

## 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

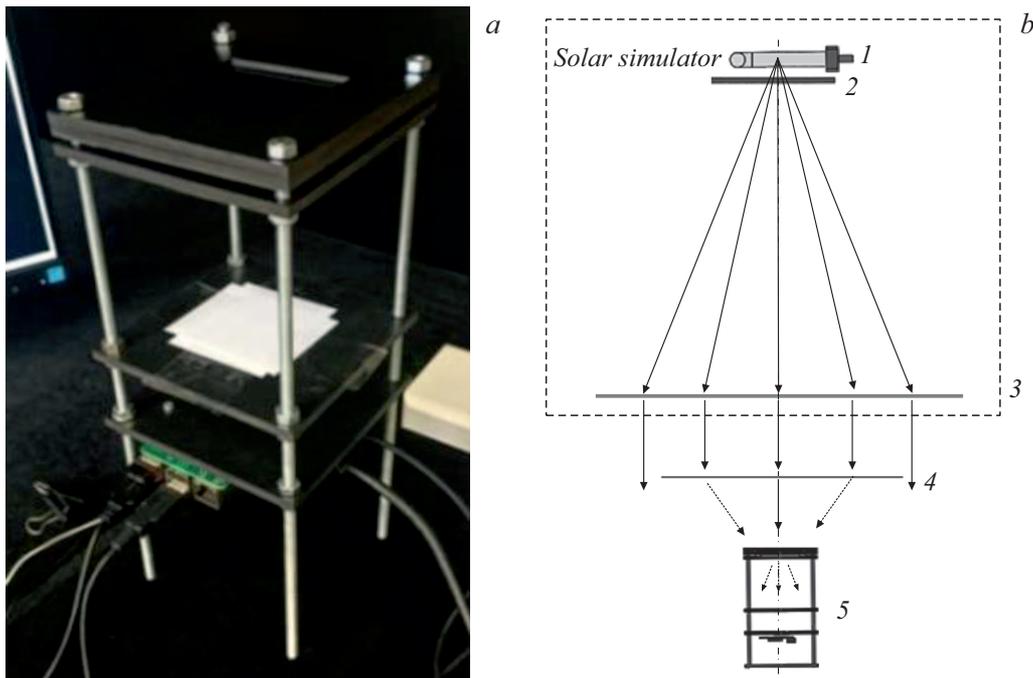
равно может быть недостаточно, что служит толчком для разработки новых методик измерения, требующих соответствующего оборудования.

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 (а) и оптическая схема (b). 1 — источник излучения (ксеноновая 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  $6 \times 6$  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 концентратора 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 (профилированием) 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.

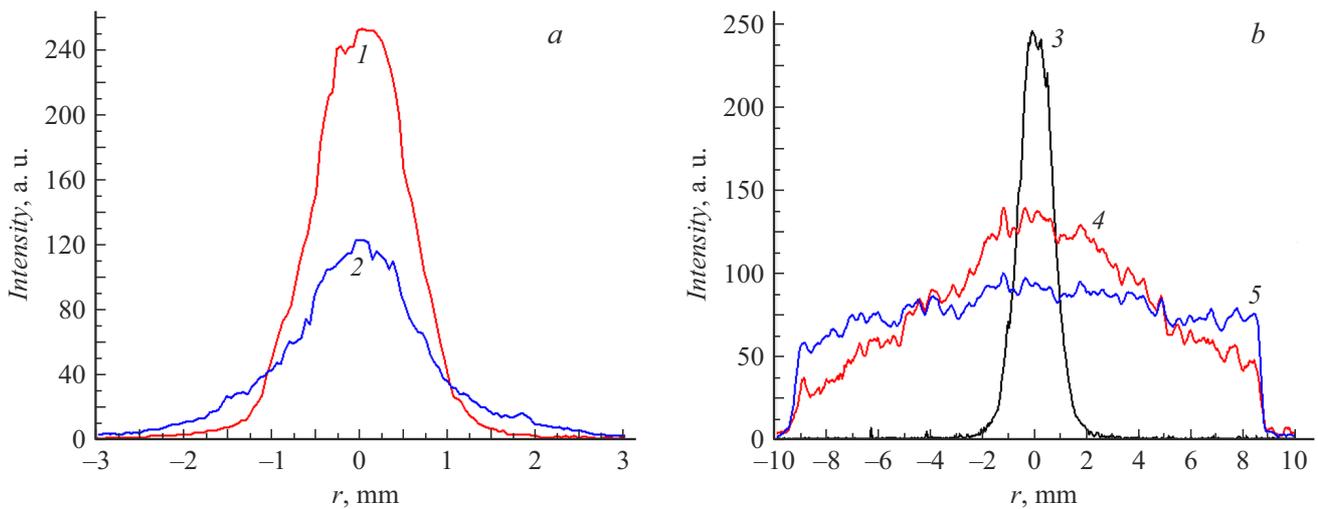
Проведенные в натуральных условиях испытания показали, что существует связь между распределением интенсивности светового пятна и показаниями датчиков (пиранометра и актинометра). При минимальной доле рассеянного излучения наблюдается яркое пятно в фокальной плоскости линзы устройства. Последующее перераспределение 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.

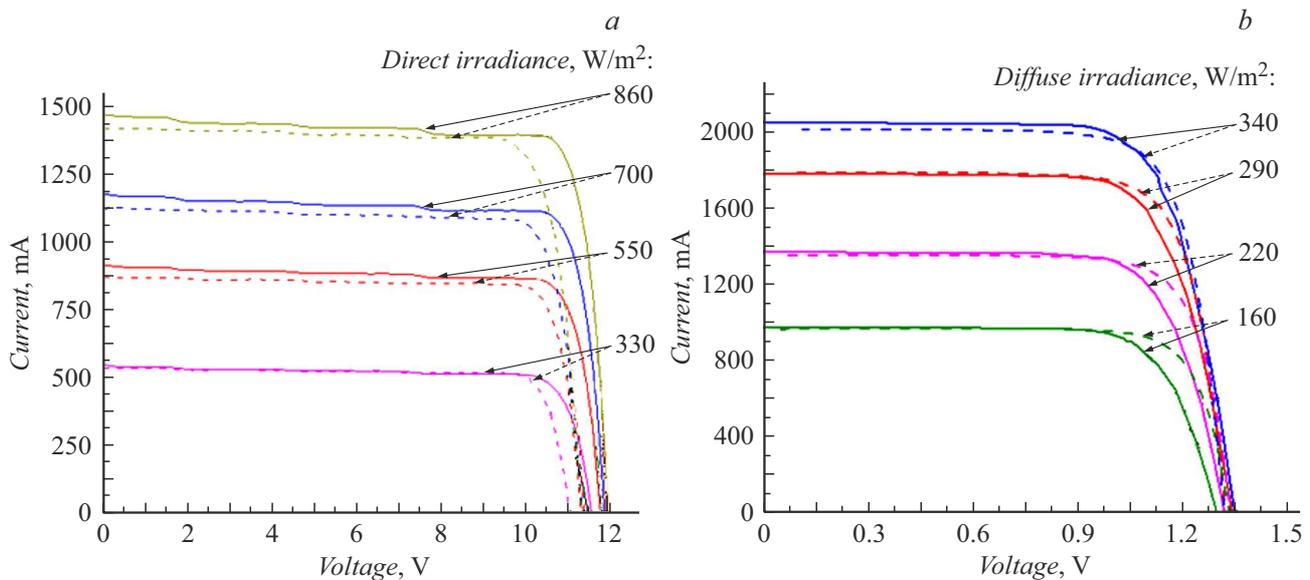
Распределение интенсивностей, регистрируемых оптоэлектронным устройством в натуральных (рис. 2, a) и лабораторных (рис. 2, b) условиях, имеет схожий характер при увеличении доли диффузного излучения в общем световом потоке: распределение, регистрируемое камерой, становится более равномерным.

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