

07.2;09.2

## Высокоэффективные фотоэлектрические модули с концентраторами солнечного излучения

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

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

Поступило в Редакцию 27 марта 2020 г.

В окончательной редакции 27 марта 2020 г.

Принято к публикации 1 апреля 2020 г.

Разработаны и изготовлены высокоэффективные концентраторные фотоэлектрические модули, включающие линзовую панель на основе 32 линз Френеля ( $12 \times 12$  см каждая); 32 каскадных солнечных элемента с вторичными концентраторами в виде фоконов; теплоотводящие электроизолирующие платы на основе аллюмооксидной керамики, размещенные на тыльном алюминиевом основании. При измерении модуля площадью  $0.46 \text{ m}^2$  под импульсным имитатором солнечного излучения (AM1.5D,  $1000 \text{ W/m}^2$ ) получено значение КПД, равное 32.3%. В submodule площадью  $144 \text{ cm}^2$  получен КПД 33.9%.

**Ключевые слова:** концентраторный фотоэлектрический модуль, линза Френеля, каскадный солнечный элемент, фокон.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.13.49586.18314

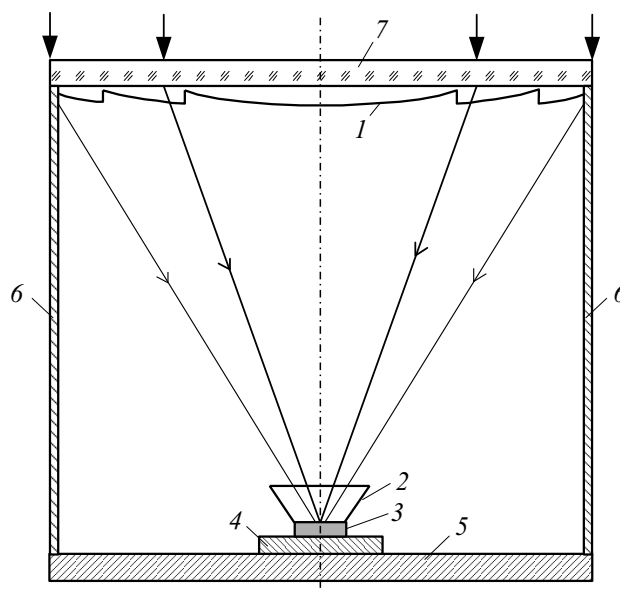
Перспективы широкого применения концентраторных фотоэлектрических модулей (КФЭМ) в наземной солнечной энергетике определяются высокой эффективностью, снижением более чем в 500 раз площади и стоимости солнечных элементов пропорционально кратности концентрирования солнечного излучения и увеличением удельного (на единицу площади КФЭМ) энергопотребления благодаря высокому КПД, высокой температурной стабильности КПД и использованию систем слежения за Солнцем [1–4]. Каскадные солнечные элементы (КСЭ) имеют максимальные значения КПД  $> 40\%$  при кратности концентрирования солнечного излучения более 500 „солнц“, а фотоэлектрические модули на основе этих КСЭ и концентраторов солнечного излучения обеспечивают значения КПД более 30% в наземных условиях солнечного облучения (AM1.5D).

Увеличение оптической эффективности концентраторов солнечного излучения достигается при осуществлении двухстадийного концентрирования. В качестве первичных концентраторов наибольшее распространение получили линзы Френеля, изготавливаемые по технологии „силикон на стекле“ [1–5], согласно которой френелевский профиль создается в тонком слое (менее  $0.5 \text{ mm}$ ) силикона с последующей его полимеризацией на стеклянном листе. В качестве вторичных концентраторов обычно используются конические отражатели, изготовленные либо из зеркально полированного листового алюминия, либо из стекла с полированными боковыми поверхностями [6–10].

В настоящей публикации приводятся результаты разработки концентраторных фотоэлектрических модулей (с размерами фронтальной поверхности  $96 \times 48 \text{ cm}$ ),

состоящих из 32 submodule с размером фронтальной поверхности  $12 \times 12 \text{ cm}$  каждый.

Элементами submodule являются (рис. 1) первичный концентратор (линза Френеля) размером  $12 \times 12 \text{ cm}$  с фокусным расстоянием 23 см; вторичный концентратор (фокон), выполненный из листового алюминия в виде перевернутой усеченной пирамиды; каскадный солнеч-



**Рис. 1.** Конструкция концентраторного фотоэлектрического submodule. 1 — линза Френеля, 2 — фокон, 3 — каскадный солнечный элемент, 4 — теплоотводящая электроизолирующая плата, 5 — алюминиевое основание, 6 — боковые стенки submodule, 7 — стекло.

**Таблица 1.** Значения параметров двух субмодулей на основе единичных линз Френеля ( $12 \times 12$  см)

Тип модуля	$I_{sc}$ , A	$V_{oc}$ , V	$P_{MPP}$ , W	$FF$ , %	КПД, %
Без фокона	1.8785	3.0812	4.62	81.37	32.1
С фоконом	1.9045	3.0827	4.88	83.06	33.9

Примечание.  $I_{sc}$  — ток короткого замыкания,  $V_{oc}$  — напряжение холостого хода,  $P_{MPP}$  — мощность в оптимальной точке вольт-амперной характеристики,  $FF$  — фактор заполнения нагрузочной характеристики, КПД — коэффициент полезного действия.

ный элемент на основе трехпереходной гетероструктуры GaInP/GaAs/Ge с размером фоточувствительной поверхности  $5.5 \times 5.5$  мм; теплоотводящая электроизолирующая плата, выполненная на основе алюмооксидной керамики; основание модуля, выполненное из алюминиевого листа; боковые стенки, полученные экструзией алюминиевого профиля.

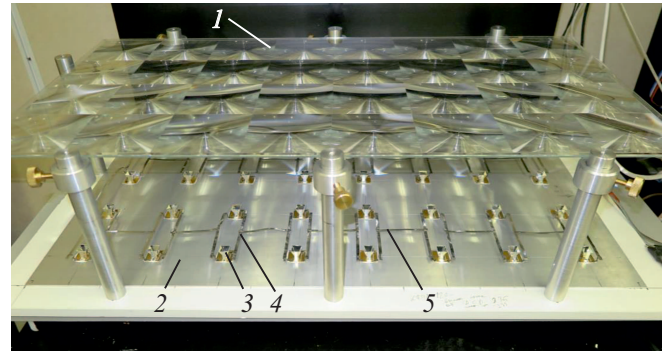
КСЭ в составе модулей имеют КПД  $42 \pm 1\%$ . При этом снижение КПД КСЭ при увеличении температуры от  $-20$  до  $+80^\circ\text{C}$  составляет  $0.05\%$  на  $1^\circ\text{C}$ .

Фоконы изготавливались из листового алюминия с внутренней зеркальной поверхностью. Размер входной апертуры фокона составлял  $16 \times 16$  мм при высоте  $15$  мм и размере выходной апертуры  $4.5 \times 4.5$  мм. Расстояние между выходной апертурой фокона и поверхностью солнечного элемента устанавливалось порядка  $0.1$  мм.

Чипы солнечных элементов припаивались в вакуумной печи на теплоотводящие электроизолирующие платы размером  $2 \times 2$  см, выполненные на основе алюмооксидной керамики толщиной  $380 \mu\text{m}$  с медным двусторонним покрытием. Общая толщина плат составляла около  $1$  мм. Платы закреплялись на основании, выполненном из листового алюминия толщиной  $3$  мм. Перегрев солнечных элементов относительно температуры Al-основания составил  $22-25^\circ\text{C}$  в рабочем режиме при освещении КФЭМ прямым солнечным излучением мощностью  $850 \text{ W/m}^2$ .

На первом этапе были разработаны субмодули на основе одной линзы Френеля. Как видно из табл. 1, получено увеличение КПД субмодуля на основе единичной линзы Френеля от  $32.1\%$  (без фокона) до  $33.9\%$  (с фоконом). Это увеличение КПД достигнуто за счет увеличения фототока ( $I_{sc}$ ) и увеличения фактора заполнения ( $FF$ ) нагрузочной вольт-амперной характеристики. Увеличение фототока обеспечено за счет улучшения сбора солнечного излучения, отражаемого стенками фокона, а увеличение  $FF$  связано с улучшением равномерности облучения солнечного элемента в модуле с фоконом.

На втором этапе были разработаны и исследованы полноразмерные концентраторные модули, включающие панели площадью  $0.46 \text{ m}^2$ , состоящие из 32 линз Френеля, расположенных вплотную, и электрогенерирующие

**Рис. 2.** Концентраторный фотоэлектрический модуль площадью  $0.46 \text{ m}^2$  на основе 32 линз Френеля и 32 каскадных солнечных элементов с фоконами. 1 — линзовая панель, 2 — основание модуля, 3 — фокон, 4, 5 — коммутирующие шины.**Таблица 2.** Значения параметров полноразмерного концентраторного модуля площадью  $0.46 \text{ m}^2$ 

$I_{sc}$ , A	$V_{oc}$ , V	$P_{MPP}$ , W	$FF$ , %	КПД, %
3.823	49.585	148.87	78.53	32.3

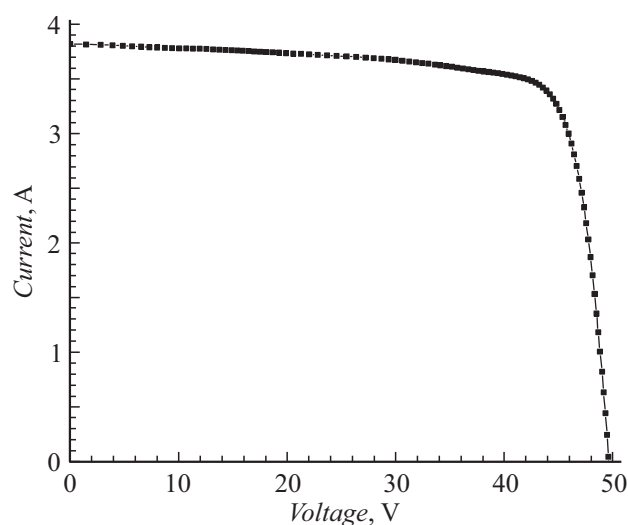
панели, состоящие из 32 каскадных солнечных элементов (с установленными на них фоконами), смонтированных через теплопроводящие электроизолирующие платы на Al-основаниях размером  $1 \times 0.5$  м. Электрическая коммутация солнечных элементов имеет параллельно-последовательную схему соединения и осуществлена с помощью луженых медных шин шириной  $5$  мм и толщиной  $0.2$  мм. Линзовая и электрогенерирующая панели соединены в модуле с помощью четырех боковых стенок шириной  $230$  мм, полученных экструзией алюминиевого профиля.

На рис. 2 приведена фотография модуля (без боковых стенок), установленного в рабочем поле импульсного имитатора солнечного излучения (со спектром AM1.5D), обеспечивающего энергетическую освещенность  $1000 \text{ W/m}^2$ . Измерения проводились в лабораторных условиях при температуре окружающей среды  $T = 24 \pm 1^\circ\text{C}$ .

На рис. 3 приведена вольт-амперная характеристика модуля, а в табл. 2 представлены результаты измерений электрических характеристик КФЭМ. В результате измерений модуля установлено, что максимальная электрическая мощность, генерируемая модулем в режиме оптимальной нагрузки, составляет  $148.9 \text{ W}$  при КПД преобразования солнечного излучения, равном  $32.3\%$ .

Были проведены испытания разработанных модулей на воздействие факторов окружающей среды: перепады давления, дождь, ветер, град и др.

Для защиты герметичных модулей от перепадов давления в стенки модулей были вставлены мембранные фильтры GORE PolyVent High Flow, обеспечивающие



**Рис. 3.** Световая вольт-амперная характеристика концентратора фотоэлектрического модуля площадью  $0.46 \text{ m}^2$ , демонстрирующая достижение КПД 32.3% (AM1.5D,  $1000 \text{ W/m}^2$ ).

выравнивание давления внутри и снаружи модуля: снижение давления внутри модуля при уменьшении температуры внутри модуля и возрастание давления при увеличении температуры. Фильтры GORE являются гидрофобными, обеспечивают свободное прохождение воздуха, но препятствуют проникновению в модуль капель воды и пыли.

Испытания модулей на воздействие механических нагрузок (ветер, снег) были проведены на установке, обеспечивающей давящую нагрузку, имитирующую воздействие ветра и снега. В результате испытаний модули продемонстрировали устойчивость до давлений более  $2400 \text{ Pa}$ , эквивалентных воздействию ветра до ураганных скоростей более  $50 \text{ m/s}$ .

Испытания на воздействие града, проведенные с использованием градострельной „пушки“, показали устойчивость модулей к ударам градин диаметром до  $30 \text{ mm}$  при их скорости более  $22 \text{ m/s}$ .

Таким образом, выполненные испытания показали устойчивость разработанных КФЭМ к воздействию условий окружающей среды, что должно обеспечить большой срок службы модулей, позволяющий осуществить выработку „солнечной“ электроэнергии в количестве, обеспечивающем окупаемость затрат на изготовление модулей.

Разработанные высокоэффективные модули имеют большие перспективы практического применения вследствие существенного увеличения удельной мощности солнечных батарей до  $300 \text{ W/m}^2$  (в условиях облучения AM1.5D,  $1000 \text{ W/m}^2$ ). Слежение за Солнцем в концентраторных фотоэнергосистемах увеличивает удельную (на единицу мощности системы,  $\text{kW} \cdot \text{h/kW}_{peak}$ ) энерговыработку, что обеспечивает дополнительное снижение стоимости солнечного электричества при сравнимой (с

солнечными батареями без слежения) стоимости установленной мощности солнечных батарей.

### Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-79-30035).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] Andreev V.M., Grilikhes V.A., Rumyantsev V.D. // Photovoltaic conversion of concentrated sunlight. John Wiley & Sons Ltd, 1997. 294 с.
- [2] Alferov Zh.I., Andreev V.M., Rumyantsev V.D. III–V heterostructures in photovoltaics // Concentrator photovoltaics / Eds A. Luque López, V.M. Andreev. Springer Ser. in Optical Sciences. Berlin–Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. V. 130. P. 25–50.
- [3] Green M.A., Dunlop E.D., Hohl-Ebinger J., Yoshita M., Kopidakis N., Ho-Baillie A.W.Y. // Prog. Photovolt. 2019. V. 28. N 1. P. 3–15. DOI: 10.1002/pp.3228
- [4] Domínguez C., Antón I., Sala G., Askins S. // Prog. Photovolt. 2013. V. 21. N 7. P. 1478–1488. DOI: 10.1002/pp.2227
- [5] Grilikhes V.A., Shvarts M.Z., Soluyanov A.A., Vlasova E.V., Andreev V.M. The new approach to design of Fresnel lens sunlight concentrator // Proc. of the 4th Int. Conf. on solar concentrators for the generation of electricity or hydrogen. El Escorial, Spain, 2007. P. 49–52.
- [6] Victoria M., Herrero R., Domínguez C., Antón I., Askins S., Sala G. // Prog. Photovolt. 2013. V. 21. N 3. P. 308–318. DOI: 10.1002/pp.1183
- [7] Araki K., Kondo M., Uozumi H., Yamaguchi M. Experimental proof and theoretical analysis on effectiveness of passive homogenizers to 3J concentrator solar cells // Proc. of the 3rd World Conf. on photovoltaic and energy conversion. Osaka, Japan, 2003. V. 1. P. 853–856.
- [8] Jaus J., Nitz P., Peharz G., Siefer G., Schult T., Wolf O., Passig M., Gandy T., Bett A.W. Second stage reflective and refractive optics for concentrator photovoltaics // 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conf. San Diego, USA, 2008. P. 1–5.
- [9] Wiesenfarth M., Anton I., Bett A.W. // Appl. Phys. Rev. 2018. V. 5. N 4. P. 041601. DOI: 10.1063/1.5046752
- [10] Shanks K., Senthilarasu S., Mallick T.K. // Renewable Sustainable Energy Rev. 2016. V. 60. P. 394–407. DOI: 10.1016/j.rser.2016.01.089