

Исследование характеристик гибридных фотоэлектрических модулей в условиях локальной неравномерности облученности и частичного затенения

© В.М. Емельянов, С.А. Левина, М.В. Нахимович, М.З. Шварц

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

E-mail: vm.emelyanov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 12 мая 2023 г.

В окончательной редакции 26 июля 2023 г.

Принято к публикации 30 октября 2023 г.

Исследовано влияние затенения и локальной повышенной облученности планарного контура на основе *c*-Si солнечных элементов (СЭ) в составе гибридного фотоэлектрического модуля. Установлено, что величина и ориентация тени на поверхности *c*-Si СЭ приводят к изменению его КПД в пределах одного абсолютного процента, что объясняется изменением баланса резистивных потерь. Наличие областей высокой облученности на поверхности *c*-Si СЭ диаметром до 5 mm (соответствует размеру концентраторного A^3B^5 СЭ) не оказывает заметного влияния на выработку планарного контура, которая остается близкой к значениям, характерным для преобразования только диффузного излучения.

Ключевые слова: гибридный концентраторно-планарный фотоэлектрический модуль, многопереходный солнечный элемент, планарный фотопреобразователь, диффузно рассеянное излучение, затенение.

DOI: 10.61011/PJTF.2023.23.56850.108A

Гибридные фотоэлектрические модули (ГФМ), построенные на основе многопереходных гетероструктурных A^3B^5 солнечных элементов (СЭ), оптических концентраторов, а также кремниевых фотопреобразователей, являются эффективными источниками энергии в условиях как ясной, так и пасмурной погоды. Такие модули обеспечивают преобразование прямого солнечного излучения концентраторными фотоэлектрическими ячейками и диффузного (рассеянного) излучения планарными СЭ [1–3].

Актуальной задачей при создании фотоэнергетических установок с ГФМ является обеспечение устойчивости планарных *c*-Si СЭ к локальной неравномерности облученности (энергетической освещенности), например затенению их поверхности [4–6]. При этом значимыми оказываются и эффекты, связанные с появлением точек сверхвысокой облученности (световых бликов) на поверхности планарного СЭ в ГФМ.

Появление пятна сверхвысокой облученности на поверхности СЭ планарного контура может являться следствием повреждения оптического концентратора, отражения солнечного излучения от посторонних предметов с зеркальной поверхностью, медленной реакции или выхода из строя системы слежения, что приводит к смещению фокальной точки на поверхность планарного СЭ.

Исследование влияния этих эффектов на электрическую мощность ГФМ является целью настоящей работы.

Конструкция исследованного гибридного модуля (рис. 1, *a*) в целом соответствовала представленной в работе [3]. Она включала четыре оптических концентратора типа „линза Френеля“ размером 40×40 mm каждый, фокусирующих излучение на четырех малоразмерных GaInP/Ga(In)As/Ge СЭ, а также *c*-Si СЭ с пассивиро-

ванным эмиттером и двусторонней чувствительностью (passivated emitter and rear contact, PERC). Исследованный планарный СЭ имел размер 80×79 mm (рис. 1, *b*) и являлся одной четвертой частью модуля TSSB9 [7]. Оптические концентраторы вместе с GaInP/Ga(In)As/Ge СЭ формировали концентраторный контур модуля, а *c*-Si СЭ — планарный. Среднее пропускание линз Френеля составляло 90% в рабочем диапазоне СЭ, суммарное затенение поверхности *c*-Si СЭ компонентами концентраторного контура (СЭ, токопроводящими шинами и радиаторами) составляло 12%.

Для исследованного *c*-Si СЭ были выполнены измерения спектральных и вольт-амперных характеристик (ВАХ) в диапазоне кратностей концентрирования (0.1–1.4)X. В области кратностей концентрирования до 0.5X экспериментальные ВАХ хорошо описывались моделью с сосредоточенными параметрами. В диапазоне кратностей концентрирования (1.0–1.4)X становились значимыми нелинейные потери на последовательном сопротивлении, корректный учет которых требовал применения распределенной эквивалентной схемы [8,9].

По экспериментальным нагрузочным ВАХ были определены параметры *p*–*n*-перехода и последовательное сопротивление *c*-Si СЭ, которые приведены в таблице.

Экспериментальное исследование влияния частичного затенения *c*-Si СЭ на его КПД проводилось на имитаторе постоянного горения SS80AA Yamashita Denso (AM1.5G). СЭ облучался с лицевой стороны потоком от 100 W/m^2 (0.1X) до 1400 W/m^2 (1.4X). Затенение рабочей поверхности *c*-Si СЭ моделировалось путем наложения непрозрачных экранов прямоугольной формы непосредственно на поверхность СЭ в двух ориентациях — параллельно или перпендикулярно токосбор-

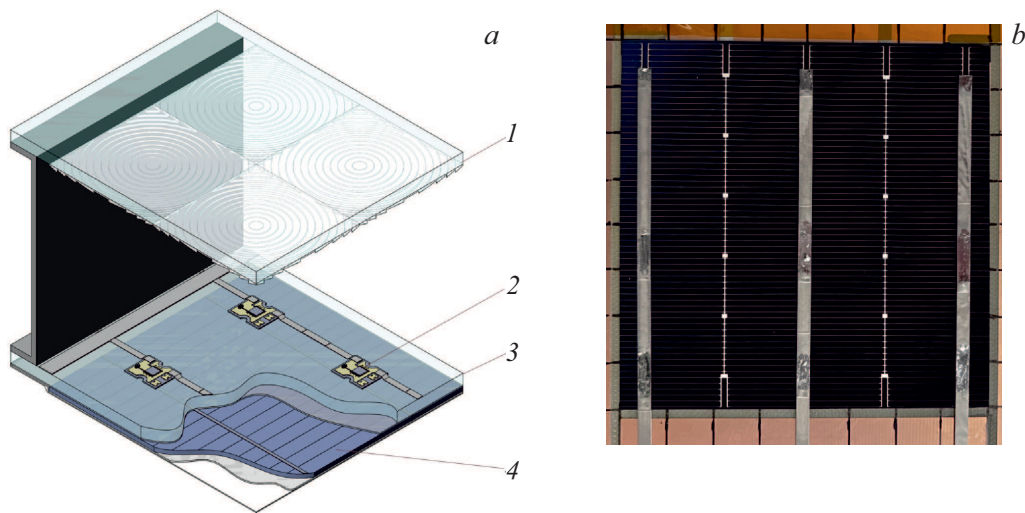


Рис. 1. Схема исследованного ГФМ (а) и изображение *c*-Si СЭ из его состава (b). 1 — линзы Френеля (силикон) на стеклянном основании, 2 — концентраторный GaInP/Ga(In)As/Ge СЭ, 3 — стеклянное основание, 4 — *c*-Si СЭ.

Параметры исследованного *c*-Si СЭ

Параметр	Значение
Плотность фототока при облучении с лицевой стороны (AM1.5G, 1000 W/m ²), mA/cm ²	40.83
Плотность фототока при облучении с тыльной стороны (AM1.5G, 1000 W/m ²), mA/cm ²	30.77
Плотность инжекционного тока, A/cm ²	$1.5 \cdot 10^{-13}$
Плотность рекомбинационного тока, A/cm ²	$6.5 \cdot 10^{-9}$
Удельное последовательное сопротивление, $\Omega \cdot \text{cm}^2$	2.05
КПД при облучении с лицевой стороны (AM1.5G, 1000 W/m ²), %	20.64
КПД при облучении с лицевой стороны (AM1.5G, 100 W/m ²), %	19.59

ным шинам контактной сетки — с последовательным увеличением доли затененной поверхности (рис. 2, а). Установлено, что при облученности в 100 W/m² (моделирование режима поступления диффузного излучения) затенение приводит к снижению КПД в пределах одного абсолютного процента вследствие уменьшения общей световой мощности на СЭ, ухудшения термодинамического режима преобразования и снижения рабочего напряжения. В то же время при 1000 W/m² (полный поток наземного солнечного излучения) ход зависимости КПД оказывается различным и определяется ориентацией тени.

При затенении СЭ параллельно токосборным шинам наблюдается незначительный рост КПД вследствие „разгрузки“ контактной сетки и уменьшения тока прямого смещения (инжекционного и рекомбинационного) через *p*–*n*-переход при том же напряжении: при протекании тока в затененной области напряжение на *p*–*n*-переходе оказывается ниже (по сравнению с облученной областью) на удвоенную величину его падения в контактной

сетке. В свою очередь при наложении тени перпендикулярно токосборным шинам протекание тока прямого смещения идентично режиму полностью облученного СЭ, а напряжение на *p*–*n*-переходе в затененной области СЭ незначительно отличается от такового в облученной части. Если тень накладывается с края (затенение СЭ ~ 12–25%), то наблюдается небольшое снижение КПД. В этом режиме заметной разгрузки токосборных шин не происходит, и через затененную область протекает значительный фототок, часть которого отбирается током прямого смещения через *p*–*n*-переход.

Расчеты удельной вырабатываемой мощности ГФМ были выполнены для контуров на основе планарного *c*-Si СЭ (см. таблицу) и концентраторных GaInP/Ga(In)As/Ge СЭ. КПД концентраторного контура составлял 29% при 900 W/m².

Результаты моделирования представлены на рис. 2, b. При расчетах интегральная мощность диффузного излучения принималась равной 100 W/m², фототок *c*-Si СЭ

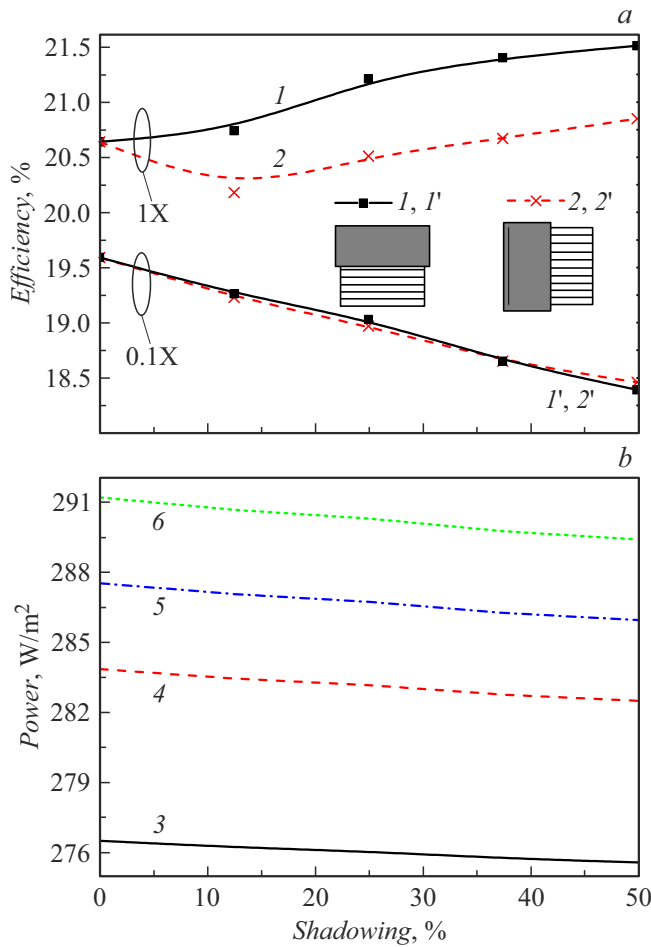


Рис. 2. КПД *c*-Si СЭ (а) и удельная мощность ГФМ (б) в зависимости от коэффициента затенения. 1, 1' — затенение параллельно токосборным шинам *c*-Si СЭ, 2, 2' — затенение перпендикулярно токосборным шинам, 3 — *c*-Si СЭ с односторонней чувствительностью, 4–6 — *c*-Si СЭ с двусторонней чувствительностью при значениях эффективного коэффициента затенения тыльной поверхности $\eta = 0.5$ (4), 0.25 (5) и 0 (6).

вычислялся с помощью формулы

$$J_{ph} = \frac{e(1 - \xi)}{hc} \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \lambda Q_e^f(\lambda) \Gamma(\lambda) d\lambda + \frac{e(1 - \eta)}{hc} \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \lambda Q_e^b(\lambda) \Gamma(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

где $Q_e^f(\lambda)$, $Q_e^b(\lambda)$ — внешний квантовый выход фотоответа при падении света с лицевой и тыльной поверхностей, $\Gamma(\lambda)$ — спектральная плотность облученности диффузного излучения, λ_{min} – λ_{max} — диапазон чувствительности *c*-Si СЭ, ξ — коэффициент затенения лицевой поверхности, $\eta = 1 - (1 - \gamma)A$ — эффективный коэффициент затенения тыльной поверхности, γ — геометрический коэффициент затенения, A — альbedo подстилающей

поверхности, e — заряд электрона, h — постоянная Планка, c — скорость света.

Для исследования влияния бликов на эффективность преобразования солнечного излучения планарным контуром ГФМ была промоделирована удельная мощность планарного контура с односторонней и двусторонней чувствительностью в зависимости от диаметра пятна высокой облученности (рис. 3).

Излучение, прошедшее через блок 2 × 2 линзовых концентраторов, формировало на поверхности исследованных *c*-Si СЭ четыре пятна, интегральная мощность в

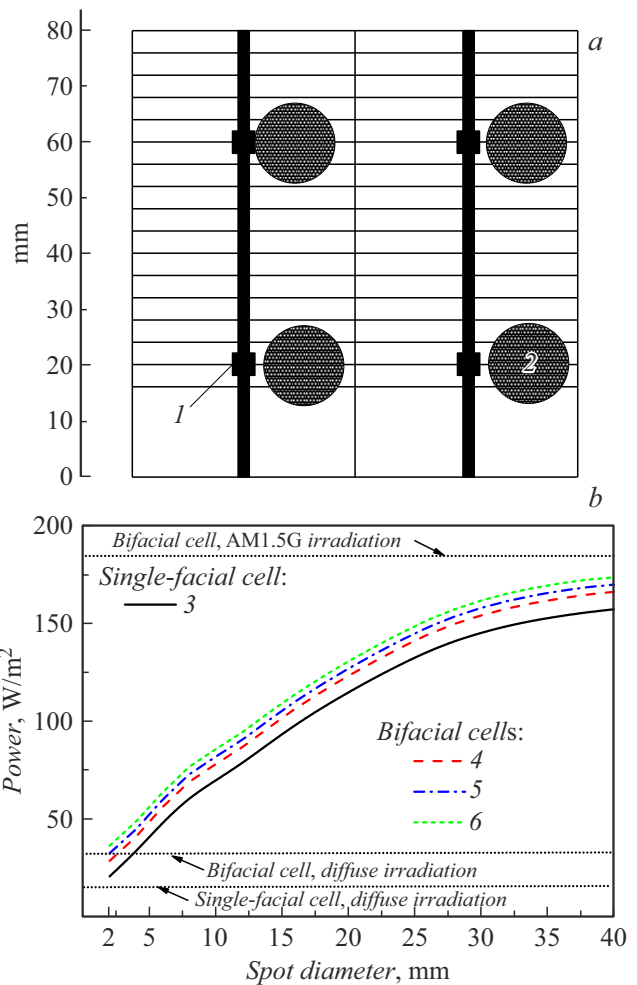


Рис. 3. а — схема появления пятен высокой облученности на поверхности *c*-Si. 1 — положение GaInP/Ga(In)As/Ge СЭ, 2 — пятно высокой облученности. б — зависимость мощности, вырабатываемой планарным контуром ГФМ, от размера бликового пятна. 3 — мощность *c*-Si СЭ с односторонней чувствительностью; 4–6 — мощность *c*-Si СЭ с двусторонней чувствительностью при эффективном коэффициенте затенения тыльной поверхности $\eta = 0.5$ (4), 0.25 (5) и 0 (6). Пунктирными линиями показана выходная мощность планарного контура при преобразовании потоков полного излучения 1000 W/m² (верхняя линия, ~ 185 W/m²) и диффузного излучения 100 W/m² (две нижние линии, ~ 30 и ~ 15 W/m²) с учетом потерь в оптическом концентраторе и потерь на затенение в ГФМ.

которых суммарно составляла 5.2 W при плотности мощности падающего на ГФМ прямого излучения 900 W/m² (рис. 3). При малых размерах пятен вырабатываемая планарным контуром мощность несущественно отличается от аналогичных показателей при преобразовании только диффузного излучения. Увеличение размера пятна приближает выработку к значению, соответствующему преобразованию полного потока излучения 1000 W/m² (AM1.5G). Поскольку рисунок контактной сетки c-Si СЭ не оптимизирован для преобразования концентрированного солнечного излучения, при малых размерах бликовой области наблюдается существенное снижение КПД планарного контура вследствие роста омических потерь в пределах пятна высокой облученности.

Дополнительной причиной снижения эффективности при появлении светового пятна на поверхности СЭ может являться рост температуры СЭ в области высокой облученности. Однако для рассматриваемых c-Si СЭ возникновения значительного градиента температуры и, как следствие, его влияния на КПД установлено не было при всех исследованных параметрах пятна. При температуре окружающей среды 25°C и естественном конвективном охлаждении ГФМ температура во всех точках поверхности c-Si СЭ находилась в пределах 60–70°C во всех режимах. Смещение пятна высокой облученности по поверхности c-Si СЭ также не оказывало влияния на электрическую мощность. Это объясняется тем, что при росте локальной световой нагрузки омические потери быстрее возрастали в слоях полупроводника СЭ, чем в токопроводящих шинах.

Таким образом, при преобразовании диффузного излучения появление затенения планарного контура приводит к снижению выработки по закону, чуть более сильному, чем линейный, вследствие как уменьшения преобразуемого светового потока, так и незначительного снижения КПД c-Si СЭ. Возникновение областей повышенной облученности на поверхности c-Si СЭ не ухудшает характеристик планарного контура ГФМ, но и не дает значимого положительного вклада в его энерговыработку. Увеличение размера пятна высокой облученности до 30 mm приближает выработку планарного контура ГФМ к выработке отдельно стоящего c-Si СЭ в тех же условиях.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00158 (<https://rscf.ru/project/22-19-00158/>).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] *High-efficient low-cost photovoltaics*, ed. by V. Petrova-Koch, R. Hezel, A. Goetzberger. Springer Ser. in Optical Sciences (Springer, Cham, 2020), vol. 140. DOI: 10.1007/978-3-030-22864-4
- [2] 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
- [3] 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].
- [4] J.P.N. Torres, S.K. Nashih, C.A.F. Fernandes, J.C. Leite, *Energy Syst.*, **9** (1), 195 (2018). DOI: 10.1007/s12667-016-0225-5
- [5] S. Wendlandt, A. Drobisch, D. Tornow, M. Friedrichs, S. Krauter, P. Grunow, in *Proc. ISES Solar World Congress 2011* (Kassel, Germany, 2011), p. 120. DOI: 10.18086/swc.2011.14.18
- [6] A. Atia, F. Anayi, M. Gao, *Energies*, **15** (23), 9067 (2022). DOI: 10.3390/en15239067
- [7] *TSEC TSSB9 c-Si solar cell datasheet*. https://www.tsecpv.com/upload/website/battery/download/M69BB_B9.pdf
- [8] В.М. Емельянов, С.А. Минтаиров, С.В. Сорокина, В.П. Хвостиков, М.З. Шварц, ФТП, **50** (1), 125 (2016). [V.M. Emelyanov, S.A. Mintairov, S.V. Sorokina, V.P. Khvostikov, M.Z. Shvarts, *Semiconductors*, **50** (1), 125 (2016). DOI: 10.1134/S1063782616010085].
- [9] V.M. Emelyanov, N.A. Kalyuzhnyy, M.A. Mintairov, S.A. Mintairov, M.A. Shvarts, V.M. Lantratov, in *Proc. of the 25th European Photovoltaic Solar Energy Conf. and Exhibition (EPSEC)* (Valencia, Spain, 2010), p. 1DV.2.33. DOI: 10.4229/25THEUPVSEC2010-1DV.2.33