C}$  при внутреннем расположении в модуле. При внешнем расположении и окрашивании медной пластины краской с высоким коэффициентом излучения перегрев уменьшается. Даже незначительный обдув существенно снижает перегрев, причем в этом случае краска играет негативную роль, увеличивая тепловое сопротивление при теплосбросе.

По-видимому, перегрев  $\Delta T$  порядка  $15^\circ\text{C}$  можно рассматривать как типичный для ФЭП в натуральных условиях работы солнечного фотоэлектрического модуля при расположении теплоразводящих пластин на внешней стороне тыльного основания. При внутреннем расположении пластин перегрев может увеличиться примерно до  $25^\circ\text{C}$  даже с обдувом, поскольку толщина стекла имеет значительное тепловое сопротивление. Увеличение линейных размеров линзы Френеля при одновременном увеличении размеров теплоразводящей пластины также приводит к некоторому увеличению перегрева ФЭП.

## Выходные характеристики полноразмерных концентраторных модулей

На данном этапе работ полноразмерные модули, объединяющие 144 пары „линза—ФЭП“, изготавливались по оптической схеме рис. 1, *a* при размере единичной линзы Френеля  $40 \times 40$  мм и диаметре фоточувствительной площадки ФЭП 2.3 мм. Выбор ФЭП большего диаметра обусловлен допусками оснастки для совмещения оптических центров большого количества линз и ФЭП в одном модуле в лабораторных условиях. Как и ранее [6], панели линз формировались путем полимеризации силиконового компаунда в негативно профилированной матрице в контакте с поверхностью пластины из силикатного стекла. Тыльная электрогенерирующая панель имела стеклянное основание, к которому были прикреплены медные теплоразводящие пластины диаметром 24 мм с припаянными к ним чипами ФЭП. Каждые 12 ФЭП, объединенные в линейки, соединялись параллельно, а все 12 линеек были соединены последовательно. В модулях использовались трехкаскадные InGaP/GaAs/Ge ФЭП с КПД около 33% (при измерении на импульсном имитаторе солнечного излучения при температуре  $25^\circ\text{C}$ ). Изображения модулей, установленных на испытательном стенде с устройством слежения за Солнцем на крыше ФТИ им. А.Ф. Иоффе, приведено на рис. 8.

Измерения КПД модулей проводились в полдень одного из солнечных дней сентября 2008 г. Значения плотности мощности прямой солнечной радиации  $E$  измерялись с помощью калиброванного пиргелиометра СН-1 фирмы „Kipp and Zonen“. При  $E = 870 \text{ W/mm}^2$  величина выходной мощности составляла 48.8 Вт и КПД достигал 24.3% (см. нагрузочную ВАХ 1 на рис. 9).

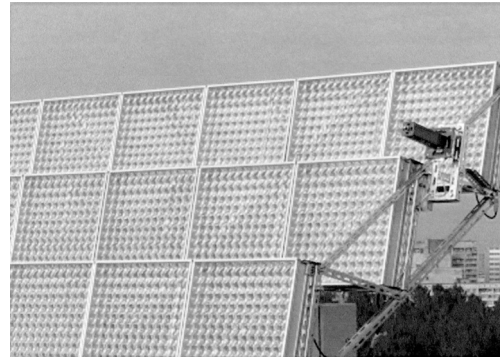


Рис. 8. Фотографии модулей, установленных на испытательном стенде ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Несмотря на довольно низкую температуру окружающего воздуха при натуральных измерениях ( $10^\circ\text{C}$ ), температура ФЭП превышала  $25^\circ\text{C}$  — температуру, принятую за стандартную при сравнительных измерениях КПД. Различие в значениях КПД для ФЭП (33%) и для концентраторного модуля в целом обусловлено несколькими факторами: оптическими потерями в линзовой панели; потерями на неидеальное совмещение оптических центров пар „линза—ФЭП“; электрическими потерями при параллельно—последовательном соединении ФЭП со слегка отличающимися выходными параметрами; перегревом ФЭП по сравнению с температурой, при которой проводится их сертификация. Подтверждением данного объяснения служит то, что в тестовых модулях меньших размеров при введении коррекции на стандартную ( $25^\circ\text{C}$ ) температуру ФЭП значение КПД достигало 26.5% (см. нагрузочные ВАХ 2 и 3 на рис. 9).

При налаживании масштабного автоматизированного производства и при применении более эффективных

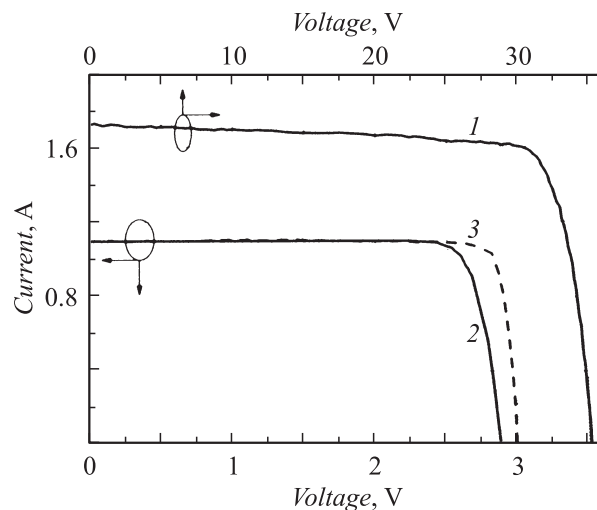


Рис. 9. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) полноразмерного ( $0.5 \times 0.5$  м) концентраторного модуля при солнечном освещении (кривая 1, КПД=24.3%), а также ВАХ восьмилинзового тестового модуля в натуральных и лабораторных условиях (кривая 2, КПД=24.5%; 3, КПД=26.5%)

ФЭП с КПД 38–39% ожидается реализация значеный КПД солнечных концентраторных модулей не менее 30%.

## Заключение

В работе рассмотрены первоочередные аспекты, учитывать которые необходимо при создании солнечного концентраторного модуля — как эффективно сфокусировать излучение линзами Френеля и как эффективно отвести остаточное тепло от ФЭП. С использованием методов теоретического и экспериментального моделирования этих процессов определены конструктивные параметры соответствующих элементов модуля. В практических полноразмерных модулях измеренное в натуральных условиях значение КПД составило 24.3%, а в тестовых модулях — 26.5% с коррекцией на стандартную температуру измерений, что существенно превосходит значения КПД обычных модулей на основе кремния. Решение проблемы прецизионного монтажа и использование более эффективных ФЭП позволит выйти на уровень значений КПД в концентраторном модуле порядка 30%.

Продолжение работ связано с конструктивным обеспечением автоматического слежения модулей за Солнцем в течение светового дня и усовершенствованием оптической схемы фокусировки излучения с целью повышения кратности концентрирования и расширения углов восприятия солнечного излучения в ФЭП.

Работа выполнена при поддержке Европейской комиссии в рамках проекта FULLSPECTRUM (contract no. SES6-CT-2003-502620) и гранта РФФИ № 09-08-004112-а.

## Список литературы

- [1] <<http://www.eupvplatform.org/>> A Strategic Research Agenda for Photovoltaic Solar Energy Technology.
- [2] <[http://www1.eere.energy.gov/solar/solar\\_america/](http://www1.eere.energy.gov/solar/solar_america/)>
- [3] Андреев В.М., Гриликес В.А., Румянцев В.Д. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения. Л.: Наука, 1989.
- [4] Алферов Ж.И., Андреев В.М., Румянцев В.Д. // ФТП. 2004. Т. 38. Вып. 8. С. 937–948.
- [5] Alferov Zh.I., Andreev V.M., Romyantsev V.D. // High-Efficient Low-Cost Photovoltaics. Springer Ser. in Opt. Sci. 2008. Vol. 140. P. 101–141.
- [6] Romyantsev V.D. // Concentrator Photovoltaics. Springer Ser. in Opt. Sci. 2007. Vol. 130. P. 151–174.
- [7] Karam N.H., Sherif R.A., and King R.R. // Springer Ser. in Opt. Sci. 2007. Vol. 130. P. 199–219.
- [8] Bett A.W., Dimroth F., Siefer G. // Springer Ser. in Opt. Sci. 2007. Vol. 130. P. 67–87.
- [9] Андреев В.М., Румянцев В.Д., Лантратов В.М., Шварц М.З., Калюжный Н.А., Минтаиров С.А. // Тр. Междунар. форума по нанотехнологиям. М., 2008. Т. 1. С. 360–362.
- [10] Romyantsev V.D., Chosta O.I., Grilikhes V.A., Sadchikov N.A., Soluyanov A.A., Shvarts M.Z., Andreev V.M. // 29<sup>th</sup> IEEE PVSC. New Orleans, 2002. P. 1596–1599.
- [11] Romyantsev V.D., Sadchikov N.A., Chalov A.E., Ionova E.A., Friedman D.J., Glenn G. // Proc. IEEE 4<sup>th</sup> World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion. Hawaii, 2006.