

Концентраторные модули нового поколения на основе каскадных солнечных элементов: конструкция, оптические и температурные свойства

© В.М. Андреев,¹ Н.Ю. Давидюк,² Д.А. Малевски,¹ А.Н. Паньчак,¹ В.Д. Румянцев,¹
Н.А. Садчиков,¹ А.В. Чекалин,¹ А. Luque^{1,3}

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский академический университет — научно-образовательный центр нанотехнологий РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

³ Instituto de Energía Solar, Universidad Politécnica de Madrid,
28040 Madrid, Spain
e-mail: vdrum@mail.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 6 марта 2014 г.)

В концентраторных модулях нового поколения используются солнечные элементы каскадного типа с наногетероструктурой на основе соединений A^3B^5 , имеющие перспективу достижения КПД порядка 50% при количестве каскадов более трех. Для получения высокого результирующего КПД фотоэлектрического преобразования в энергоустановках и длительного ресурса их функционирования важно обеспечить оптимальное с точки зрения оптики и теплотехники конструирование модулей. В работе рассмотрены основные проблемные аспекты создания солнечных модулей, касающиеся условий оптического концентрирования излучения и условий сброса остаточного тепла. В тексте в основном использованы результаты исследований, полученные в последнее время коллективом ФТИ им. А.Ф. Иоффе при проведении соответствующих поисковых работ.

Введение

На протяжении последних десяти лет в мире формируется новая отрасль электроэнергетики, основанная на фотоэлектрическом преобразовании солнечного излучения в полупроводниковых солнечных элементах (СЭ). Кристаллический кремний остается в мире основным материалом солнечных модулей: около 83% всех модулей изготавливаются на основе кристаллического кремния, около 14% — на основе тонкопленочных структур, и около 3% — на основе других типов, включая рассматриваемые в настоящей работе модули, преобразующие концентрированное солнечное излучение [1,2]. В концентраторных модулях нового поколения используются СЭ каскадного типа с наногетероструктурой на основе соединений A^3B^5 , выращиваемой методом газофазной эпитаксии. Каждый такой СЭ объединяет в одном монокристалле три фотоактивные области GaInP/GaInAs/Ge с соединенными последовательно $p-n$ -переходами [3]. Благодаря внутреннему расщеплению солнечного спектра и оптимальному преобразованию излучения в каждом из трех спектральных интервалов достигнутые значения КПД составляют 40–44% [4,5]. Из-за сравнительно высокой стоимости технологического процесса масштабное применение высокоэффективных наногетероструктурных СЭ каскадного типа в наземной электроэнергетике возможно только при их совместном использовании с недорогими в производстве оптическими компонентами, концентрирующими излучение на сравнительно малой поверхности чипа фотопреобразователя. Оптическая ось пары „концентратор–СЭ“ должна быть ориентирована на солнце, причем при

применимых на практике кратностях концентрирования 500–1000х и более геометрическая точность взаимного расположения элементов в паре и угловая точность слежения оказываются высокими. Результирующая экономичность разработки фотоэлектрических модулей с достаточно высокой кратностью концентрирования определяется высокими значениями КПД, превышающими в 2–3 раза КПД СЭ других типов, радикальным снижением расхода полупроводниковых материалов за счет концентрирования излучения на малые поверхности, а также повышенной выработкой электроэнергии в течение светового дня за счет слежения за солнцем. Будучи наиболее высокотехнологичным, данное направление получило более позднее развитие по сравнению с другими направлениями солнечной электроэнергетики, однако оно имеет и наиболее высокий потенциал для дальнейшего роста эффективности.

Прежде всего имеется перспектива для дальнейшего увеличения КПД при разработке структур СЭ с количеством каскадов более трех. Ожидается, что реальные значения КПД фотоэлектрического преобразования концентрированного солнечного излучения порядка 50% смогут быть достигнуты в течение ближайших нескольких лет в 4–6-каскадных структурах [6]. Однако следует понимать, что для обеспечения высокого результирующего КПД фотопреобразования энергоустановок и длительного ресурса функционирования важно обеспечить оптимальное с точки зрения оптики и теплотехники конструирование модулей. Оценки показывают, что примерно 80% расходов на изготовление и материалы при производстве таких энергоустановок приходится именно на оформление модулей и механических систем для

их размещения и поворота в соответствии с движением солнечного диска. Настоящая работа посвящена рассмотрению основных проблемных аспектов при создании солнечных модулей нового поколения, касающихся условий концентрирования излучения и условий сброса остаточного тепла. В изложении в основном использованы результаты исследований, полученные в последнее время коллективом ФТИ им. А.Ф. Иоффе при проведении соответствующих поисковых работ.

Конструктивный облик солнечного концентраторного модуля

При создании концентраторного модуля должны учитываться требования по оптической эффективности концентраторов излучения, способности СЭ генерировать и отводить большой фототок, а также способности структурных компонентов модуля отводить и рассеивать остаточное тепло. Важную роль играет выбор конструктивного облика модуля. Например, одну и ту же высокую кратность концентрирования солнечного излучения можно получить, используя концентратор с линейными размерами 20×20 см, фокусирующий свет на СЭ размерами 1×1 см, либо используя концентратор с размерами 2×2 см и СЭ 1×1 мм. Недостатками в первом случае будут трудности отвода большого количества тепла и большого абсолютного фототока. Конструктивная толщина модуля, задаваемая фокусным расстоянием концентратора, будет значительной. Во втором случае „малоразмерных“ единичных модулей эти недостатки в значительной степени устраняются [7], но требуется высокая точность взаимного позиционирования большого количества СЭ и концентраторов. Эта задача решается при использовании существующего автоматического оборудования, применяемого при производстве изделий микроэлектроники.

Линзовые концентраторы объединяются в линзовую панель. Очевидно, существует оптимум по геометрическим параметрам пары „СЭ–концентратор“. В новых СЭ каскадного типа имеет место увеличение генерируемого напряжения за счет большего количества $p-n$ переходов, соединенных в кристалле последовательно. Деление солнечного спектра на зоны позволяет увеличить КПД и одновременно уменьшить плотность генерируемого фототока, так что требования по отводу тока и остаточного тепла смягчаются и кратность концентрирования солнечного излучения может быть более высокой.

Важнейшим компонентом концентраторного модуля является непосредственно концентратор. В мировой практике в основном используются концентраторы в виде линз Френеля, изготовленные из прозрачного акрилового материала методом горячей штамповки. Акрил прозрачен в видимой области, но имеет полосы поглощения в ближней ИК-области спектра. В качестве альтернативного материала для изготовления линз Френеля все более широко применяется прозрачный силиконовый компаунд [8,9]. Механической основой линзовой панели

в этом случае служит лист силикатного стекла. Стекло является дешевым высокопрозрачным материалом, стойким к абразивному воздействию. На внутреннюю сторону стекла наносится тонкий слой силикона, в котором формируется профиль френелевских линз. Полимеризация силиконового компаунда может происходить при температурах, близких к комнатной, и не требует оборудования, создающего давление. Расход силикона в пленочном исполнении минимален, что обеспечивает дешевизну линзовых панелей.

В модуле, имеющем фронтальную панель линзовых концентраторов, солнечные элементы также объединяются в фотоприемную панель, отстоящую от линзовой панели на расстоянии, равном фокусному расстоянию линз. Так формируется концентраторный модуль панельного типа с „малоразмерными“ единичными „субмодулями“. Материал фотоприемной панели должен иметь теплопроводность, удовлетворяющую условию достаточного отвода тепла от СЭ. Этот материал должен быть согласован по коэффициенту термического расширения с материалами основных конструктивных компонентов модуля. В мировой практике общий подход состоит в применении меди для изготовления теплопроводящих пластин для первичного монтажа СЭ, а также алюминия для изготовления теплосбрасывающих частей модуля — оребренных теплоотводов и корпуса [10]. Несогласованность по коэффициентам расширения материалов СЭ и теплоотвода, как правило, требует введения дополнительной развязки в виде теплопроводящей керамической пластины под СЭ при его монтаже. При этом также появляется возможность последовательного соединения больших массивов СЭ для получения высокого выходного напряжения модуля. Однако стоимость материалов теплоотвода оказывается значительной.

В модулях, созданных в ФТИ [11], в качестве основного конструкционного материала фотоприемной панели используется обычное листовое силикатное стек-

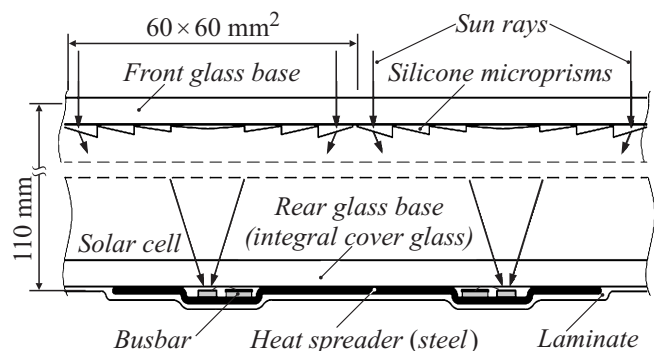


Рис. 1. Схематический разрез фрагмента солнечного концентраторного модуля, разработанного в ФТИ. Фронтальная линзовая панель модуля содержит 128 линз Френеля с композитной структурой „стекло–силикон“. Тыльная фотоприемная панель содержит 16 стальных пластин, на каждой из которых смонтированы по восемь чипов СЭ и по два байпасных диода. Теплопроводящие пластины и СЭ герметизированы ламинирующей пленкой.

Таблица 1. Коэффициенты термического расширения (ТЕС) и теплопроводности (ТС), а также значения теплоемкости (НС) материалов, находящихся в тепловом контакте в концентраторном модуле

Материал	ТЕС, $\mu\text{m}/(\text{mK})$	ТС, $\text{W}/(\text{mK})$	НС, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
Германий	5.8	60	320
Медь	16.7	384	385
Стекло	9	1	800
Сталь 3	12	85	460

ло, такое же, как и для фронтальной линзовой панели. Схематический разрез фрагмента такого модуля представлен на рис. 1. Теплопроводящие пластины для монтажа СЭ изготавливаются из мягкой листовой стали. Применение материалов со сравнительно низкой теплопроводностью оказывается возможным благодаря выбору оптимальных геометрических параметров „малоразмерных“ единичных субмодулей в составе модуля „панельной“ конструкции. СЭ на германиевой подложке и стальные теплопроводящие пластины имеют близкие коэффициенты термического расширения (табл. 1). При пайке СЭ малых размеров не требуется использовать промежуточные термокомпенсирующие пластины. Для минимизации роли стекла в процессах теплопередачи теплопроводящие пластины с СЭ располагаются на внешней стороне тыльной стеклянной пластины модуля. При этом стеклянная пластина является одновременно и механической основой фотоприемной панели, и интегральным защитным окном для всех СЭ в модуле. На внутренней стороне этой пластины возможно размещение вторичных оптических элементов. Необходимость для этого возникает тогда, когда ставятся задачи увеличения кратности концентрирования солнечного излучения в оптической системе, либо расширения разориентационной характеристики модуля в процессе слежения за солнцем.

Благодаря малой высоте профиля теплоотводов в модуле рис. 1 защита СЭ от воздействия внешней среды и его герметизация осуществляются простым способом, состоящим в использовании ламинирующей пленки. Таким образом, технология изготовления концентраторных модулей оказывается подобной той, которая существует для производства плоских модулей, причем с возможностью применения разработанного к настоящему времени высокопроизводительного специализированного оборудования раскладки и ламинирования. Теплопроводящие пластины с СЭ, если их рассматривать как сборочную единицу, сравнимы по величине с пластинами СЭ на основе кремния в плоских модулях (см. левую фотографию на рис. 2). На задней стороне модуля располагается стандартная коммутационная коробка (см. правую фотографию на рис. 2). Таким образом, выполняются стандартные требования к электробезопасности солнечных модулей и энергоустановки в целом.

Концентраторные модули, разработанные в ФТИ, имеют название „modules of SMALFOC-design“ [11]. Аббре-

виатура составлена путем перечисления основных особенностей конструкции модуля: Small-size concentrators, т.е. апертура единичного концентратора в панели выбрана достаточно малой; Multi-junction cells, т.е. модуль использует СЭ каскадного типа с несколькими $p-n$ -переходами; „All-glass“ structure, т.е. основным конструкционным материалом модуля является силикатное стекло; Lamination technology, т.е. СЭ и интегральные теплоотводы, расположенные на тыльной стороне модуля, защищены от внешней среды ламинирующей пленкой; Fresnel Optics for Concentration, т.е. концентрирование солнечного излучения на СЭ осуществляется с помощью линз, сформированных в виде линз Френеля.

Размеры фотоприемной поверхности разработанных модулей составляют $480 \times 960 \text{ mm}$. Разрабатываются две модификации модулей — с линзами размером

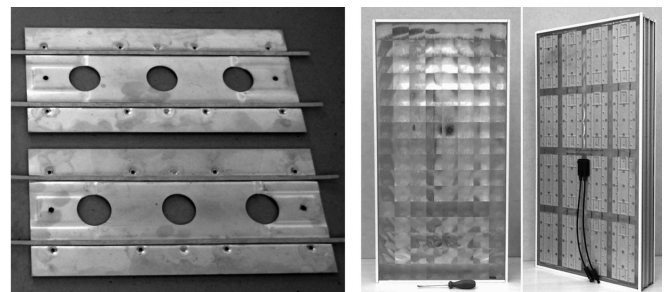


Рис. 2. Слева — фотография стальных теплопроводящих пластин, на каждой из которых методом пайки смонтированы восемь параллельно соединенных чипов СЭ диаметром 2.3 mm и два байпасных диода. Справа — фотографии концентраторного модуля ФТИ в сборе: вид со стороны линзовой панели и вид со стороны ламинированной фотоприемной панели с закрепленной на ней стандартной коммутационной коробкой. Размеры фотоприемной поверхности $480 \times 960 \text{ mm}$, выходное напряжение модуля 48 V (последовательное соединение шестнадцати пластин с СЭ).

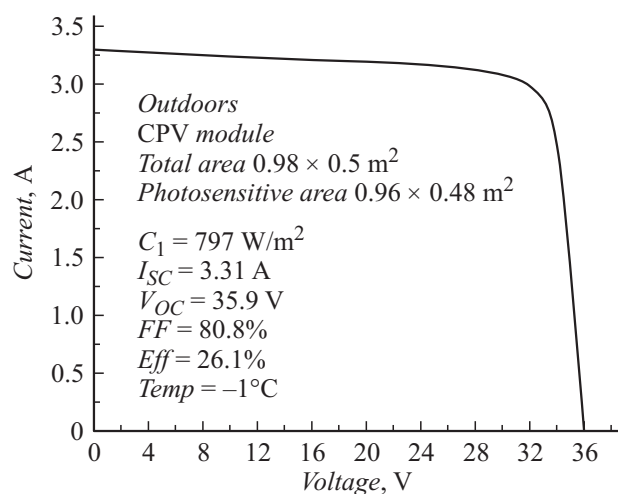


Рис. 3. Выходная вольт-амперная характеристика модуля с панелью из 288 линз при солнечной засветке. Условия и результаты эксперимента приведены на вставке.

40 × 40 mm или 60 × 60 mm (на одной панели соответственно располагается 288 или 128 линз). В первом случае за счет параллельно-последовательного соединения СЭ выходное напряжение модуля составляет 36 V, а во втором случае — 48 V. На рис. 3 в качестве примера представлена выходная вольт-амперная характеристика модуля с панелью из 288 линз при солнечной засветке.

Исследование свойств оптических компонентов солнечных концентраторных модулей

Для получения высокого КПД фотоэлектрического преобразования в концентраторных модулях важно обеспечить наиболее полное соби́рание приходящего на поверхность концентратора солнечного излучения в пределах фотоактивной поверхности СЭ (высокую оптическую эффективность). В общем случае такое соби́рание может быть обеспечено при совместной работе первичных и вторичных оптических компонентов, причем задача для вторичных компонентов может состоять как в дополнительном концентрировании излучения, так и в более равномерном распределении излучения по поверхности СЭ. Если СЭ имеет достаточно низкое внутреннее сопротивление по распределенной и сосредоточенной составляющим [12], то использование вторичного компонента в качестве концентратора позволяет либо уменьшить расход полупроводниковых структур за счет уменьшения размеров чипов СЭ, либо при неизменных размерах расширить допустимый угол ориентации при слежении модуля за солнцем. Если же распределенная составляющая внутреннего сопротивления ограничивает возможность получения высокого КПД, то вторичный оптический компонент целесообразно использовать для более равномерного распределения излучения по поверхности СЭ, не допуская возникновения оптических потерь [13]. На рис. 4 приведена оптическая схема одного из submodule концентраторного модуля ФТИ панельного типа [14], где показан пример возможного взаимодействия первичного солнечного концентратора — линзы Френеля — с вторичной плоско-выпуклой линзой, размещенной на внутренней стороне стеклянного основания фотоприемной панели.

Рассмотрим вначале особенности функционирования первичных линз Френеля, изготовленных по технологии „стекло–силикон“. Наиболее важным здесь будет выбор фокусного расстояния и учет хроматических aberrаций при фокусировании излучения. Также должна учитываться зависимость преломляющей способности силиконовых микропризм от температуры окружающей среды [15,16]. При изменении температуры происходит деформация силиконовых микропризм, вызванная существенным различием коэффициентов теплового расширения стекла и силикона. Проблема обеспечения высокого оптического КПД линз решается по двум направлениям. Во-первых, расчет углов наклона микропризм ведется таким образом, чтобы на поверхности СЭ зоны излучения, обеспечивающие генерацию

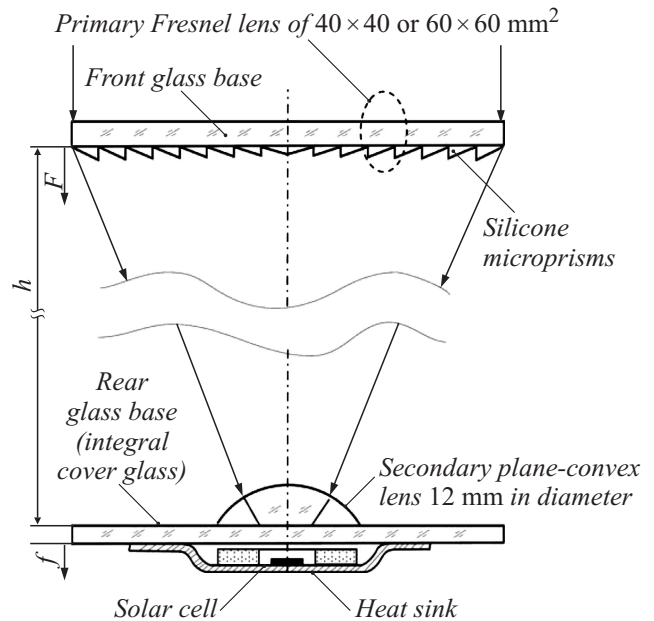


Рис. 4. Оптическая схема одного из submodule концентраторного модуля ФТИ панельного типа с первичным концентратором в виде линзы Френеля и вторичным в виде плоско-выпуклой линзы с гладкими поверхностями.

в верхнем, среднем и нижнем каскадах, максимально перекрывались ценой некоторой дефокусировки в каждой из этих спектральных областей. Перекры́тие зон необходимо для уменьшения влияния слоевых сопротивлений в частях структуры СЭ, ответственных за фотоэлектрическое преобразование в каждом из трех каскадов [15]. Во-вторых, температура полимеризации силиконового профиля выбирается такой, которая будет наиболее вероятной при эксплуатации модуля в дневные часы в определенных климатических условиях. Сформированная при такой температуре геометрия френелевского профиля обеспечит наиболее высокий оптический КПД первичной линзы. На рис. 5 показаны значения оптического КПД в зависимости от температуры для линз Френеля, полимеризация силикона в которых происходила при температурах 25°C и 35°C. Значения КПД приведены для линз размерами 40 × 40 mm с различным фокусным расстоянием. Общим правилом является то, что максимальные значения КПД реализуются для линз, в которых фокусное расстояние превышает боковой размер примерно в 2 раза.

Далее обратим внимание на вторичные линзы, располагаемые на фотоприемной панели (рис. 4). Положительной чертой концентраторного модуля рассматриваемой конструкции является то, что здесь не требуется использование специальных держателей для вторичных линз, так как линзы располагаются на одном основании и допускают применение групповой сборки. Эти линзы изготавливаются из стекла и монтируются также на стекло, причем очень тонкий клеевой контакт находится на заметном расстоянии от области максимальной

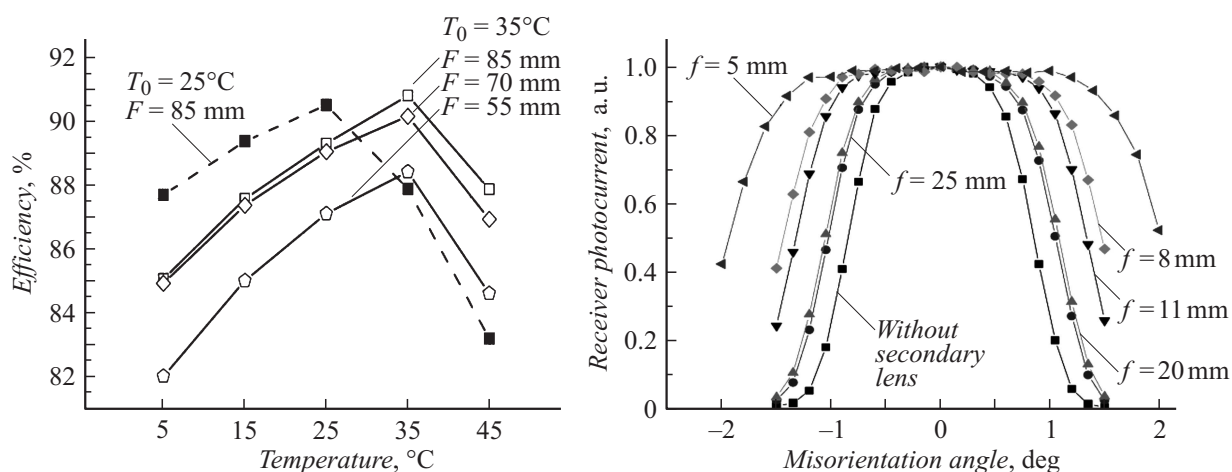


Рис. 5. Слева — значения оптического КПД в зависимости от температуры эксплуатации для линз Френеля, полимеризация силикона в которых происходила при температурах 25°C и 35°C (линзы размерами 40 × 40 mm с фокусным расстоянием 55, 70 и 85 mm). Справа — разориентационные кривые модуля с первичными и вторичными линзами при слежении за солнцем: без вторичных линз и с линзами, различающимися по фокусному расстоянию.

концентрации излучения, что обеспечивает долговременную стабильность оптического контакта. Чипы СЭ с малыми линейными размерами значительно менее подвержены влиянию хроматических aberrаций и неравномерности пространственного распределения излучения, так что вторичные линзы можно использовать для расширения разориентационной характеристики модуля [14,17]. Это их применение проиллюстрировано на графиках в правой части рис. 5. Видно, что для достаточно короткофокусных вторичных линз контур разориентации расширяется примерно в 3 раза по уровню 0.9.

В заключение данного раздела отметим проблему возникновения оптических потерь на отражение и поглощение при прохождении излучения через стеклянные пластины фронтальной и фотоприемной панелей модуля. Объемное поглощение света во всем интересном для практики спектральном диапазоне является пренебрежимо малым в стеклах „солнечного“ качества со сниженным содержанием окислов железа (например, в стеклах марки „Optiwhite“). Потери на отражение

Таблица 2. Значения тока короткого замыкания (I_{sc}), напряжения холостого хода (V_{oc}), фактора заполнения вольт-амперной характеристики (FF) и КПД (Eff) для экспериментального (см. текст) концентратора модуля (12 линз Френеля 40 × 40 mm и столько же соединенных параллельно трехпереходных СЭ со структурой GaInP/GaInAs/Ge)

Параметр	Без стекл. пластины	Стекло „Optiwhite“	Просветленное с двух сторон стекло
I_{sc} , A	1.85	1.64	1.75
V_{oc} , V	3.05	3.06	3.06
FF , %	83.5	83.7	83.6
Eff , %	30.7	27.3	29.2

можно в значительной степени снизить при использовании антиотражающих покрытий, создаваемых путем осаждения тонких слоев соответствующих материалов либо путем модификации поверхности стекла [18,19]. В последние годы в связи с расширяющимся применением солнечных модулей различных типов проблема снижения коэффициента отражения от стеклянных поверхностей получила ряд экономичных решений. Для передней поверхности концентратора модуля, которая является фронтальной поверхностью линзовой панели, возможно применение покрытия, снижающего коэффициент отражения и одновременно обеспечивающего функцию самоочистки от загрязнений в процессе эксплуатации [20]. Что касается стеклянной пластины фотоприемной панели, то здесь обе ее стороны не имеют контакта с окружающей средой, так что возможно применение покрытий с наилучшими антиотражающими свойствами. В табл. 2 приведены значения основных фотоэлектрических параметров тестового концентратора модуля без вторичных линз, в котором имелась возможность варьирования условий прохождения света к СЭ на фотоприемной панели.

Наивысшие значения тока короткого замыкания и КПД наблюдаются при отсутствии стеклянной пластины. При введении пластины без покрытий эти значения уменьшаются примерно на 10% (относительно), что соответствует потерям на отражение от двух поверхностей „стекло–воздух“. При использовании пластины с двухсторонним антиотражающим покрытием [19] потери на отражение уменьшаются в 2 раза. Заметим, что измеренное при этом значение КПД модуля 29.2% получено при использовании в нем СЭ с исходными значениями КПД порядка 36–37%. Применение доступных для практического использования СЭ с эффективностью 42% позволит получить значения КПД модуля рассматриваемой конструкции порядка 34%.

Исследование тепловых свойств солнечных концентраторных модулей

В солнечных концентраторных модулях каскадные СЭ работают при высокой плотности оптической мощности, поэтому проблема отвода остаточного тепла является одной из ключевых при оптимизации их конструкции. Отметим, что при увеличении плотности фототока значения V_{OC} увеличиваются, а отрицательные наклоны их зависимостей от температуры уменьшаются. Это свидетельствует об увеличении КПД и улучшении температурной стабильности фотоэлектрических модулей, работающих при более высоких кратностях концентрирования излучения, если только при этом решены проблемы теплоотвода. Наиболее важными являются данные по температурным коэффициентам основных выходных параметров модулей, таких как ток короткого замыкания, напряжение холостого хода, фактор заполнения вольт-амперной характеристики и КПД [21–23]. Сравнение этих параметров с аналогичными для модулей других типов, в частности, для наиболее распространенных плоских модулей на основе кристаллического кремния, показывает, что для последних падение наиболее чувствительного к нагреву напряжения холостого хода (и соответственно КПД) происходит более чем в 2 раза быстрее, чем для концентраторных модулей на основе СЭ со структурой GaInP/GaInAs/Ge [21]. Тепловые свойства модулей оцениваются по температуре теплоотвода, на котором смонтированы СЭ либо по расчетной температуре перегрева p – n -перехода, определяемой на основании тепловых моделей, либо по распределению температуры вдоль каких-либо частей модуля [21,24].

На практике температурные коэффициенты получают при исследованиях СЭ в импульсном режиме засветки в лабораторных условиях с использованием имитаторов концентрированного солнечного излучения. При достаточном коротком (менее 1 мс) облучении СЭ их нагревом можно пренебречь [12]. Температура теплоотвода варьирует контролируемым образом, и каждый раз перед измерениями достигается тепловой баланс всей системы, т.е. равенство температур во всех ее частях. Поэтому перечисленные выше фотоэлектрические параметры и их коэффициенты напрямую относятся к равновесной температуре p – n -перехода СЭ (или нескольких p – n -переходов в случае каскадных СЭ). Таким образом, использование этих данных для прогнозирования выходных параметров модулей в условиях работы при непрерывной солнечной засветке и подключении к внешней нагрузке требует знания температуры p – n -перехода, установившейся именно в этих условиях. Температура теплоотвода всегда меньше температуры p – n -перехода СЭ из-за возникающих температурных градиентов. Весьма существенным может быть изменение температуры p – n -перехода при изменении режима включения СЭ. В режиме холостого хода вся мощность, подводимая излучением к СЭ, рассеивается теплоотводом, в то время как в режиме подключения на внешнюю электрическую нагрузку значительная часть подводимой мощности (до 40% и более для каскадных СЭ) переносится

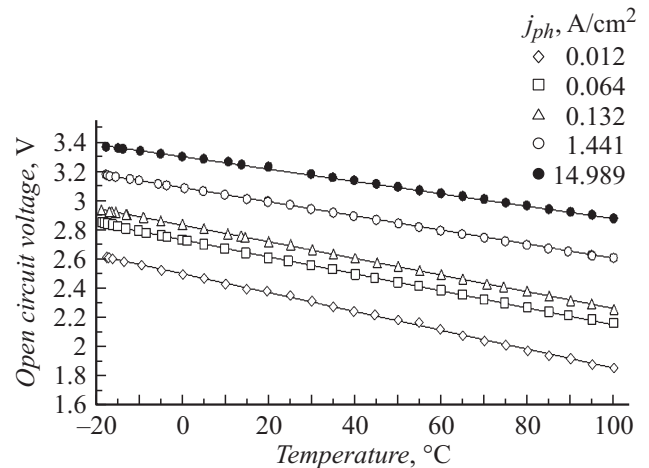


Рис. 6. Зависимости V_{OC} от температуры при различных плотностях фототока j_{ph} для СЭ со структурой GaInP/GaInAs/Ge, используемых в модулях ФТИ [9]. Плотности тока порядка 14 А/см² соответствуют интенсивности облучения порядка 1000 „солнц“.

током в нагрузку (реализуется концепция „электрического охлаждения“ СЭ). На учет эффекта охлаждения обращено внимание в работе [25]. Здесь производилось усреднение мощности, отбираемой в нагрузку при измерениях полной вольт-амперной характеристики СЭ, а затем это значение подставлялось в итерационный процесс определения температуры p – n -перехода в точке максимальной мощности.

Простая методика определения перегрева p – n -переходов в СЭ по отношению к внешней температуре в условиях подключения на электрическую нагрузку предложена в работе [26]. Остановимся кратко на основных положениях этой методики. Это позволит проиллюстрировать особенности тепловых процессов, происходящих в концентраторных модулях, а также оценить перегрев p – n -переходов в СЭ, работающих в модулях ФТИ. В качестве исходных данных необходимо иметь результаты калибровочных измерений температурного коэффициента напряжения холостого хода (V_{OC}) для СЭ при импульсной засветке и плотности фототока, характерной для работы СЭ в модулях при солнечной засветке. Измеренные зависимости V_{OC} от температуры для СЭ со структурой GaInP/GaInAs/Ge, используемых в модулях ФТИ, приведены на рис. 6. Их ход типичен для подобного рода СЭ [21–23] и с хорошей точностью аппроксимируется прямыми линиями во всем интересном для практики диапазоне температур -20 – 100 °С. По их наклону для каждой плотности фототока можно определить температурный коэффициент напряжения холостого хода (a [–mV/°C]). Особенность методики состоит в измерении значения V_{OC} непосредственно после момента быстрого переключения из рабочего режима (т.е. режима с подключением к внешней нагрузке) в режим холостого хода, а также этого же значения после установления теплового равновесия. Используется то

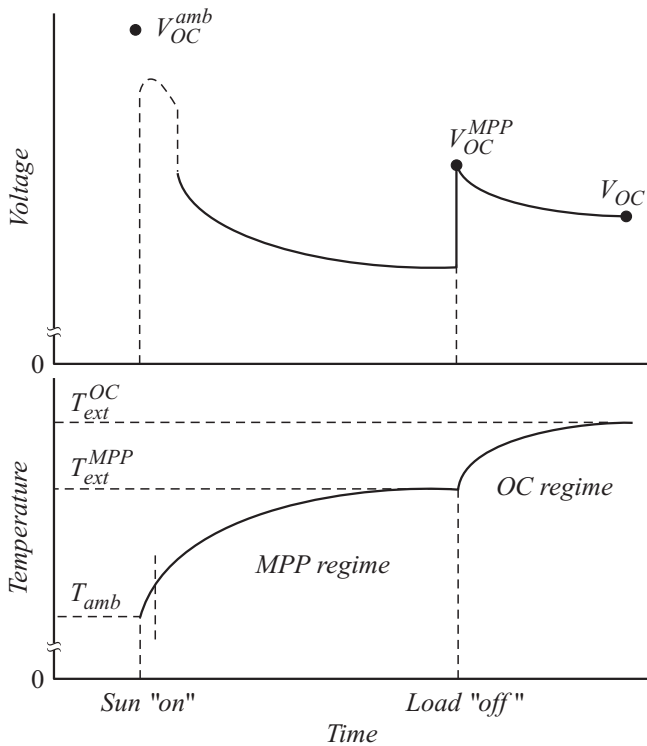


Рис. 7. Временные диаграммы процессов при подготовительных операциях для определения V_{OC}^{amb} .

обстоятельство, что температура чипа СЭ почти не меняется за счет теплоемкости материала в течение первой миллисекунды не только при импульсном облучении, но и при мгновенном отключении внешнего нагрузочного сопротивления. При солнечных измерениях путем варьирования нагрузки находится точка максимальной мощности (MPP) и дается выдержка во времени для установления стационарных условий теплообмена модуля с окружающей средой. После этого производится упомянутое выше измерение V_{OC} в момент после отключения нагрузки (V_{OC}^{MPP}). Очевидно, данные по перегреву СЭ могут быть получены только путем сравнения V_{OC}^{MPP} с тем значением, которое было бы при температуре окружающей среды, т. е. в „холодном“ состоянии модуля (V_{OC}^{amb}). Однако такое сравнение встречает определенные трудности. Дело в том, что в условиях непрерывной солнечной засветки не удастся достаточно быстро открыть для облучения всю апертуру концентраторного модуля метровых размеров, так что температура в различных частях модуля увеличивается неконтролируемо [26].

Проблема решается путем дополнительных измерений температуры какой-либо части модуля вблизи СЭ, например на тыльной поверхности модуля. Для определения V_{OC}^{amb} вначале должны быть проведены действия, проиллюстрированные во времени на рис. 7. Очевидно, в начальный момент времени температура модуля равна температуре окружающего воздуха T_{amb} . Тестируемый модуль монтируется на устройстве слежения за солнцем (это момент „включения“ солнечного освещения Sun „on“). Далее модуль подключается к

внешней нагрузке для установления режима отбора максимальной мощности. Установление теплового баланса контролируется по замедлению нагрева какой-либо из теплоотводящих частей конструкции модуля, внешней по отношению к месту расположения $p-n$ -переходов в кристалле СЭ. Максимальная температура фиксируется как T_{ext}^{MPP} . Далее модуль отключается от внешней нагрузки на холостой ход (это момент Load „off“ на диаграмме рис. 7) и при этой температуре производится измерение напряжения холостого хода V_{OC}^{MPP} . Поскольку в новом режиме энергия перестает отбираться от СЭ, область кристалла с $p-n$ -переходами становится более горячей, что приводит к понижению напряжения до „нормального“ значения V_{OC} при тепловом равновесии. При этом фиксируется и соответствующая температура выбранной ранее части конструкции модуля T_{ext}^{OC} .

Имея измеренные значения трех температур и двух напряжений холостого хода, можно теперь определить значение V_{OC}^{amb} , а затем и искомую величину перегрева $p-n$ -переходов в точке максимальной мощности ΔT_{p-n}^{MPP} . Благодаря линейной зависимости напряжения холостого хода от температуры и пропорциональной зависимости температуры перегрева любых частей модуля от поглощенной мощности (при не слишком высоких температурах и в условиях теплового баланса) V_{OC}^{amb} в координатах „температура–напряжение“ лежит на продолжении прямой, соединяющей значения V_{OC} и V_{OC}^{MPP} при $T = T_{amb}$. Соответствующее графическое построение приведено на рис. 8. Здесь же приведена формула для перевода разности указанных напряжений холостого хода в температуру перегрева $p-n$ -переходов каскадного СЭ в режиме отбора максимальной электрической мощности.

В работе [26] указанная методика была применена в модифицированном виде для оценки перегрева $p-n$ -переходов СЭ в концентраторных модулях конструкции ФТИ и выявления эффекта „электрического охлаждения“ СЭ за счет частичной перекачки мощности во

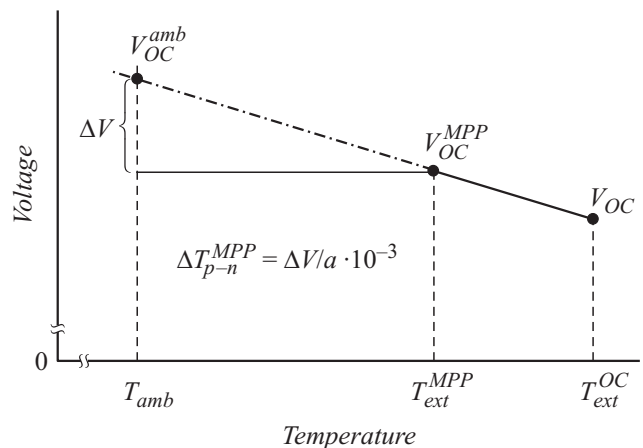


Рис. 8. Графическое построение для нахождения V_{OC}^{amb} в координатах „температура–напряжение“. В формуле для ΔT_{p-n}^{MPP} параметр a — температурный коэффициент V_{OC} для рабочей плотности фототока СЭ в модуле ($-mV/^{\circ}C$).

внешнюю нагрузку. При интенсивности солнечной заливки, равной 850 W/m^2 , и скорости ветра порядка 1 m/s перегрев кристаллов СЭ, напаянных на теплоотводы из стали толщиной 1 mm , составлял $50\text{--}52^\circ\text{C}$ в режиме холостого хода и $33\text{--}35^\circ\text{C}$ в режиме включения на оптимальную нагрузку. Таким образом, эффект „электрического охлаждения“ оказывается весьма существенным. При исследовании тепловых свойств концентраторных модулей в натуральных условиях при солнечном облучении требуется по возможности обеспечение условий постоянства интенсивности падающего излучения и постоянства ветрового обдува. Как правило, для достижения теплового баланса при изменении величины поглощенной в модуле мощности требуется около получаса, а для эксперимента в соответствии с рис. 7 требуется достижение баланса не менее чем в двух точках. Результаты исследований, касающиеся рассмотренной выше температуры перегрева $p\text{--}n$ -перехода, будут справедливы для существующих в данный период времени условий облучения и обдува.

Заключение

Солнечные энергоустановки с концентраторными модулями являются более сложными устройствами по сравнению с теми, где массивы обычных плоских модулей на основе кремниевых или тонкопленочных фотопреобразователей размещаются на свободных территориях или крышах зданий. Однако именно благодаря такой „сложности“ возникает возможность широкого применения в энергоустановках наногетероструктурных каскадных СЭ нового поколения на основе материалов A^3B^5 . Разработанная в ФТИ конструкция концентраторных модулей характеризуется высоким КПД, достаточно простой структурой, использованием устойчивых к воздействию внешней среды материалов и применением технологических процессов, положительно зарекомендовавших себя при производстве плоских модулей. При больших кратностях концентрирования излучения обеспечивается приемлемый температурный режим работы, причем перегрев $p\text{--}n$ -переходов снижается за счет интенсивной перекачки мощности во внешнюю нагрузку. Ожидаемое значение КПД таких модулей может достигать 34% при температурах перегрева $p\text{--}n$ -переходов $33\text{--}35^\circ\text{C}$ в режиме оптимальной нагрузки.

Работа выполнена при поддержке Правительства РФ, грант № 14.В25.31.0020 (получен в рамках постановления правительства РФ № 220).

Список литературы

- [1] Андреев В.М., Грилихес В.А., Румянцев В.Д. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения (монография). Л.: Наука, 1989. 310 с.
- [2] Luque A., Araújo G.L. Solar cells and optics for photovoltaic concentration. Bristol, England; Philadelphia: A. Hilger, 1989. 531 p.
- [3] Алферов Ж.И., Андреев В.М., Румянцев В.Д. // ЖТФ. 2004. Т. 38. Вып. 8. С. 937–948.
- [4] Guter W., Schöne J., Philipps S.P., Steiner M., Siefer G., Wekkeli A., Welser E., Oliva E., Bett A.W., Dimroth F. // Appl. Phys. Lett. 2009. Vol. 94. P. 223–504.
- [5] <http://www.greentechmedia.com/articles/read/Sharp-Hits-Record-44.4-Efficiency-For-Triple-Junction-Solar-Cell>.
- [6] Luque A. // J. Appl. Phys. 2011. Vol. 110. N 3. P. 1–19.
- [7] Rumyantsev V.D. // Opt. Express. 2010. Vol. 18. N S1. P. A17–A24.
- [8] Sala G., Lorenzo E. Proc. of the 2nd E.C. Photovoltaic Solar Energy Conference. Berlin, Germany, 1979. P. 1004–1010.
- [9] Rumyantsev V.D. // Springer Series Opt. 2007. Vol. 130. P. 151–174.
- [10] García A.J., Antonio J. Órpez, Cruz-Peragón F. // AIP Conf. Proc. 2013. Vol. 1556. P. 274.
- [11] Rumyantsev V.D., Andreev V.M., Chekalin A.V., Davidyuk N.Yu., Im O.A., Khazova E.V., Sadchikov N.A. // AIP Conf. Proc. 2013. Vol. 1556. P. 185.
- [12] Rumyantsev V.D., Larionov V.R., Malevskiy D.A., Pokrovskiy P.V., Chekalin A.V., Shvarts M.Z. // AIP Conf. Proc. 2012. Vol. 1477. P. 152–156.
- [13] Victoria M., Dominguez C., Antón I., Sala G. // Opt. Express. 2009. Vol. 17. N 8. P. 6487–6492.
- [14] Rumyantsev V.D., Davidyuk N.Yu., Ionova E.A., Malevskiy D.A., Pokrovskiy P.V., Sadchikov N.A., Sturm M. // AIP Conf. Proc. 2010. Vol. 1277. N 1. P. 97.
- [15] Андреев В.М., Давидюк Н.Ю., Ионова Е.А., Покровский П.В., Румянцев В.Д., Садчиков Н.А. // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 2. С. 118–125.
- [16] Rumyantsev V.D., Davidyuk N.Yu., Ionova E.A., Pokrovskiy P.V., Sadchikov N.A., Andreev V.M. // Proc. of the 6th Int. Conf. on Concentrating Photovoltaic Systems. 2010. P. 89–92.
- [17] Давидюк Н.Ю., Ионова Е.А., Малевский Д.А., Румянцев В.Д., Садчиков Н.А. // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 7. С. 90.
- [18] van Wezep D.A., van der Velden M.H.L., Borsa D.M., Bosch R.C.M. // Proc. of the 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. Frankfurt, Germany, 2012.
- [19] http://www.dsm.com/content/corporate/cworld/en_US/markets-products/markets/energy/khepricoat.html#
- [20] <http://www.nanopowerselfcleaning.com>
- [21] Baginski W., Kinsey G.S., Liu M., Nayak A., Garboushian V. // AIP Conf. Proc. 2012. Vol. 1477. P. 148.
- [22] Kinsey G.S., Hebert P., Barbour K.E., Krut D.D., Cotal H.L., Sherif R.A. // Prog. Photovoltaics. 2008. Vol. 16. P. 503–508.
- [23] Fernández E.F., Siefer G., Schachtner M., García Loureiro A.J., Pérez-Higueras P. // AIP Conf. Proc. 2012. Vol. 1477. P. 189.
- [24] Ota Y., Nagai H., Araki K., Nishioka K. // AIP Conf. Proc. 2012. Vol. 1477. P. 364–367.
- [25] Yandt M.D., Wheeldon J.F., Cook J., Beal R., Walker A.W. et al. // AIP Conf. Proc. 2012. Vol. 1477. P. 172.
- [26] Rumyantsev V.D., Chekalin A.V., Davidyuk N.Yu., Malevskiy D.A., Pokrovskiy P.V., Sadchikov N.A., Pan'chak A.N. // AIP Conf. Proc. 2013. Vol. 1556. P. 138.