

Высокоэффективные фотоэлектрические модули с концентраторами солнечного излучения

© А.В. Чекалин, А.В. Андреева, Н.Ю. Давидюк, Н.С. Потапович, Н.А. Садчиков, В.М. Андреев,
Д.А. Малевский

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

Поступило в Редакцию 14 ноября 2020 г.

В окончательной редакции 13 января 2021 г.

Принято к публикации 14 января 2021 г.

Приведены результаты исследований и разработок солнечных концентраторных фотоэлектрических модулей площадью 0.5 m^2 на основе линз Френеля с вторичными концентраторами солнечного излучения в виде инвертированных пирамид и с каскадными солнечными элементами в фокусе линз Френеля. В разработанных концентраторных фотоэлектрических модулях обеспечивается высокая кратность концентрирования (до $700\times$) и оптимальный температурный режим работы каскадных солнечных элементов. Фотоэлектрические модули характеризуются высоким значением КПД преобразования свыше 32%, что соответствует наивысшему мировому уровню для подобных концентраторных модулей.

Ключевые слова: концентраторные фотоэлектрические модули, КПД, линзы Френеля, вторичные концентраторы, каскадные солнечные элементы.

DOI: 10.21883/JTF.2021.06.50859.314-20

Введение

Развитие электроэнергетики в мире до недавнего времени не встречало принципиальных трудностей. Увеличение производства электроэнергии происходило в основном за счет увеличения добычи нефти и газа. Однако энергетика оказалась первой крупной отраслью мировой экономики, которая столкнулась с ситуацией видимого истощения своей традиционной сырьевой базы. Кроме того, загрязнение окружающей среды продуктами сгорания ископаемого топлива является причиной ухудшения экологии планеты. Эти обстоятельства определяют возрастающую роль возобновляемых источников энергии и, в первую очередь, энергии Солнца. Фотоэлектрическое преобразование солнечной энергии является наиболее перспективным направлением возобновляемой энергетики.

Перед исследователями и разработчиками солнечных батарей стоит задача повышения конкурентоспособности солнечной энергетики. Перспективными путями снижения стоимости „солнечного“ электричества является: увеличение КПД солнечных батарей, например, за счет применения каскадных солнечных элементов (СЭ), снижение количества полупроводникового материала при использовании систем концентрирования света и увеличение суточного энергопотребления, обеспечиваемого системами слежения за Солнцем [1–5]. Следует отметить преимущества концентраторных фотоэнергосистем с точки зрения сроков окупаемости: „время возврата“

энергии, затраченной на их изготовление, составляет менее одного года.

Ряду мировых компаний — разработчиков систем на основе данной технологии — удалось достичь значительных успехов в эффективности преобразования солнечного света. Были разработаны многокаскадные СЭ с эффективностью 47.1% [6], тогда как полученная предельная эффективность кремниевого кристаллического элемента составляет 26.7% [7]. Такое значение КПД для многокаскадных СЭ, состоящих из 6 $p-n$ -переходов, получено в условиях равномерной освещенности поверхности СЭ излучением с эталонным спектром AM1.5d и интенсивностью, соответствующей концентрированию солнечного излучения в 143 крат. Однако в концентраторных модулях на фоточувствительную поверхность ФЭП всегда падает неравномерное по интенсивности и спектру солнечное излучение, что приводит к снижению КПД СЭ в натуральных условиях в сравнении с рекордными значениями КПД СЭ, полученными в идеальных лабораторных условиях. Рекорд эффективности концентраторного модуля на сегодняшний день принадлежит Фраунгоферскому институту — 36.7% [8]. Но стоит отметить, что входная апертура модуля составляла всего 832 cm^2 , количество СЭ — 52 и концентрирование солнечного излучения — 143 крат. Профиль линз Френеля этого модуля был оптимизирован для данной концентрации с целью перераспределения солнечного излучения в фокальном пятне для уменьшения неравномерности светового потока СЭ.

Полноразмерные концентраторные фотоэлектрические модули (КФЭМ), произведенные в мире, обладают более скромными характеристиками. Это объясняется использованием стандартных СЭ с тремя $p-n$ -переходами, доступными в массовом производстве, неравномерностью засветки поверхности СЭ при фокусировке излучения с более высокой локальной степенью концентрирования излучения в центре пятна, превышающей 400 крат. Номинальная величина КПД таких СЭ в лабораторных условиях составляет 42–43% при равномерной засветке и концентрировании солнечного излучения 400–600 крат [9]. Так, например, модули СЗРV компании Azur Space имеют мощность 440 W и КПД около 32% [10] при концентрировании около 700 крат, у канадской компании STACЕ при номинальной мощности модуля 2040 W эффективность составляет 31.8% [11] при концентрировании 400 крат.

Использование вторичных концентраторов позволяет увеличить кратность концентрирования излучения, улучшить разориентационные характеристики концентраторных фотоэлектрических модулей, уменьшить потери, связанные с хроматической абберацией [12,13] и неравномерным распределением излучения по поверхности фотоэлектрических преобразователей. Используемые в фотоэлектрических модулях элементы вторичной оптики можно разделить на несколько групп в зависимости от принципа их работы (отражающие или преломляющие) и их геометрии. Наиболее часто применяются элементы, выполненные в виде полусфер различных конфигураций, либо в виде параболических отражателей или усеченных инвертированных пирамид (фоконов) [14–16].

ФТИ им. А.Ф. Иоффе внес существенный вклад в создание высокоэффективных солнечных элементов на основе гетероструктур [1–3]. На основе этих элементов в ФТИ разработаны солнечные фотоэнергоустановки нового поколения с концентрированием солнечного излучения до 500–700 крат. Эти солнечные фотоэнергоустановки состоят из КФЭМ, расположенных на электромеханической системе слежения за Солнцем, снабженной датчиком положения Солнца, обеспечивающей точность слежения за Солнцем порядка 0.1° .

1. Конструктивные особенности солнечных концентраторных модулей

При разработке концентраторных фотоэлектрических модулей необходимо обеспечить высокую оптическую эффективность концентраторов излучения и высокий КПД солнечных элементов, работающих при высокой мощности концентрированного солнечного излучения.

Конструктивно КФЭМ представляют собой панели линз Френеля и электрогенерирующие панели (ЭГП), скрепленные между собой при помощи профилированных стенок из алюминиевого сплава (рис. 1).

Линзовые панели представляют собой матрицу квадратных линз Френеля, прилегающих друг к другу боковыми сторонами, расположенных на общем стеклянном



Рис. 1. Фотография КФЭМ-60, установленного на системе слежения за Солнцем. Панель линз Френеля содержит матрицу из 128 линз Френеля размерами 60×60 mm. Размеры фотоприемной поверхности 480×960 mm.

основании, и изготавливаются методом вулканизации жидкой силиконовой смеси между силикатным стеклом и негативной матрицей линз Френеля. При выборе размеров единичной линзы Френеля и всей линзовой панели необходимо учитывать требования, предъявляемые к конструкции КФЭМ. Так, например, для получения одного и того же значения кратности концентрирования солнечного излучения могут быть использованы линзы Френеля размерами 300×300 mm, с фокусным расстоянием 500 mm, фокусирующие свет на СЭ размерами 10×10 mm, либо линзы Френеля размерами 30×30 mm, с фокусным расстоянием 50 mm и СЭ размерами 1×1 mm. В первом случае концентраторные модули будут иметь большую конструктивную толщину, задаваемую фокусным расстоянием линзы. При этом возникает проблема отвода большого количества тепловой мощности и большого фототока от каждого солнечного элемента.

Во втором случае „малоразмерных“ модулей эти проблемы в значительной степени решаются, однако чрезмерное дробление приводит к увеличению количества взаимных соединений СЭ, что увеличивает трудоемкость сборки при необходимости обеспечения высокой точности взаимного позиционирования большого количества СЭ и концентраторов. Кроме того, при слишком малых размерах СЭ доля нефотоактивной поверхности, необходимой для присоединения контактов, возрастает,

что ведет к неоправданному увеличению расхода полупроводникового материала.

При проведении настоящей работы были разработаны и исследованы характеристики двух видов КФЭМ: с линзами Френеля размером 60×60 mm с фокусным расстоянием 105 mm (КФЭМ-60) и модули с линзами Френеля размером 120×120 mm с фокусным расстоянием 220 mm (КФЭМ-120). В обоих типах КФЭМ в качестве приемников излучения были использованы трехкаскадные солнечные элементы на основе гетероструктур GaInP/GaAs/Ge с КПД преобразования солнечного излучения более 42%.

2. Концентраторные фотоэлектрические модули КФЭМ-60

В конструкции КФЭМ-60 с линзами Френеля размерами 60×60 mm линзовые панели содержат матрицу из 128 линз, сформированную на стекле размерами $480 \times 960 \times 4$ mm. На электрогенерирующих панелях для приема излучения в фокусах линз были установлены трехкаскадные GaInP/GaAs/Ge-солнечные элементы с размерами 3×3 mm. В качестве основного конструкционного материала электрогенерирующих панелей было использовано листовое силикатное стекло, такое же, как и для фронтальной панели линз Френеля. Стекло является одновременно и механической основой элек-

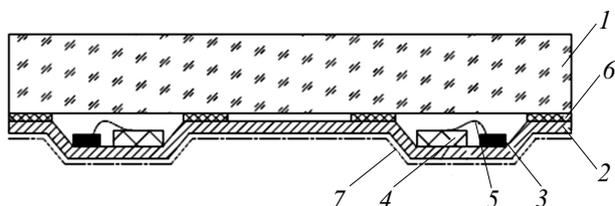


Рис. 2. Схематический разрез фрагмента ЭГП в КФЭМ-60: 1 — стекло, 2 — теплопроводящее основание, 3 — СЭ, 4 — коммутационная шина, 5 — монтажная золотая проволока, 6 — лента клейкая безосновная, 7 — ламинирующая пленка EVA и защитная пленка COVEME.



Рис. 3. Внешний вид тыльной стороны электрогенерирующей панели в КФЭМ с закрепленной на ней коммутационной коробкой.

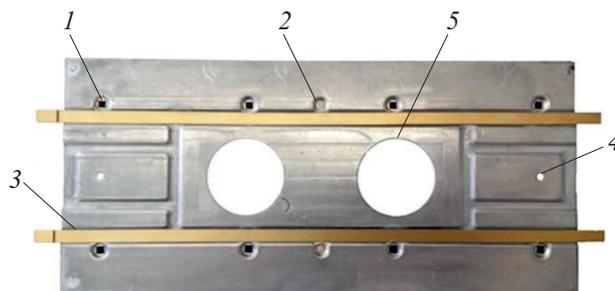


Рис. 4. ТО из меди в КФЭМ-60: 1 — СЭ, установленные в выемки, 2 — байпасные диоды, установленные в выемки, 3 — коммутационные шины, 4 — отверстия для позиционирования ТО, 5 — отверстия для улучшения прилегания ламинирующей пленки к стеклу.

трогенерирующей панели, и интегральным защитным окном для всех СЭ в ЭГП (рис. 2, 3).

Солнечные элементы устанавливались в углублениях металлических теплоотводящих оснований (ТО), которые закреплялись на тыльной (внешней) стороне стекла с помощью клейкой ленты. Благодаря малой высоте профиля теплоотводов, защита СЭ от воздействия внешней среды осуществляется за счет герметизации всей тыльной поверхности стекла с установленными ТО при использовании этилвинилацетатной ламинирующей пленки.

ТО (рис. 4) изготавливались штамповкой из листовой меди толщиной 0.5 mm с последующим гальваническим покрытием олово-висмут для напайки солнечных элементов. Размещение солнечных элементов в лунках ТО обеспечивало взаимное позиционирование СЭ с шагом 60 mm, равным расстоянию между центрами фокальных пятен солнечного излучения, с точностью ± 0.05 mm. На каждое теплоотводящее основание устанавливается восемь СЭ и два байпасных диода. Электрически все элементы на плате соединены параллельно.

При сборке ЭГП смонтированные теплоотводящие основания с помощью отверстий для позиционирования устанавливаются на штифтовом поле приспособления для монтажа и закрепляются на стекле электрогенерирующей панели, образуя массив из 128 солнечных элементов.

3. Концентраторные фотоэлектрические модули КФЭМ-120

В модуле КФЭМ-120 (рис. 5) линзовая панель содержит 32 линзы Френеля размерами 120×120 mm. Электрогенерирующая плата содержит 32 чипа трехкаскадных СЭ размерами 5.5×6 mm, размещенных на внутренней стороне металлического основания. Каждая линза фокусирует солнечное излучение на поверхность расположенного под ней фотоприемника.



Рис. 5. КФЭМ-120: линзовая панель содержит матрицу из 32 линз Френеля размерами 120×120 mm. Размеры фотоактивной поверхности 480–960 mm.



Рис. 6. Фрагмент модуля КФЭМ-120 (без боковых стенок): линзовая панель с линзами Френеля размерами 120×120 mm. Чипы СЭ с установленными фоконями напаяны на теплопроводящие электроизолирующие платы, закрепленные на металлическом основании.

Для увеличения эффективности преобразования солнечного излучения и улучшения разориентационных характеристик концентраторных модулей над каждым солнечным элементом был установлен элемент вторичной концентрирующей оптики — фокон.

Для отвода тепла солнечные элементы смонтированы на теплопроводящих электроизолирующих платах, которые закреплены на нижнем металлическом основании размером $980 \times 500 \times 4$ mm из алюминиевого сплава. Электрически СЭ попарно соединены параллельно и все пары СЭ между собой имеют последовательное соединение (рис. 6).

На рис. 6 показан фрагмент конструкции КФЭМ-120 без боковых стенок, содержащий линзовую панель и СЭ с установленными на них фоконами, закрепленными на нижнем основании.

4. Разработка теплоотводящих электроизолирующих оснований для монтажа солнечных элементов в КФЭМ-120

Для эффективного отвода тепла и уменьшения разогрева СЭ нижнее основание КФЭМ изготавливалось из алюминиевого сплава, имеющего высокую теплопроводность. Монтаж СЭ осуществляется методом пайки на теплоотводящие электроизолирующие платы, закрепляемые на нижнем основании модуля.

Для оценки эффективности отвода тепла от СЭ проведены эксперименты для разных вариантов конструкции теплоотводящих электроизолирующих плат:

Были разработаны и изготовлены:

- теплоотводящие электроизолирующие платы на основе теплопроводящей керамики AlN размерами 22×22 mm с двухсторонним покрытием медь-золото;
- теплоотводящие электроизолирующие платы на основе теплопроводящей керамики Al_2O_3 размерами 22×22 mm с двухсторонним покрытием медь-золото;
- два варианта алюмооксидных плат на алюминиевых основаниях с оксидными изолирующими слоями размерами 22×14 и 30×0 mm с двухсторонним покрытием медь-золото.

Толщина керамики в керамических платах составляла $380 \mu m$, толщина алюминиевых оснований в алюмооксидных платах — 1.5 mm.

Эффективность отвода тепла от кристаллов СЭ при разных типах теплоотводящих электроизолирующих плат оценивалась по величине перегрева фотоприемников относительно комнатной температуры при подведении к СЭ заданной тепловой мощности. Была использована методика определения величины перегрева $p-n$ -переходов СЭ при пропускании прямого тока [17]. При этом индикатором изменения температуры СЭ служили значения прямого падения напряжения на $p-n$ -переходе [18].

При преобразовании солнечного излучения концентраторными модулями на поверхность линзы Френеля размером 120×120 mm единичной ячейки КФЭМ-120 при интенсивности светового потока $850 W/m^2$ поступает 12.2 W солнечной энергии. При оптической эффективности фокусировки 85% на поверхность солнечного элемента фокусируется излучение мощностью 10.4 W. При КПД фотоэлектрического преобразования света 30%, энергия, идущая на нагрев СЭ, работающих в режиме оптимальной нагрузки, составляет около 7 W.

В исследуемых submodule были измерены температуры перегрева фотоэлементов, напаянных на теплоотводящие платы разной конструкции. Отвод тепла от теплоотводящих плат при этом осуществлялся закреплением последних на нижнем основании submodule либо с помощью теплопроводящей пасты, либо наклейкой силиконом.

На рис. 7 приведены температурные характеристики двух образцов СЭ, напаянных на теплоотводящие электроизолирующие платы на основе теплопроводящей керамики (рис. 7, а) и двух образцов СЭ, напаянных на алюминиевые платы с оксидным покрытием разных размеров (рис. 7, б).

При подводимой электрической мощности 7 W в рабочем режиме перегрева для разных Al-оксид теплоотводов составлял $32.7-36.5^\circ C$. Перегрев образцов, напаянных на электроизолирующие платы из теплопроводящей керамики Al_2O_3 при тех же условиях, составил $26.6^\circ C$, а с платами на основе керамики AlN перегрев ФЭП составил $24^\circ C$.

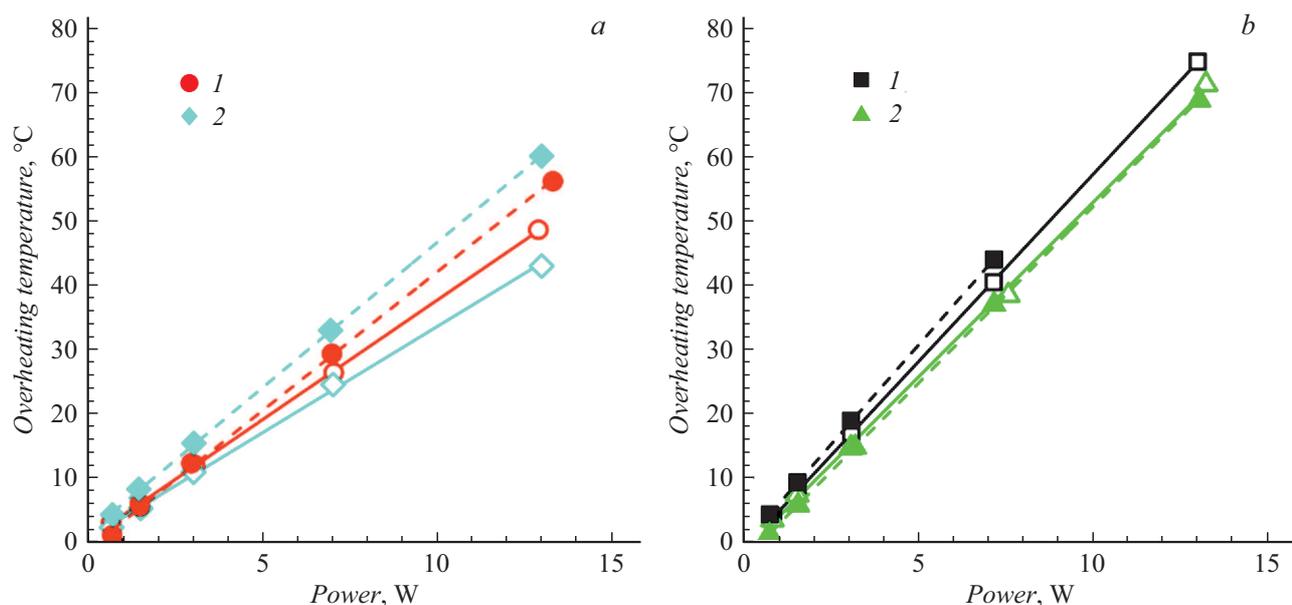


Рис. 7. Зависимость температуры перегрева солнечных элементов от мощности нагрева: *a* — солнечные элементы питаются на теплоотводящие электроизолирующие платы на основе теплопроводящей керамики (1 — Al_2O_3 2.2×2.2 , 2 — AlN 2.2×2.2 cm), закрепленные на нижней плите субмодуля посредством прижатия через теплопроводящую пасту (сплошные линии), либо путем наклейки силиконом (штриховые линии), *b* — СЭ питаются на теплоотводящие электроизолирующие платы на основе алюминиевых пластин с оксидным покрытием (1 — 1.4×2 , 2 — 3×3 cm), закрепленные на нижней плите субмодуля посредством прижатия через теплопроводящую пасту (сплошные линии), либо наклейки силиконом (штриховые линии).

Учитывая, что алюминиевые платы с оксидным покрытием является более технологичными в производстве и имеют меньшую стоимость целесообразно для изготовления теплоотводящих плат использовать этот материал.

При монтаже СЭ в КФЭМ-120 были использованы теплоотводящие электроизолирующие платы на основе алюминиевых пластин размерами $30 \times 30 \times 1.5$ mm с двухсторонними оксидными изолирующими слоями и покрытием медь-золото. При температуре окружающей среды $+25^\circ\text{C}$, температура СЭ в разработанных модулях не превышала $+60^\circ\text{C}$.

5. Разработка вторичных оптических концентраторов для КФЭМ-120

Установка перевернутого усеченного конуса или перевернутой усеченной пирамиды позволяет часть лучей от линзы Френеля, первоначально не попадающих на фотоприемную поверхность, перенаправить на СЭ. В отличие от линзовых вторичных концентраторов, увеличивающих локальную концентрацию излучения в центре сфокусированного пятна, конические отражатели улучшают равномерность распределения излучения по поверхности СЭ и увеличивают среднюю кратность концентрирования света.

В настоящей работе для увеличения энергетической эффективности КФЭМ были разработаны вторичные оптические концентраторы (фоконы) в виде полый перевернутой усеченной пирамиды с зеркальным отраже-

нием от внутренней поверхности боковых стенок из анодированного алюминия.

Для определения оптимальных параметров фоконов были проведены исследования характеристик концентраторных фотоэлектрических модулей с фоконами разной конфигурации. Для этой цели были изготовлены единичные субмодули, содержащие одну линзу Френеля размером 120×120 mm с фокусным расстоянием 220 mm и электрогенерирующую плату с установленным трехкаскадным СЭ размерами 5.5×6 mm, над поверхностью которого устанавливался исследуемый фокон. Для измерения характеристик исследуемых модулей был использован разработанный в ФТИ им. А.Ф. Иоффе лабораторный импульсный измерительный комплекс, имитирующий спектр и угловую расходимость светового потока, идущего от солнечного диска при энергетической освещенности 1000 W/m^2 [19].

Для определения оптимальных размеров пирамидальных отражателей был изготовлен ряд фоконов с различной высотой от 10 до 30 mm, углом наклона граней от 17 до 30° и размерами выходной апертуры 4.5×4.5 и 5×5 mm.

При измерении характеристик субмодулей, было установлено, что максимальные значения электрической мощности и КПД преобразования света наблюдаются в субмодулях, содержащих фоконы с углом наклона граней $22-25^\circ$. С увеличением высоты фоконов эффективность преобразования света субмодулями увеличивается, однако при высоте фокона больше 20 mm это увеличение незначительно.

Параметры световых ВАХ модулей КФЭМ-60 и КФЭМ-120

Модуль	I_{sc} , А	U_{oc} , В	I_{opt} , А	U_{opt} , В	P_{opt} , Вт	FF , %	КПД, %
КФЭМ-60	3.861	49.574	3.554	42.662	151.6	79.2	32.9
КФЭМ-120	3.823	49.585	3.392	43.883	148.87	78.53	32.3

Было продемонстрировано, что эффективность преобразования солнечного излучения субмодулями с фоконами, имеющими размер выходной апертуры 5×5 мм, уменьшается практически линейно с увеличением зазора между фотоприемной поверхностью СЭ и нижней кромкой фокон. В субмодулях с фоконами, имеющими размер выходной апертуры 4.5×4.5 мм, наблюдалось незначительное уменьшение эффективности при увеличении зазора вплоть до $350\text{--}400$ мкм.

6. Разориентационные характеристики модулей КФЭМ 120

Были проведены исследования влияния отклонения оптической оси субмодуля от направления на Солнце на КПД субмодуля с линзой Френеля размерами 120×120 мм (рис. 8). Допустимый угол разориентации, определяемый по разориентационным кривым на уровне 0.9 от максимума, для модуля без вторичной оптики составляет $\pm 0.45^\circ$. Наибольший „допустимый“ угол разориентации $\pm 0.8^\circ$ наблюдается в модуле с фоконем с углом наклона граней 22° (рис. 8, кривая 3).

При облучении имитатором солнечного излучения (энергетическая освещенность 1000 W/m^2) КПД исследуемого субмодуля без фокон составил 32%. Добавление фокон с углом наклона граней 22° обеспечило увеличение КПД субмодуля до 34%.

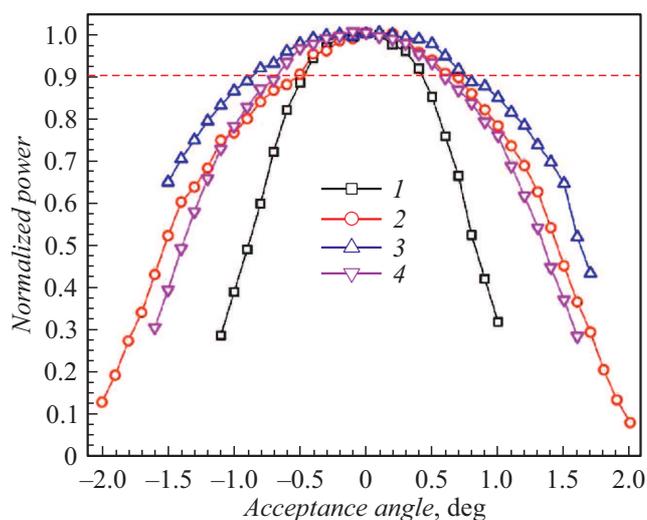


Рис. 8. Разориентационные кривые субмодулей: 1 — без фокон, 2 — фокон с углом наклона граней 20° , 3 — фокон с углом наклона граней 22° , 4 — фокон с углом наклона граней 25° .

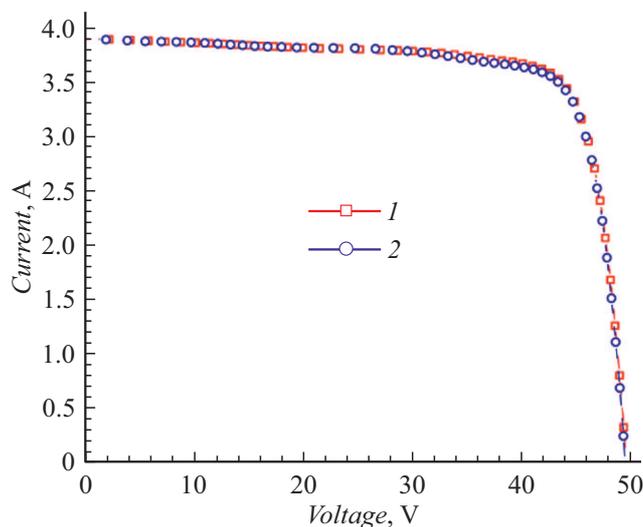


Рис. 9. Световые ВАХ для модулей КФЭМ 60 (1) и КФЭМ 120 (2).

7. Световые вольт-амперные характеристики солнечных концентраторных модулей

Измерение КПД разработанных концентраторных модулей производилось с помощью импульсного имитатора солнечного излучения при температуре 25°C . За время светового импульса записывалась вольт-амперная характеристика (ВАХ) исследуемого модуля и производилось измерение энергетических параметров модуля (см. таблицу и рис. 9).

При облучении имитатором солнечного излучения (при энергетической освещенности 1000 W/m^2) максимальный КПД преобразования света в модуле КФЭМ-60 составил 32.9% и максимальная генерируемая электрическая мощность — 151.6 Вт. Максимальный КПД модуля КФЭМ-120 составил 32.3% и максимальная генерируемая электрическая мощность — 149 Вт (I_{sc} — ток короткого замыкания, U_{oc} — напряжение холостого хода, I_{opt} , U_{opt} , P_{opt} — ток, напряжение и мощность в точке оптимальной нагрузки, соответственно, FF — фактор заполнения ВАХ).

КПД модулей, облучаемых прямым солнечным излучением, составил 30–31%. Уменьшение КПД модулей „под солнцем“ связано с повышенной рабочей температурой СЭ и с отличием спектра солнечного излучения от стандартного спектра AM 1.5d, при котором обеспечивается максимальный КПД каскадных СЭ.

Можно отметить, что полученные значения КПД разработанных КФЭМ соответствуют значениям КПД лучших зарубежных аналогов, приведенных в первой части настоящей статьи.

Уменьшение значения эффективности преобразования излучения полноразмерными концентраторными модулями по сравнению с максимальной эффективностью СЭ объясняется наличием дополнительных потерь при фокусировке излучения линзовыми концентраторами, снижением эффективности СЭ при засветке фотоприемных поверхностей элементов излучением, неоднородным по интенсивности и спектральному составу, а также электрическими потерями, возникающими при монтаже большого количества СЭ.

Заключение

Разработаны КФЭМ с параметрами, соответствующими уровню изготавливаемых в мире полноразмерных КФЭМ. В разработанных модулях с линзовыми панелями, содержащими 128 линз Френеля размерами 60×60 mm (КФЭМ-60), или 32 линзы Френеля размерами 120×120 mm (КФЭМ-120), при входной апертуре 0.46 m^2 КПД модулей составил: 32.9% в КФЭМ-60 и 32.3% в КФЭМ-120. Высокое значение эффективности фотоэлектрического преобразования солнечного излучения такими модулями делает их перспективными и конкурентоспособными, особенно для эксплуатации в регионах Земли с высоким уровнем инсоляции.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Zh.I. Alferov, V.M. Andreev, M.Z. Shvarts. In: *High-Efficient Low-Cost Photovoltaics. Recent Developments*, ed. by V. Petrova-Koch, R. Hezel, A. Goetzberger (Springer International Publishing, 2020), с. 133. DOI: 10.1007/978-3-030-22864-4
- [2] Zh.I. Alferov, V.M. Andreev, V.D. Rummyantsev. In: *Concentrator Photovoltaics*, ed. by A. Luque, V.M. Andreev (Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2007), с. 25. DOI: 10.1007/978-3-540-68798-6
- [3] V.D. Rummyantsev. In: *Concentrator Photovoltaics*, ed. by A. Luque, V.M. Andreev (Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2007), с. 151. DOI: 10.1007/978-3-540-68798-6
- [4] A.W. Bett, F. Dimroth, G. Siefer. In: *Concentrator Photovoltaics*, ed. by A. Luque, V.M. Andreev (Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2007), с. 67. DOI: 10.1007/978-3-540-68798-6
- [5] G. Sala, A. Luque. In: *Concentrator Photovoltaics*, ed. by A. Luque, V.M. Andreev (Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2007), с. 1. DOI: 10.1007/978-3-540-68798-6
- [6] J.F. Geisz, R.M. France, K.L. Schulte, M.A. Steiner, A.G. Norman, H.L. Guthrey, M.R. Young, T. Song, T. Moriarty. *Nat. Energy*, **5**, 326 (2020). DOI: 10.1038/s41560-020-0598-5
- [7] M. Green, E. Dunlop, J. Hohl-Ebinger, M. Yoshita, N. Kopidakis, A. Ho-Baillie. *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, **28** (1), 3 (2019). DOI: 10.1002/pip.3228
- [8] M. Steiner, A. Bösch, A. Dilger, F. Dimroth, Tobias Dörsam, M. Müller, T. Hornung, G. Siefer, M. Wiesenfarth, A.W. Bett. *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, **23** (10), 1323 (2014). DOI: 10.1002/pip.2568
- [9] [link] *CPV Solar Cells*. Last accessed: 24.12.2020. <http://www.azurspace.com/index.php/en/products/products-cpv/cpv-solar-cells>.
- [10] [link] *CPVMod — CPV Module in Modular Design*. Last accessed: 24.12.2020. <https://www.ise.fraunhofer.de/en/research-projects/cpvmod>.
- [11] E. Gerster, T. Gerstmaier, A. Gombert, R. Krause, S. Riesena, S. Wanka, T. Zech. *AIP Conf. Proc.*, **1679**, 040006 (2015). DOI: 10.1063/1.4931517
- [12] C. Dominguez, I. Anton, G. Sala, S. Askins. *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, **21** (7), 1478 (2013). DOI: 10.1063/1.4962113
- [13] M. Victoria, R. Herrero, C. Dominguez, I. Anton, S. Askins, G. Sala, *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, **21** (3), 308 (2013). DOI: 10.1002/pip.1183
- [14] M. Victoria, C. Dominguez, I. Anton, G. Sala, *Opt. Express*, **17**, 6487 (2009). DOI: 10.1364/OE.17.006487
- [15] J.P. Ferrer-Rodríguez, H. Baig, E.F. Fernández, F. Almonacid, T. Mallick, P. Pérez-Higueras. *Sol. Energy*, **155**, 805 (2017). DOI: 10.1016/j.solener.2017.07.027
- [16] Yi-Ch. Chen, H.-W. Chiang. *Appl. Sci.*, **5**, 770 (2015). DOI: 10.3390/app5040770
- [17] V.D. Rummyantsev, N.Yu. Davidyuk, A.V. Chekalin, D.A. Malevskiy, A.N. Pan'chak, N.A. Sadchikov, V.M. Andreev, A. Luque. *IEEE J. Photovolt*, **5** (6), 1715 (2015). DOI: 10.1109/JPHOTOV.2015.2479464
- [18] G.S. Kinsey, P. Hebert, K.E. Barbour, D.D. Krut, H.L. Cotal, R.A. Sherif. *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, **16** (6), 503 (2008). DOI: 10.1002/pip.834
- [19] V.D. Rummyantsev, V.R. Larionov, D.A. Malevskiy, P.V. Pokrovskiy, N.A. Sadchikov. *7th Int. Conf. Concentrating Photovolt. Systems: CPV-7* (2011). DOI: 10.1063/1.3658329