

Методика контроля соотношения прямой и диффузной компонент солнечного излучения при измерении фотоэлектрических характеристик гибридного модуля

© Д.Ю. Березанов, В.М. Емельянов, Д.А. Малевский, П.В. Покровский, М.З. Шварц, В.Р. Ларионов

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

E-mail: d.berezanov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 19 мая 2023 г.

В окончательной редакции 11 августа 2023 г.

Принято к публикации 30 октября 2023 г.

Рассматривается разработка методики, позволяющей в лабораторных условиях регулировать долю прямой и диффузной компонент в световом потоке для контроля энерговыработки гибридного модуля, предназначенного как для преобразования диффузного излучения, так и для высокоэффективного преобразования прямого излучения. В натуральных условиях при увеличении доли диффузного излучения в общем потоке в гибридном модуле наблюдается размытие светового пятна и снижение интегральной облученности концентраторного элемента, что приводит к перераспределению освещенности между концентраторным и планарным контурами гибридного модуля. Воспроизведение излучения с контролируемым балансом прямого и диффузного излучения позволяет исследовать характеристики гибридного модуля в контролируемых условиях.

Ключевые слова: гибридный модуль, прямое излучение, диффузное излучение, распределение энергетической освещенности, световой поток с контролируемыми параметрами.

DOI: 10.61011/PJTF.2023.23.56858.158A

Современный этап в развитии солнечной фотоэлектрической энергетики связан с так называемыми „комбинированными“ или „гибридными“ концепциями [1–3], сочетающими преимущества высокоэффективных планарных кремниевых и концентраторных многопереходных A^3B^5 [4] солнечных элементов, КПД которых превышает 25 и 42% соответственно [5].

В двухконтурной „концентраторно-планарной“ системе обеспечивается сглаживание колебаний электрогенерации, которые в значительной мере являются следствием изменения погодных условий, влияющих на баланс прямого и диффузного излучения в приходящем потоке солнечного излучения [6]. Планарные контуры комбинированных модулей менее чувствительны к такому изменению, чем концентраторные, их эффективность меняется незначительно. В условиях, когда преобладает исключительно прямое излучение, концентраторные модули показывают практически в 2 раза большую эффективность и энерговыработку.

В натуральных условиях на работу фотоэлектрических модулей влияет множество факторов, таких как интенсивность солнечного излучения, доли прямого и диффузного излучения, температура воздуха, влажность, скорость ветра и т.д. Получив данные в ходе долгосрочных натуральных испытаний, можно определить влияние этих факторов на энерговыработку фотоэлектрических модулей [7]. Однако даже при наличии данных воспроизведение в лаборатории условий, близких к натурным, является сложной задачей. Несмотря на существование специальных методов и устройств, которые позволяют создавать близкие к реальным условия, этого все

равно может быть недостаточно, что служит толчком для разработки новых методик измерения, требующих соответствующего оборудования.

Цель исследования — разработать методику контроля и воспроизведения прямой и диффузной компонент излучения в лабораторных условиях для измерения фотоэлектрических характеристик гибридного модуля.

В ходе натуральных испытаний при увеличении доли диффузного излучения в общем световом потоке наблюдается размытие (увеличение в размерах) фокального пятна, формируемого концентратором, с одновременным снижением интегральной облученности концентраторного элемента. В лабораторных условиях при моделировании солнечного излучения на имитаторах контроль и мониторинг динамики такого размытия будут давать информацию о корректности воспроизведения параметров светового потока в части соотношения прямой и диффузной компонент и угловой расходимости излучения.

В работе рассматривается оптоэлектронное устройство (рис. 1, а), по своей конструкции и функционалу соответствующее единичной ячейке линза—элемент гибридного модуля и позволяющее регистрировать профиль распределения облученности в фокальной плоскости линзового концентратора, т.е. контролировать переход от режима поступления только прямой компоненты солнечного излучения (все излучение сконцентрировано на многопереходном солнечном элементе) к режиму поступления только диффузной (фокальное пятно размыто). Оно включает:

— концентратор излучения типа „линза Френеля“ [8,9] (аналогичный используемому в концентраторном конту-

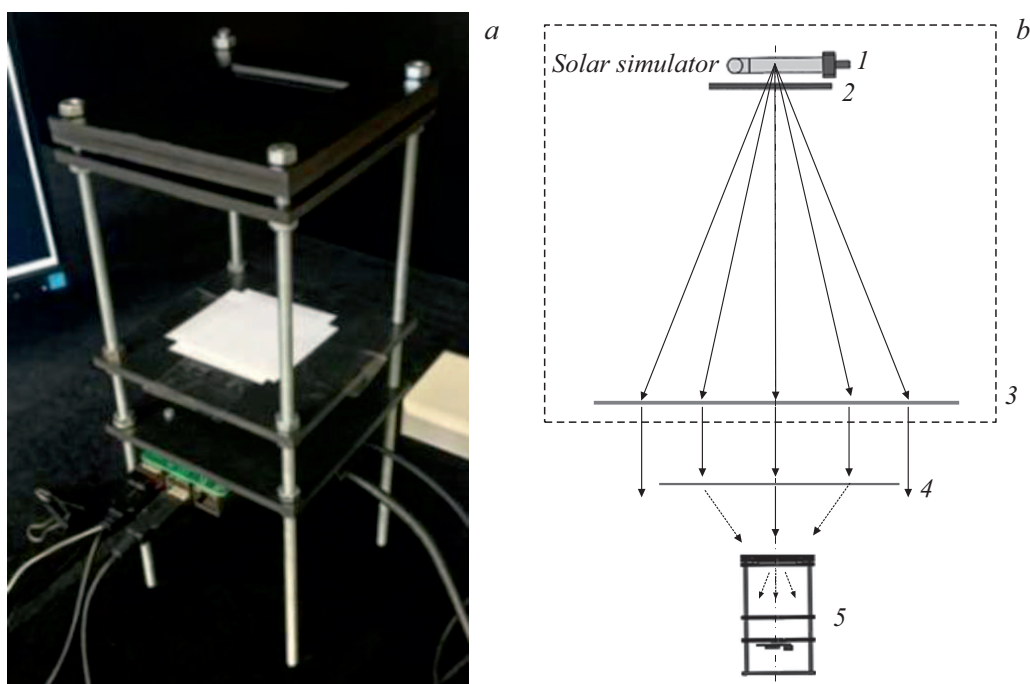


Рис. 1. Внешний вид устройства (*a*) и оптическая схема (*b*). 1 — источник излучения (ксенонная лампа), 2 — апертура с фильтром, 3 — формирователь коллимированного потока для моделирования прямой компоненты солнечного излучения, 4 — рассеиватель для моделирования диффузной компоненты солнечного излучения, 5 — оптоэлектронное измерительное устройство.

ре гибридного модуля) размером 6×6 см со средней кратностью концентрации 400 и максимальной 2500;

— полупрозрачный круглый экран диаметром 8 см, устанавливаемый на фокальном расстоянии от линзы Френеля (в плоскости предполагаемого расположения концентраторного солнечного элемента);

— камеру, располагаемую за экраном и регистрирующую изображение светового пятна на экране.

Принцип работы устройства состоит в фиксации светового пятна камерой с последующим анализом (профиллированием) интенсивности свечения поверхности экрана. Объектив камеры переносит (масштабирует) изображение на фотоприемную матрицу, что при выбранном формфакторе дает разрешение в 156 пикселей на квадратный миллиметр экрана, обеспечивая тем самым достаточное оценивание распределения интенсивности в пределах светового пятна. Следует отметить, что данное устройство способно работать в условиях как постоянной засветки, так и импульсной.

Проведенные в натуральных условиях испытания показали, что существует связь между распределением интенсивности светового пятна и показаниями датчиков (пиранометра и актинометра). При минимальной доле рассеянного излучения наблюдается яркое пятно в фокальной плоскости линзы устройства. Последующее перераспределение долей между прямой и диффузной составляющими излучения с одновременным снижением общей освещенности приводит к уменьшению яркости пятна и увеличению его в диаметре.

В лабораторных условиях воспроизведение прямой и диффузной компонент излучения осуществляется на имитаторе солнечного излучения, причем для получения диффузного излучения используются рассеивающие экраны (рис. 1, *b*). Энергетическая облученность регулируется изменением напряжения на источнике питания импульсной лампы имитатора.

Распределение интенсивностей, регистрируемых оптоэлектронным устройством в натуральных (рис. 2, *a*) и лабораторных (рис. 2, *b*) условиях, имеет схожий характер при увеличении доли диффузного излучения в общем световом потоке: распределение, регистрируемое камерой, становится более равномерным.

Полученные в ходе натуральных и лабораторных испытаний вольт-амперные характеристики для концентраторного (рис. 3, *a*) и планарного (рис. 3, *b*) контуров практически идентичны, кроме напряжения холостого хода, что объясняется разными температурными условиями в ходе испытаний.

Разработанные экспериментальные средства (рассеивающие экраны к имитатору прямого солнечного излучения и оптоэлектронное устройство фиксации профиля облученности в фокальном пятне концентратора) позволили реализовать методику контролируемого изменения соотношения прямой и диффузной компонент в световом потоке излучения. Применение разработанной методики позволило выполнить характеризацию гибридных модулей в лабораторных условиях, независимо варьируя световые потоки для концентраторного и планарного фотоэлектрических контуров.

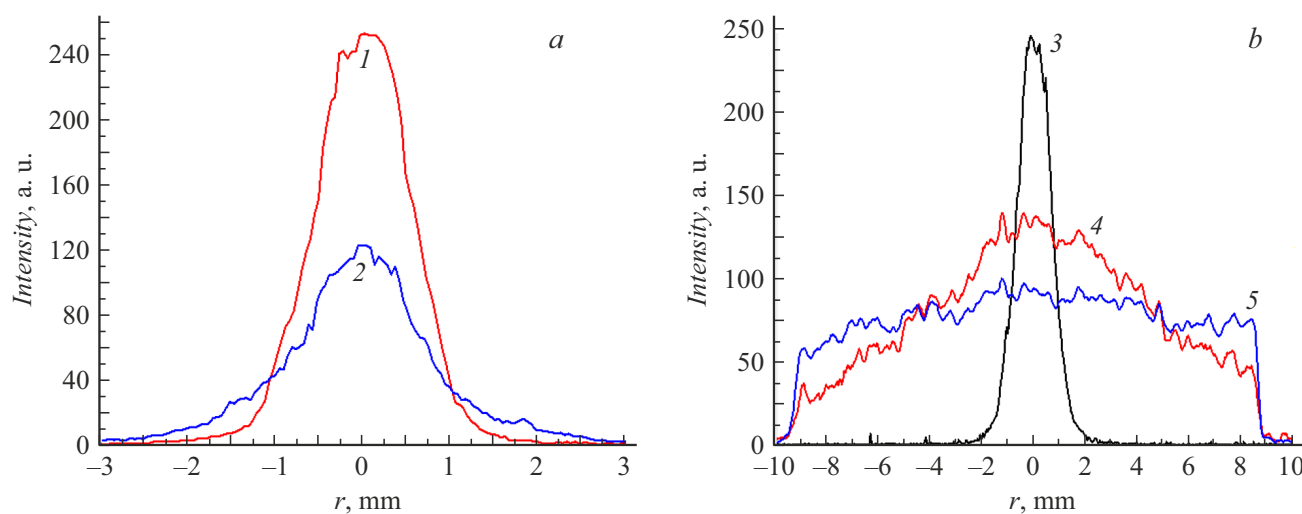


Рис. 2. Графики распределения энергетической освещенности в пределах светового (фокального) пятна радиусом r , зарегистрированные в натуральных (*a*) и лабораторных (*b*) условиях. Зависимости 1 и 2 получены в ясную и облачную погоду соответственно, зависимость 3 получена на имитаторе солнечного излучения, 4 и 5 — на имитаторе солнечного излучения с использованием однослойного и двухслойного рассеивающих экранов соответственно.

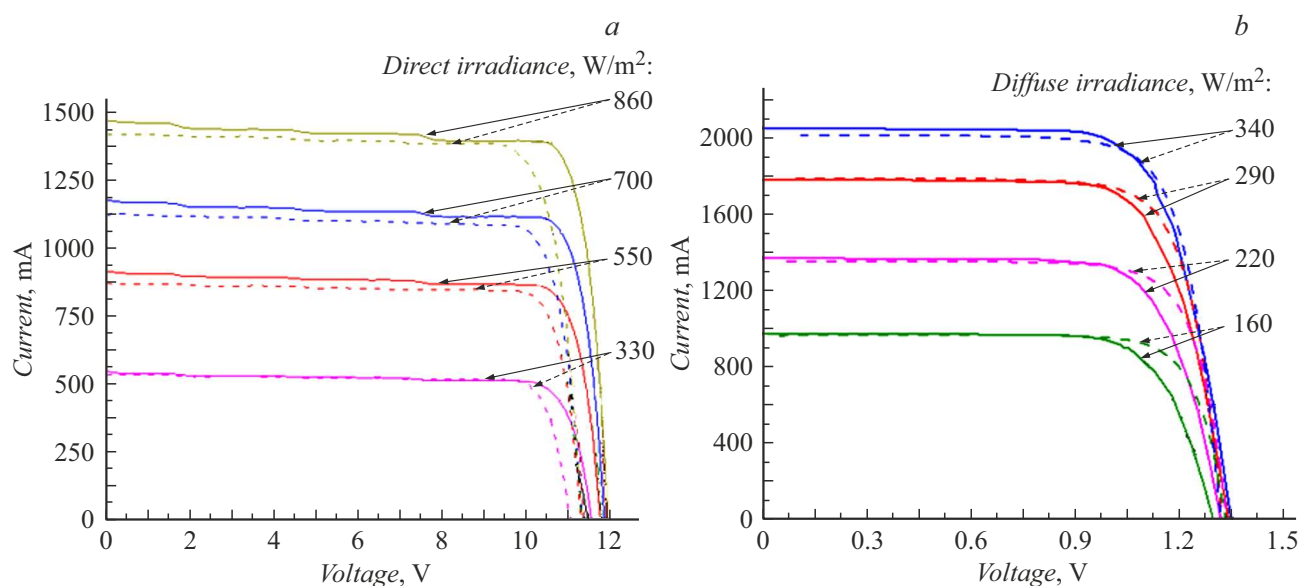


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики, полученные в натуральных (пунктир) и лабораторных (сплошные линии) условиях при разном уровне освещенности для концентраторного (*a*) и планарного (*b*) контуров гибридного модуля.

Финансирование работы

Представленные результаты получены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ как результат выполнения соглашения № 075-15-2022-1207 от 22 сентября 2022 г.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] J.F. Martínez, M. Steiner, M. Wiesenfarth, F. Dimroth, AIP Conf. Proc., **2012**, 090005 (2018). DOI: 10.1063/1.5053543
- [2] М.З. Шварц, А.В. Андреева, Д.А. Андроников, К.В. Емцев, В.Р. Ларионов, М.В. Нахимович, П.В. Покровский, Н.А. Садчиков, С.А. Яковлев, Д.А. Малевский, Письма в ЖТФ, **49** (4), 15 (2023). DOI: 10.21883/PJTF.2023.04.54520.19438 [M.Z. Shvarts, A.V. Andreeva, D.A. Andronikov, K.V. Emtsev, V.R. Larionov, M.V. Nakhimovich, P.V. Pokrovskiy, N.A. Sadchikov, S.A. Yakovlev, D.A. Malevskiy, Tech. Phys. Lett., **49** (2), 50 (2023). DOI: 10.21883/TPL.2023.02.55371.19438].

- [3] J.F. Martínez, M. Steiner, M. Wiesenfarth, T. Fellmeth, T. Dörsam, M. Wiese, S.W. Glunz, F. Dimroth, *Prog. Photovolt.: Res. Appl.*, **28** (5), 349 (2020). DOI: 10.1002/pip.3239
- [4] Н.А. Паханов, В.М. Андреев, М.З. Шварц, О.П. Пчеляков, *Автометрия*, **54** (2), 93 (2018). DOI: 10.15372/AUT20180211 [N.A. Pakhanov, V.M. Andreev, M.Z. Shvarts, O.P. Pchelyakov, *Optoelectron. Instrum. Data Process.*, **54** (2), 187 (2018). DOI: 10.3103/S8756699018020115].
- [5] M.A. Green, E.D. Dunlop, G. Siefer, M. Yoshita, N. Kopidakis, K. Bothe, X. Hao, *Prog. Photovolt.: Res. Appl.*, **31** (1), 3 (2023). DOI: 10.1002/pip.3646
- [6] J.F. Martínez, M. Steiner, M. Wiesenfarth, G. Siefer, F. Dimroth, *AIP Conf. Proc.*, **2550**, 060003 (2022). DOI: 10.1063/5.0099267
- [7] J.F. Martínez, M. Steiner, M. Wiesenfarth, G. Siefer, S.W. Glunz, F. Dimroth, *Prog. Photovolt.: Res. Appl.*, **29** (6), 614 (2021). DOI: 10.1002/pip.3410
- [8] M.Z. Shvarts, V.M. Emelyanov, M.V. Nakhimovich, A.A. Soluyanov, V.M. Andreev, *AIP Conf. Proc.*, **2149**, 070011 (2019). DOI: 10.1063/1.5124210
- [9] M. O'Neill, A.J. McDanal, G. Landis, R. Pricone, C. Kumar, M. Puglia, in *2019 IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conf (PVSC)* (IEEE, 2019), p. 1510–1516. DOI: 10.1109/PVSC40753.2019.8980908