

## Гибридные солнечные модули: сравнение результатов лабораторных и натуральных исследований

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

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: dmalevsky@scell.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 19 мая 2023 г.

В окончательной редакции 27 июля 2023 г.

Принято к публикации 30 октября 2023 г.

Проведено исследование режимов работы гибридного солнечного модуля на основе гетероструктурных  $A_3B_5$  и Si-HJT солнечных элементов. Оценено увеличение энергосыработки концентраторного модуля за счет планарного контура в условиях изменяющегося баланса прямого и общего солнечного излучения. Определено увеличение энергосыработки планарным контуром в режиме односторонней и двухсторонней фоточувствительности: фиксировался рост фототока контура более чем в 2 раза. Получена (с учетом температурной корректировки) сходимости результатов лабораторных измерений фотоэлектрических характеристик контуров солнечного модуля с данными натуральных исследований при сопоставимых освещенностях.

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

DOI: 10.61011/PJTF.2023.23.56854.152A

Существенный прогресс в развитии концептуальных решений для гибридных (концентраторно-планарных) солнечных модулей [1] определяется не только необходимостью повышения общей энергоотдачи фотоэлектрических установок с высокоэффективными концентраторными модулями и системами слежения, но и снижением амплитуды колебаний энергосыработки при смешанном („прямое+диффузное“) характере поступающего излучения или преобладании в нем только диффузной компоненты.

Характерной особенностью гибридных солнечных модулей (ГСМ) является наличие двух электрически независимых друг от друга, но оптически связанных контуров — концентраторного и планарного, построенных соответственно на основе высокоэффективных гетероструктурных  $A_3B_5$ -фотопреобразователей [2] и Si-фотопреобразователей, таких как *c*-Si, HJT (heterojunction technology), PERC (passivated emitter rear cell), IBC (interdigitated back contact) [3]. Для оценки общего энергетического эффекта (рост суммарной энергосыработки ГСМ относительно аналогичных показателей для его составляющих — концентраторного и планарного контуров) характеристики исследовались независимо.

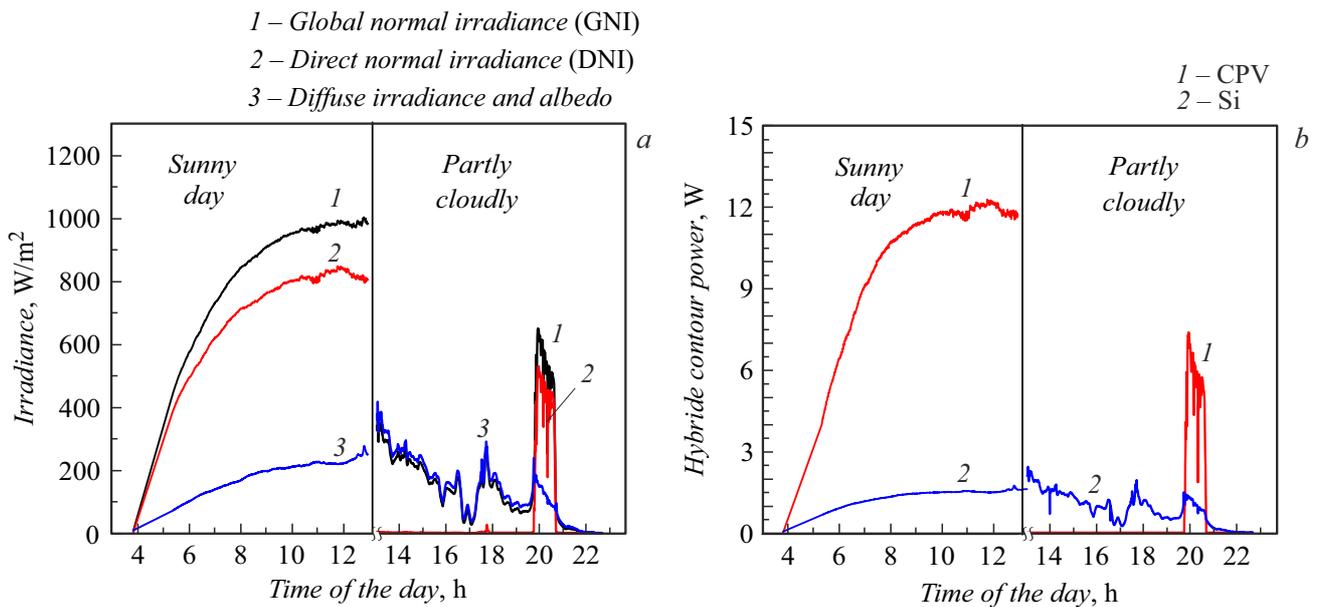
В работе представлены результаты лабораторных и натуральных исследований ГСМ, включающего две фотоэлектрические ячейки на базе Si-HJT-структур с двухсторонней чувствительностью (планарный контур) и 32 концентраторные ячейки ( $40 \times 40$  mm каждая), объединенных в формате  $4 \times 8$  [4].

В натуральных условиях эффективность работы контуров ГСМ оценивалась при продолжительном мониторинге в составе солнечной фотоэнергоустановки с системой слежения [5]. Технические средства системы монито-

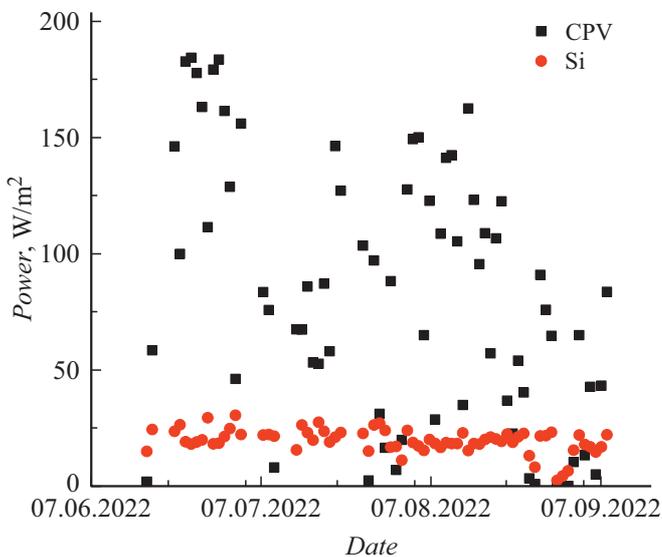
ринга обеспечивали измерение уровня солнечной радиации (общей, прямой, диффузной, альbedo), температур окружающего воздуха и фотоэлектрических преобразователей. Обеспечивалась долговременная работа ГСМ в режиме отбора максимальной мощности (электрическое „охлаждение“) при регулярном измерении вольт-амперных характеристик, что повышало точность получаемых оценок для фотоэлектрических параметров и энергопроизводительности. Одновременно контролировалась точность наведения системы в направлении „на Солнце“ [6]. Получены данные по эффективности работы контуров модуля: для концентраторного — относительно прямой компоненты солнечного излучения, для планарного — относительно диффузной и альbedo. Рассмотрены режимы работы гибридного модуля при чистом небе и при различной переменной облачности (рис. 1), а также в условиях дымки и при полной облачности.

При чистом небе добавка по выработке электроэнергии планарным контуром (КПД 16%, AM1.5G,  $100\text{--}200$  W/m<sup>2</sup>, энергосыработка  $32$  W/m<sup>2</sup>) составила порядка 5–10% относительно энергосыработки концентраторного (КПД 32%, AM1.5D,  $800\text{--}1000$  W/m<sup>2</sup>, энергосыработка  $250\text{--}320$  W/m<sup>2</sup>), а при переменной облачности при доле диффузного излучения более 60% (КПД 18%, AM1.5G,  $200\text{--}400$  W/m<sup>2</sup>, энергосыработка  $36\text{--}72$  W/m<sup>2</sup>) добавка оказывалась сравнимой или превышала энергосыработку концентраторного контура. Получены оценки по увеличению энергосыработки планарным контуром в режиме односторонней и двухсторонней фоточувствительности: фиксировался рост фототока контура более чем в 2 раза.

В течение сезона 2022 г. (с 17 июня по 7 сентября) на площадке в Санкт-Петербурге проводился монито-



**Рис. 1.** Результаты мониторинга энерговыработки ГСМ. Поступление солнечного излучения на следящую поверхность (а) и мгновенные значения электрических мощностей, генерируемых концентраторным (CPV) и планарным (Si) контурами (b), в характерные дни: ясный день (левые части рисунков), переменная облачность (правые части рисунков).

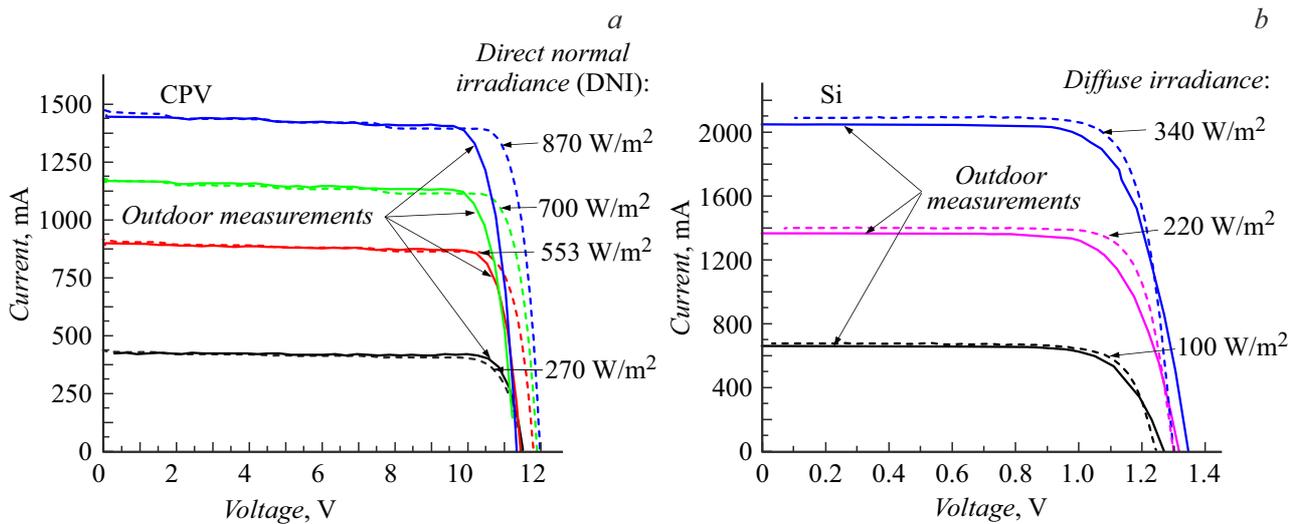


**Рис. 2.** Результаты мониторинга энерговыработки ГСМ: абсолютные значения мощностей, генерируемых концентраторным и планарным контурами в течение дня.

ринг суммарной энерговыработки отдельных каскадов (рис. 2). По результатам измерений необходимо отметить, что генерируемая концентраторным контуром мощность сильно (резко) изменяется в зависимости от приходящего прямого излучения, в то время как для планарного контура такие скачки несвойственны,

так как уровень диффузной составляющей солнечного излучения меняется более плавно.

В лабораторных условиях значительное внимание уделялось моделированию параметров солнечного излучения для его последующего преобразования фотоэлектрическими контурами ГСМ. При воспроизведении параметров прямого солнечного излучения ( $1000 \text{ W/m}^2$ , AM1.5D, угловая расходимость  $32 \text{ arcmin}$ ) использовался имитатор [7], функционал которого был доработан в соответствии с особенностями двухконтурной конструкции объекта исследований. Для моделирования диффузной компоненты подбирались экраны с различными рассеивающими свойствами и уровнями прозрачности, которые вводились в световой поток. В соответствии с полученными в натуральных условиях данными проведено моделирование облученности для контуров ГСМ. Концентраторный контур испытывался при засветке коллимированным потоком  $500\text{--}1000 \text{ W/m}^2$  (AM1.5D). В режиме долгосрочных испытаний проведена оценка температурных коэффициентов напряжения холостого хода, составивших для концентраторного контура  $0.15\%/^{\circ}\text{C}$  против  $0.29\%/^{\circ}\text{C}$  для планарного. Получена (с учетом температурной корректировки) хорошая сходимость результатов измерений концентраторного контура (рис. 3, а) с данными натуральных исследований при сопоставимых освещенностях. Для планарного контура соответствие наблюдалось в варианте „односторонняя фоточувствительность“ (рис. 3, б).



**Рис. 3.** Результаты регистрации вольт-амперных характеристик концентраторного (а) и планарного (б) контуров в натуральных условиях и на доработанном имитаторе солнечного излучения при сопоставимых освещенностях. Концентраторный контур засвечивается прямым излучением (DNI), планарный — диффузным (в режиме односторонней фоточувствительности).

Моделирование условий работы планарного контура для режима облученности „диффузное излучение+альbedo“ требует дальнейшего развития экспериментальной методики и лабораторного инструментария.

Исследованы режимы работы гибридного концентраторно-планарного модуля при чистом небе и при различной переменной облачности. Проведена оценка дополнительно выработанной электроэнергии планарным контуром при различных погодных условиях. Показано, что в условиях переменной облачности эта добавка сравнима или превышает выработку концентраторного контура. Измерены вольт-амперные характеристики концентраторного и планарного контуров в натуральных условиях и на доработанном имитаторе солнечного излучения при сопоставимых освещенностях, получена сходимость результатов.

#### 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] K.-T. Lee, Y. Yao, J. He, B. Fisher, X. Sheng, M. Lumb, L. Xu, M.A. Anderson, D. Scheiman, S. Han, Y. Kang, A. Gumus, R.R. Bahabry, J.W. Lee, U. Paik, N.D. Bronstein, A.P. Alivisatos, M. Meitl, S. Burroughs, M.M. Hussain, J.C. Lee, R.G. Nuzzo, J.A. Rogers, *PNAS*, **113** (51), E8210 (2016). DOI: 10.1073/pnas.1617391113
- [2] Zh.I. Alferov, V.M. Andreev, M.Z. Shvarts, in *High-efficient low-cost photovoltaics*, ed. by V. Petrova-Koch, R. Hezel, A. Goetzberger. Springer Ser. in Optical Sciences (Springer, Cham, 2020), vol. 140, p. 133–174. DOI: 10.1007/978-3-030-22864-4\_8
- [3] A.S. Abramov, D.A. Andronikov, S.N. Abolmasov, E.I. Terukov, in *High-efficient low-cost photovoltaics*, ed. by V. Petrova-Koch, R. Hezel, A. Goetzberger. Springer Ser. in Optical Sciences (Springer, Cham, 2020), vol. 140, p. 113–132. DOI: 10.1007/978-3-030-22864-4\_7
- [4] 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].
- [5] M. Shvarts, V. Larionov, P. Pokrovskiy, N. Sadchikov, D. Malevskiy, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, **578**, 012054 (2020). DOI: 10.1088/1755-1315/578/1/012054
- [6] Д.А. Малевский, П.В. Покровский, В.Р. Ларионов, А.В. Малевская, В.М. Андреев, *Письма в ЖТФ*, **46** (11), 11 (2023). DOI: 10.21883/PJTF.2020.11.49490.18273 [D.A. Malevskiy, P.V. Pokrovskiy, V.R. Larionov, A.V. Malevskaya, V.M. Andreev, *Tech. Phys. Lett.*, **46** (6), 523 (2020). DOI: 10.1134/S1063785020060073].
- [7] В.Р. Ларионов, Д.А. Малевский, П.В. Покровский, В.Д. Румянцев, *ЖТФ*, **85** (6), 104 (2015). [V.R. Larionov, D.A. Malevskii, P.V. Pokrovskii, V.D. Rumyantsev, *Tech. Phys.*, **60** (6), 891 (2015). DOI: 10.1134/S1063784215060158].