

07

Измерительные комплексы для исследований солнечных фотоэлектрических преобразователей каскадного типа и концентраторных модулей на их основе

© В.Р. Ларионов, Д.А. Малевский, П.В. Покровский, В.Д. Румянцев

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

(Поступило в Редакцию 12 ноября 2014 г.)

Рассмотрены принципы построения и результаты реализации ряда модификаций измерительных комплексов для исследований солнечных фотоэлектрических преобразователей каскадного типа. Комплексы состоят из имитатора солнечного излучения и электронного блока активной нагрузки. Излучатель комплекса с большой апертурой воспроизводит интенсивность в широком спектральном интервале ($\lambda \sim 350 \div 1700$ nm) и угол расхождения лучей ($\pm 0.26^\circ$), характерные для солнечного излучения. Активная нагрузка позволяет измерять темновые и нагрузочные вольт-амперные характеристики тестируемых объектов за время порядка 1 ms в течение квазистационарной части импульса излучения. Компактность и малое энергопотребление описываемых измерительных комплексов позволяют надеяться на их широкое применение при разработке, совершенствовании и тестировании как высокоэффективных фотоэлектрических преобразователей каскадного типа на основе материалов A^3B^5 , так и солнечных модулей, где они применяются с концентраторами излучения.

Введение

Сегодня статус солнечной электроэнергетики из разряда многообещающей долгосрочной перспективы переходит в разряд широкой практической реализации. Это подтверждается масштабными мероприятиями, предпринимаемыми целым рядом государств и транснациональных корпораций, по организации производства и созданию систем солнечного электроснабжения в разных регионах Земного шара. В 2013 г. в мире было установлено фотоэнергосистем на суммарную мощность более 37 GW. При этом общая мощность установленных к 2014 г. солнечных батарей достигла 140 GW, что сопоставимо с суммарной установленной мощностью всех электростанций России. Основную долю оборудования составляют кремниевые солнечные батареи.

Главным барьером для увеличения темпов развития фотоэнергетики является относительно высокая стоимость „солнечной“ электроэнергии. Снижение стоимости может быть достигнуто при повышении КПД фотоэнергосистем и при радикальном уменьшении расхода полупроводниковых материалов. Перспективные солнечные энергосистемы нового поколения строятся на основе высокоэффективных наногетероструктурных фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) каскадного типа (в частности, трехкаскадных InGaP/InGaAs/Ge преобразователей с КПД порядка 40%), работающих с концентраторами солнечного излучения (линзами Френеля, обеспечивающими кратности концентрирования солнечного излучения в 500–1000 раз) [1–2]. Разработка таких систем требует решения многообразных теоретических, технологических, материаловедческих и инже-

нерных проблем, а также создания специализированного метрологического оборудования.

В Лаборатории фотоэлектрических преобразователей ФТИ накоплен богатый опыт по реализации всей цепочки технологических процессов, задействованных при изготовлении солнечных концентраторных фотоэлектрических установок. Составными частями этой цепочки являются: эпитаксиальное выращивание многослойных наногетероструктур ФЭП и их постростовая обработка [3], изготовление панелей концентраторных линз Френеля и формирование модулей [4], конструирование автоматизированных устройств слежения за солнцем [5]. В ряду задач, решаемых при разработке этой технологической цепочки, стояла и задача создания специализированных измерительных комплексов — имитаторов солнечного излучения и измерительных электронных блоков, которые можно было бы использовать как в лабораторных, так и в производственных условиях. В настоящей работе приводится описание основных особенностей построения таких комплексов, предназначенных для исследований каскадных ФЭП и солнечных концентраторных модулей на их основе.

1. Требования к имитаторам солнечного излучения

Как уже отмечалось, в настоящее время основу солнечной энергетики составляют кремниевые солнечные батареи без концентрирования излучения (так называемые плоские модули). Для характеристики таких модулей международным сообществом разработан стандарт IEC 60904-9 [6], в котором даются определения

параметрам модулей и средствам для их измерения, а также изложены требования к имитаторам излучения относительно спектрального распределения, допустимой пространственной неоднородности и временной стабильности интенсивности. При разработке концентраторных ФЭП и модулей на их основе возникают дополнительные требования, формулирование которых пока находится в стадии обсуждения для подготовки специализированного стандарта IEC 62670-3 [7]. „Отставание“ нормативной базы концентраторной фотовольтаики связано с рядом причин. Среди них существенно расширенная область спектральной чувствительности каскадных ФЭП на основе соединений A^3B^5 ($\lambda \sim 350 \div 1700 \text{ nm}$) по сравнению с ФЭП на основе других материалов (как правило, это диапазон $\lambda \sim 400 \div 1100 \text{ nm}$). Соответствие солнечному излучению здесь должно быть более точным при раскладе по определенным спектральным интервалам, поскольку недостаток фотонов при генерации фототока в одном из каскадов ограничивает ток во всех остальных каскадах ФЭП. Важнейший параметр, определяющий работу концентраторного модуля, это степень коллимированности падающего на концентратор излучения, что предопределяет возможность его фокусировки на сравнительно маленький по размерам ФЭП. Для правильного измерения выходных характеристик модуля расходимость преобразуемого излучения должна соответствовать расходимости лучей от солнечного диска ($\pm 0,26^\circ$). При линейных размерах модуля порядка 1 м на соответствующей площади должна обеспечиваться равномерность коллимированного излучения на уровне не хуже нескольких процентов при интегральной по спектру интенсивности в одну солнечную постоянную (для „космического“ спектра это $E = 1367 \text{ W/m}^2$), а для „наземного“ спектра, как правило, используется значение $E = 1000 \text{ W/m}^2$. Стандартным требованием при измерениях является условие поддержания температуры ФЭП на уровне 25°C .

Следует отметить, что для исследований и контроля параметров чипов концентраторных ФЭП на технологических стадиях до их монтирования в модули возможно применение солнечных имитаторов с неколлимированным световым потоком. Условия высокой кратности концентрирования в этом случае могут быть выполнены при варьировании расстояния между ФЭП и высокоинтенсивным источником света. Как правило, в качестве последнего в солнечных имитаторах используются ксеноновые лампы непрерывного или импульсного режима горения. Выбор такого источника определяется близостью к спектру солнца спектра излучения ксенона при электрическом разряде в условиях высокого давления. Для ламп определенного типа, работающих в определенных условиях газового разряда, разрабатываются интерференционные фильтры, корректирующие спектр и приводящие его в соответствие с определенным классом имитаторов по степени соответствия солнечному спектру. Применение импульсных ксеноновых ламп в солнечных имитаторах позволяет обеспечить высокие

интенсивности облучения образцов ФЭП и концентраторных модулей и избежать тепловых эффектов. Данный подход используется в солнечных имитаторах, описываемых в настоящей публикации. Возникающие при этом проблемы связаны с выбором длительности импульса освещения и формированием квазистационарной (плоской) части этого импульса во времени при измерении нагрузочной вольт-амперной характеристики (ВАХ) ФЭП или модуля.

Для наногетероструктурных ФЭП каскадного типа на основе материалов A^3B^5 характерные времена собирания $p-n$ -переходом фотогенерированных носителей обычно не превышают 100 ns. Постоянная времени цепей измерения ВАХ также небольшая в связи с малыми площадями чипов концентраторных ФЭП и большими плотностями фототока, при которых сопротивление внешней цепи оказывается низким. В разработанных в ФТИ импульсных имитаторах солнечного излучения принято значение длительности плоской части светового импульса порядка 1 ms. За это время может быть измерена вся нагрузочная ВАХ, включая ее небольшие отрезки при обратном смещении и при напряжении больше напряжения холостого хода. Для солнечных модулей на основе материалов с более длительными временами возможно использование режима измерения ВАХ по точкам, когда пара значений „ток-напряжение“ измеряется к концу каждого светового импульса, а перед следующим импульсом напряжение смещения $p-n$ -перехода автоматически меняется.

2. Формирование импульса света

В осветительной части имитатора могут использоваться несколько импульсных ламп, которые при одновременном поджиге формируют импульс света, достаточный по интенсивности для тестирования концентраторных ФЭП или модулей. Энергия светового импульса распределяется по нескольким лампам, так что мощность каждой лампы оказывается сравнительно небольшой. Для питания ламп может использоваться напряжение менее 1 kV кВ, отвечающее критериям низковольтного оборудования. При напряжении менее 1 kV используются электролитические емкостные накопители, что позволяет снизить вес и габариты блока питания осветителя. Сам блок питания состоит из независимых сегментов, в которых управление зарядом емкостных накопителей и поджигом ламп осуществляется по соответствующему количеству каналов от компьютера. Цепи разряда каждого емкостного накопителя содержат индуктивные и резистивные элементы, которые формируют импульс тока с плоской вершиной.

В разработанных солнечных имитаторах импульс света с плоской вершиной в каждой лампе получается при взаимодействии токов от двух разрядных ветвей, образованных при последовательном соединении индуктивных, емкостных и резистивных элементов (LCR).

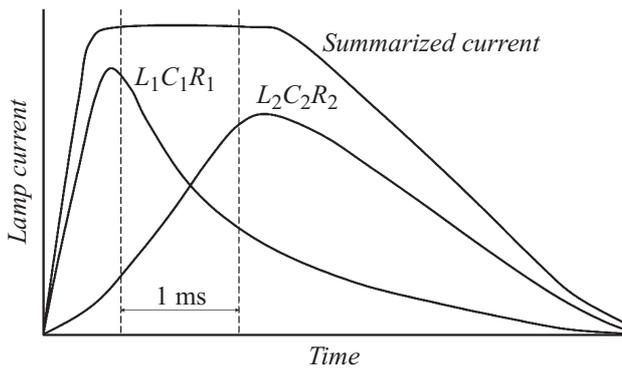


Рис. 1. Схематическая временная диаграмма составляющих токов и суммарного тока через импульсную лампу, показывающая принцип формирования импульса тока (и соответственно света) с плоской вершиной при взаимодействии токов от двух ветвей разрядной цепи.

На рис. 1 показана временная диаграмма составляющих токов и суммарного тока через импульсную лампу. При реальном разряде имеет место частичное перетекание токов из одной ветви в другую, однако подбор параметров индуктивных и резистивных элементов позволяет получить квазистационарный режим горения лампы на уровне не хуже $\pm 2\%$ в течение 1 ms. По данному показателю достигается соответствие классу „А“ имитаторов по международной классификации [6,7].

На рис. 2 показана упрощенная электрическая схема силовой части одного из сегментов электрического блока питания, предназначенного для обеспечения независимой работы одной импульсной лампы. Здесь LCR-элементы двух параллельно соединенных с импульсной лампой ветвей обеспечивают при разряде протекание токов, показанных на рис. 1. Что касается заряда емкостных накопителей, то он производится по схеме удвоения напряжения. Экономичность зарядной цепи обеспечивается благодаря введению управляемых коммутаторов, подсоединенных к выводам вторичной обмотки силового трансформатора. На начальном этапе заряда конденсаторов

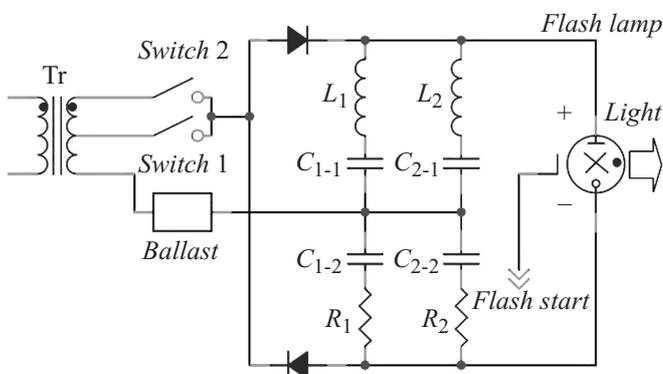


Рис. 2. Упрощенная электрическая схема зарядных и разрядных цепей одного из сегментов блока питания, предназначенного для обеспечения независимой работы одной импульсной лампы.

напряжение на них низкое, так что заряд производится только от половины обмотки. По мере контролируемого компьютером повышения напряжения на конденсаторах зарядная цепь подключается к выводу трансформатора с максимальным выходным напряжением. Благодаря такой организации заряда уменьшаются потери мощности в балластном резисторе, ограничивающем ток в цепи.

Для ускорения процесса заряда балластный резистор подобран с нелинейной зависимостью сопротивления от протекающего тока — чем меньше ток, тем меньше сопротивление. Благодаря такой характеристике заключительный этап заряда до требуемого напряжения на конденсаторах реализуется за сравнительно короткое время, так как балластный резистор при этом почти десятикратно теряет свое сопротивление. Указанным свойством обладают обычные лампы накаливания с вольфрамовой нитью. В схеме рис. 2 с вольфрамовой лампой в качестве балластного резистора полный заряд накопительных емкостей обеспечивается примерно за $10 \div 12$ s. Это время определяет возможную „производительность“ солнечного имитатора при его использовании для тестирования концентраторных модулей в производственных условиях на выходе сборочной линии.

3. Измерение ВАХ тестируемого фотопреобразователя

В разработанных измерительных комплексах при процедуре измерения нагрузочных ВАХ тестируемых объектов используется активная электронная нагрузка. Активная нагрузка — это источник двуполярного варьируемого напряжения с очень малым внутренним сопротивлением. За время плоской части импульса излучения на клеммах ФЭП или модуля формируется импульс плавно меняющегося напряжения, задающего состояние ФЭП от обратно-смещенного до прямо-смещенного. Благодаря обратному смещению компенсируется падение напряжения на подводящих проводах и схеме измерения, так что обеспечивается измерение ВАХ, включая точку тока короткого замыкания. Кроме того, появляется возможность проверки состояния байпасных диодов, если они присутствуют в солнечном модуле. При прямом смещении имеется возможность измерения темновой ВАХ, если не поступает сигнал на поджиг импульсной лампы. Активная нагрузка выполняется с использованием батарей электролитических конденсаторов и электронного коммутатора. Упрощенная электрическая схема активной электронной нагрузки для измерения ВАХ тестируемых фотопреобразователей приведена на рис. 3.

Текущие значения токов и напряжений измеряются с помощью аналого-цифровой схемы, управляемой компьютером. Одновременно записывается осциллограмма светового импульса при измерении фототока контрольного ФЭП. Последнее необходимо для программной корректировки погрешностей измерений, возникающих

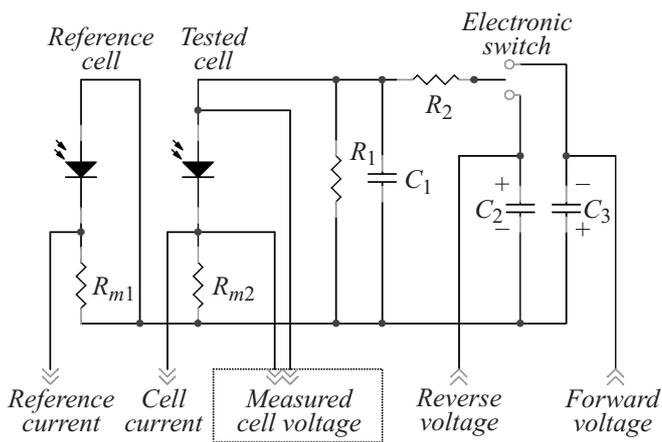


Рис. 3. Упрощенная электрическая схема активной электронной нагрузки для измерения ВАХ тестируемых фотопреобразователей. Значения токов измеряются по падению напряжения на измерительных резисторах. Форма временной зависимости прикладываемого к ФЭП напряжения регулируется при подборе номиналов компонентов $R1 \div R2$ и $C1 \div C3$, причем $C1 \ll C2$ и $C3$.

из-за вариаций интенсивности освещенности на плоской части импульса. Если контрольный ФЭП должным образом откалиброван и расположен в непосредственной близости от тестируемого, то может быть измерена плотность мощности падающего излучения и рассчитан КПД фотоэлектрического преобразования. Пример осциллограмм света, тока и напряжения для одного из тестируемых концентраторных модулей приведен на рис. 4. Нагрузочная ВАХ строится путем выборки пар значений „ток-напряжение“ в каждый данный момент плоской части импульса света. Факт замедления роста приложенного напряжения к концу измерений благо-

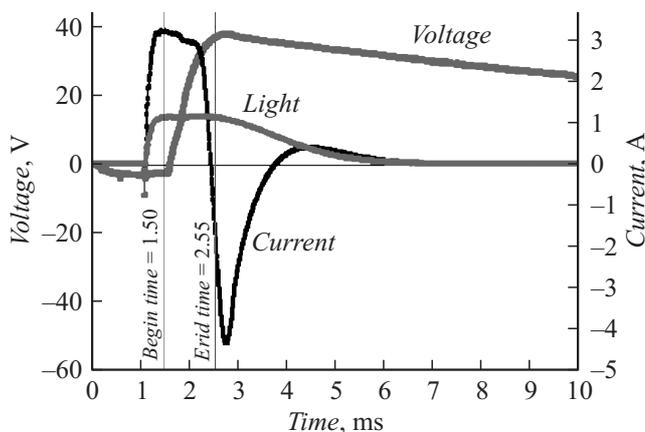


Рис. 4. Осциллограмма импульса света, а также импульсов напряжения и тока для концентраторного солнечного модуля, состоящего из 288 пар „линза Френеля — трехкаскадный ФЭП“. Нагрузочная ВАХ строится путем выборки пар значений „ток-напряжение“ в каждый данный момент плоской части импульса света.

приятен в связи с необходимостью более равномерного распределения токовых точек на спадающей ветви ВАХ.

4. Оптическая схема солнечного имитатора для концентраторных модулей

Следует учитывать специфические черты отдельных оптических элементов, которые должны быть учтены при составлении схемы солнечного имитатора. Соотношение поперечного размера импульсной лампы и фокусного расстояния коллимирующего элемента должно обеспечивать остаточную расходимость лучей $\pm 0.26^\circ$ для имитации расходимости лучей от солнечного диска. Это соотношение можно с достаточной точностью принять как 1:100. В то же время плотность мощности излучения, падающего на поверхность коллиматора, должна соответствовать одной солнечной постоянной с учетом потерь на спектральную коррекцию, пространственную фильтрацию и отражение. Излучатель увеличенных размеров потребует применения более длиннофокусного коллиматора. Поперечные размеры коллиматора должны превышать размеры светоприемной поверхности тестируемого модуля. Современные импульсные лампы по своей излучательной способности как раз соответствуют этим противоречивым требованиям, оставаясь в режиме допустимых параметров разряда.

В литературе имеются публикации результатов деятельности только двух групп (не считая группы ФТИ) разработчиков солнечных имитаторов для тестирования полноразмерных концентраторных модулей [8,9]. В соответствующих разработках в качестве коллимирующего оптического элемента используется параболическое зеркало диаметром 2 m при фокусном расстоянии 6 m. Оптическая схема такого типа имитатора приведена на рис. 5, a.

В описываемой в настоящей работе разработке ФТИ в качестве коллимирующего оптического элемента используются крупногабаритные линзы Френеля. Оптическая схема солнечного имитатора для тестирования концентраторных модулей размерами $(0.5 \times 1) \text{ m}^2$ приведена на рис. 5, b. Коллимированный световой поток с необходимой апертурой формируется с помощью двух линз размерами $(0.5 \times 0.5) \text{ m}^2$ при фокусном расстоянии 2 m. Источником излучения для каждой линзы служат две импульсные лампы с колбами трубчатой формы, смонтированные в одном корпусе и расположенные вплотную друг к другу. Ограничение излучающей поверхности ламп обеспечивается с помощью диафрагмы на нижней плоскости корпуса. Линейные размеры диафрагмы составляют 1/100 от фокусного расстояния линзы. Хроматические aberrации в линзах сведены к минимуму благодаря их малой светосиле: линейные размеры линз составляют лишь одну четверть от фокусного расстояния. Поглощение в линзах пренебрежимо мало

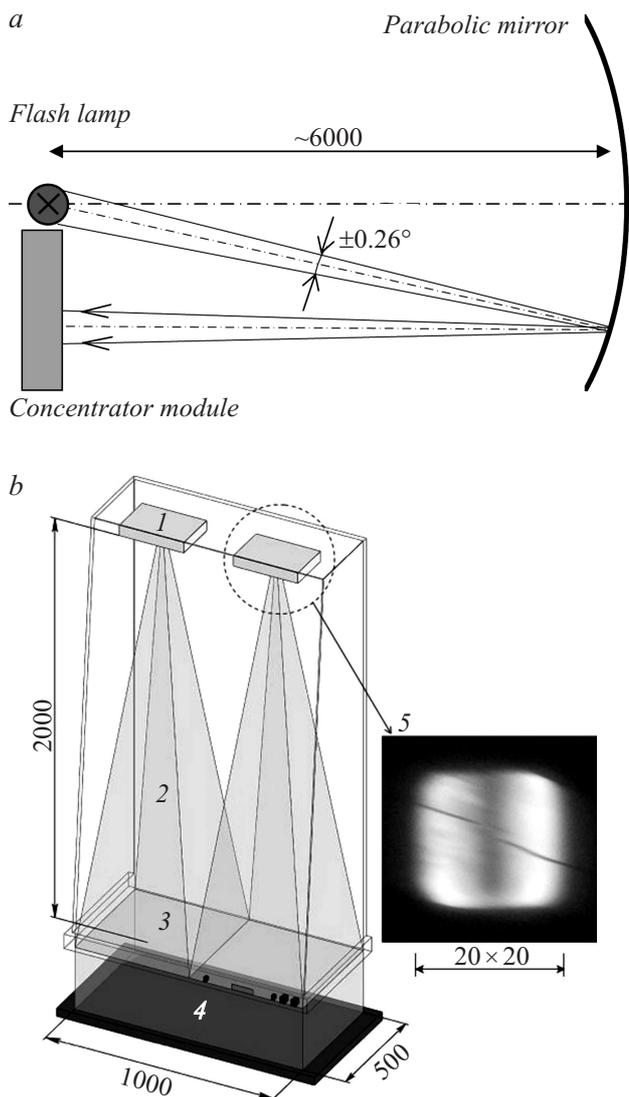


Рис. 5. Оптические схемы солнечных имитаторов для тестирования концентраторных модулей: *a* — схема с параболическим зеркалом в качестве коллимирующего оптического элемента [8,9], *b* — схема с коллимирующими линзами Френеля (настоящая работа), где 1 — излучатель с двумя лампами, 2 — световые лучи, 3 — одна из линз Френеля, 4 — плоскость расположения концентраторного модуля, 5 — фотография импульсных трубчатых ламп, расположенных за диафрагмой одного из корпусов излучателя. Обозначенные размеры указаны в миллиметрах.

за счет их изготовления по технологии „силикон-на-стекле“ [4], когда основа линзы представляет собой лист высокопрозрачного силикатного стекла, а преломляющие свет силиконовые микропризмы имеют в среднем высоту $0.2 \div 0.3$ мм. Блок питания такого солнечного имитатора обеспечивает одновременное функционирование четырех импульсных ламп. Возможно изготовление подобного типа имитаторов для тестирования солнечных модулей увеличенных размеров, для чего следует просто

увеличить количество излучателей и коллимирующих линз.

5. Сравнение результатов измерений ВАХ при солнечном освещении и освещении под солнечным имитатором разработанного измерительного комплекса

Проверка достоверности результатов измерения нагрузочных ВАХ с помощью разработанного солнечного имитатора проводилась с использованием одного из изготовленных в ФТИ концентраторных модулей в качестве объекта. Модуль состоял из панели малоразмерных (40×40) мм линз Френеля и панели трехкаскадных ФЭП со структурой InGaP/InGaAs/Ge. Обе панели, содержащие по 288 компонентов, представляли собой интегральные конструктивные единицы на плоских стеклянных основаниях. В модуле стеклянные основания расположены параллельно друг другу на расстоянии, равном фокусному расстоянию концентраторных линз Френеля, и скреплены боковыми стенками. Подробнее принципы конструирования подобного типа модулей и их параметры описаны в [10].

На фотографии, приведенной на рис. 6, показано расположение исследуемого концентраторного модуля в рабочей плоскости разработанного линзового имитатора солнечного излучения (см. также рис. 5, *b*). Перед описываемым лабораторным экспериментом нагрузочная ВАХ модуля была измерена в натуральных условиях при солнечном освещении. Выбирались условия, при которых в полуденное время интенсивность прямой солнечной радиации была максимальной для данного сезона ($E = 835 \text{ W/m}^2$). Сравнительно низкое значение температуры наружного воздуха позволило избежать процедуры приведения температуры ФЭП к стандартным усло-

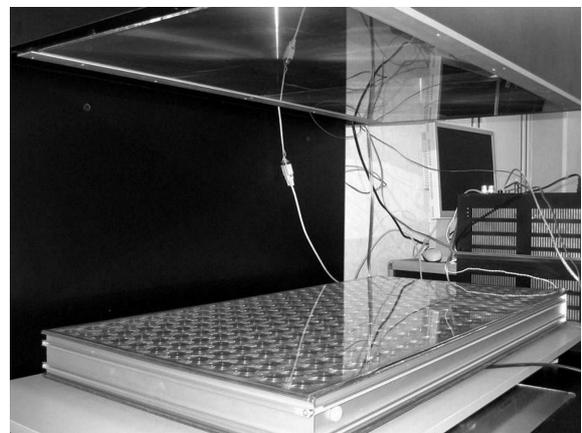


Рис. 6. Расположение исследуемого концентраторного модуля в рабочей плоскости разработанного линзового имитатора солнечного излучения (см. также рис. 5, *b*).

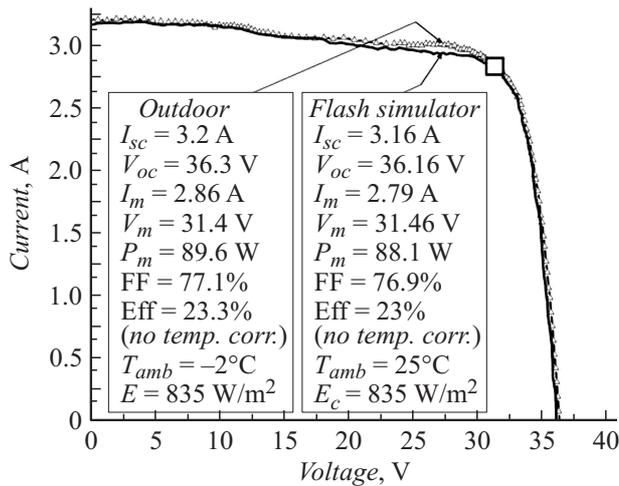


Рис. 7. Сравнение нагрузочных ВАХ концентраторного модуля, измеренных в натуральных (Outdoor) и лабораторных (Flash simulator) условиях. Наблюдается хорошее соответствие кривых, включая точку оптимальной нагрузки ВАХ (отмечена квадратом).

виям при 25°C , поскольку напряжение холостого хода модуля при непрерывной солнечной засветке совпадало с соответствующим значением при импульсной засветке в лабораторных условиях (при комнатной температуре). Осциллограммы импульсов света, напряжения и тока в лабораторном эксперименте были аналогичны приведенным на рис. 4.

На рис. 7 проведено сравнение нагрузочных ВАХ модуля, измеренных в натуральных (Outdoor) и лабораторных (Flash simulator) условиях. Наблюдается хорошее соответствие кривых, включая точку оптимальной нагрузки ВАХ. Компактность солнечного имитатора с линзовыми коллимирующими элементами, а также малое энергопотребление позволяют надеяться на применение подобных устройств как для исследований и совершенствования модулей в лабораторных условиях, так и для тестирования готовой продукции на линиях сборки модулей в условиях производства.

6. Солнечные имитаторы без коллимирования светового потока

Как уже отмечалось в разд. 1, для исследований концентраторных ФЭП в лабораторных условиях, а также разбраковки чипов ФЭП на производстве могут использоваться измерительные комплексы, в которых импульсные солнечные имитаторы не включают в себя каких-либо оптических элементов, за исключением корректирующих спектр фильтров. Эквивалентные кратности концентрирования солнечного излучения при этом могут составлять до $3000\times$ при использовании одной лампы [11] и достигать $10000\times$ при использо-

вании четырех ламп [12]. В модификации имитатора с четырьмя лампами реализована возможность радикального варьирования суммарного спектра излучения, попадающего на ФЭП, за счет помещения определенных цветных фильтров перед каждой из ламп. Что касается вариантов использования активной электронной нагрузки, то при определенных режимах включения по результатам измерений может быть построена не только ВАХ, но и оценены значения компонентов внутреннего сопротивления исследуемого ФЭП [11].

В заключение затронем проблему тестирования плоских солнечных батарей большой площади, используемых для электропитания космических аппаратов. Как и концентраторные модули наземного применения, эти батареи строятся на основе высокоэффективных наногетероструктурных ФЭП каскадного типа. Отличие в требованиях к солнечному имитатору в комплексе для тестирования таких батарей состоит в модификации спектра излучения импульсной лампы применительно к условиям космического солнечного спектра. Хотя коллимирования излучения при этом не требуется, однако требуется обеспечение большой абсолютной мощности излучения при высокой равномерности распределения по большой площади тестируемого объекта. Поэтому опыт создания солнечных имитаторов для концентраторных модулей оказался востребованным и при решении проблемы тестирования космических солнечных батарей.

На рис. 8 показана фотография излучателя и блока питания солнечного имитатора, предназначенного для тестирования солнечных батарей размерами до $2 \times 2.5 \text{ m}$. Для обеспечения равномерности освещения

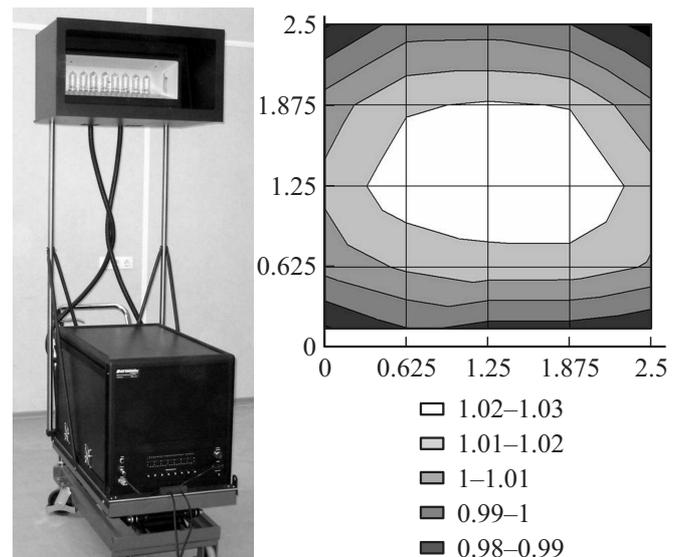


Рис. 8. Слева — фотография излучателя и блока питания солнечного имитатора, предназначенного для тестирования космических солнечных батарей размерами до $(2 \times 2.5) \text{ m}^2$ (фильтры, корректирующие спектр, не показаны); справа — диаграмма распределения интенсивности излучения в плоскости тестируемого объекта.

большой площади излучатель должен располагаться на значительном удалении от объекта исследований и, следовательно, иметь большую выходную мощность. Проблема решается при использовании в излучателе восьми импульсных ламп, поджигаемых одновременно. Интенсивность излучения в одну „космическую“ солнечную постоянную реализуется при расстоянии порядка 10 м между излучателем и солнечной батареей (это расстояние подбирается при настройке измерений). Из приведенной на рис. 8 диаграммы распределения интенсивности излучения можно заключить, что в данной модификации солнечного имитатора также достигается высокая равномерность облучения объекта на уровне не хуже $\pm 2\%$.

Заключение

Солнечные концентраторные модули на основе высокоэффективных каскадных ФЭП рассматриваются как перспективная элементная база для развития наземной электроэнергетики. Каскадные ФЭП уже практически вытеснили ФЭП на основе кремния при создании солнечных батарей космического назначения. Особенности работы этих устройств диктуют новые более жесткие требования к специализированному лабораторному и производственному метрологическому оборудованию. Центральное место здесь занимают измерительные комплексы с имитаторами солнечного излучения в различных модификациях, принципы построения и параметры которых рассмотрены в настоящей работе. Универсальный подход к конструированию импульсных источников света, источников питания и блоков измерения ВАХ позволил создать образцы оборудования, успешно применяемого как в научных исследованиях, так и для контроля фотоэлектрической продукции в производственных условиях.

Настоящая работа, выполненная в ФТИ им. А.Ф. Иоффе, поддержана Министерством образования и науки России, соглашение о предоставлении субсидии от 27.06.2014 г. № 14.604.21.0088, уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI60414X0088.

Список литературы

- [1] *Alferov Zh.I., Andreev V.M., Rumyantsev V.D.* „III–V solar cells and concentrator arrays“ in the book „High-Efficient Low-Cost Photovoltaics“ / Eds V. Petrova-Koch, R. Hezel, A. Goetzberger, Springer Series in Optical Sciences, 2008. Vol. 140. P. 101–141.
- [2] *Андреев В.М., Давидюк Н.Ю., Малевский Д.А., Паньчак А.Н., Румянцев В.Д., Садчиков Н.А., А.В.Чекалин А.В., Луке А.* // ЖТФ. 2014. Т. 84. Вып. 11. С. 72–79.
- [3] *Shvarts M.Z., Gudovskikh A.S., Kalyuzhnyy N.A., Mintairov S.A., Soluyanov A.A., Timoshina N.Kh., Luque A.* // AIP Conference Proceedings. 2014. Vol. 1616. P. 29.
- [4] *Rumyantsev V.D.* // Optics Express. 2010. Vol. 18. N S1. P. A17–A24. ISSN: 1094–4087.
- [5] *Rumyantsev V.D., Ashcheulov Yu.V., Chekalin A.V., Davidiyuk N.Yu., Malevskiy D.A., Monastyrenko A.O., Pokrovskiy P.V., Sadchikov N.A., Terra A.R., Andreev V.M.* // Proc. of the 8th International Conference on Concentrating Photovoltaics (CPV-8). Toledo, Spain. April 16–18. 2012.
- [6] IEC 60904-9: Photovoltaic devices — Part 9: Solar simulator performance requirements, ed. 2, Publication Date 2007-10-16.
- [7] IEC 62670: Photovoltaic concentrators (CPV) — performance testing Part 1: Standard conditions, Publication Date 2013-09-25. Part 2: Energy rating by measurement. Part 3: Power rating procedures.
- [8] *Dominguez C., Askins S., Anton I., Sala G.* „Indoor Characterization of CPV modules using the Helios 3198 Solar Simulator“ in Proc. 24th EU PVSEC, Hamburg 2009, 165–169.
- [9] *Peharz G., Rodriguez J.P.F., Siefer G., Bett A.W.* „Indoor Characterization of CPV modules at Fraunhofer ISE“ in Proc. ICSC-5, Palm Desert 2008.
- [10] *Rumyantsev V.D., Andreev V.M., Chekalin A.V., Davidiyuk N.Yu., Im O.A., Khazova E.V., Sadchikov N.A.* // AIP Conf. Proc. 2013. Vol. 556. P. 185.
- [11] *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.
- [12] *Andreev V.M., Ionova E.A., Larionov V.R., Rumyantsev V.D., Shvarts M.Z., Glenn G.* // Proceedings of the IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, May 7–12, 2006, Hawaii. P. 799–802, ISBN: 1-4244-0017-1.