07.2;7.03

Оптимизационные решения для фотоэлектрических модулей с линзами Френеля и трех-/пятипереходными солнечными элементами

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

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

Поступило в Редакцию 17 апреля 2024 г.
В окончательной редакции 15 мая 2024 г.
Принято к публикации 16 мая 2024 г.

Обсуждаются преимущества использования пятипереходных солнечных элементов (по сравнению с трехпереходными элементами с близкими по абсолютной величине значениями КПД) в концентраторных фотоэлектрических модулях с линзами Френеля. Показано, что конструктивная высота модуля, определяемая фокусным расстоянием линзы Френеля, может быть снижена на $\sim 15\%$ в варианте использования пятипереходных солнечных элементов с соответствующим этому показателю выигрышем по материалоемкости и весу. Дополнительным преимуществом короткофокусных линз является сохранение высокой оптической эффективности при углах разориентации до 1° при установленной для пары линза–солнечный элемент геометрической кратности концентрирования в 100X. Это позволяет прогнозировать повышенную среднюю энерговыработку для концентраторных фотоэлектрических модулей в составе следящей фотоэнергоустановки в натурных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: линза Френеля, многопереходный солнечный элемент, средняя кратность концентрирования солнечного излучения, угол разориентации.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.18.58621.19960

Современные рекордные достижения по эффективности преобразования наземного концентрированного солнечного излучения находятся на уровне 44 и 46% для многопереходных фотопреобразователей (солнечных элементов, СЭ) на основе трех (3-junction или 3J) и пяти (5-junction или 5J) фотоактивных $p-n$-переходов (субэлементов) соответственно [1]. Данные предельные показатели обычно фиксируются при равномерной облученности фотоприемной поверхности СЭ. Будучи же установленными в фокусе концентратора (например, линзы Френеля, ЛФ), СЭ оказываются в существенно иных условиях эксплуатации, характеризующихся сильной пространственной и спектральной неравномерностью распределения световой энергии на их поверхности, что отражается на КПД СЭ и концентраторного фотоэлектрического модуля (КФЭМ) в целом.

Вопросы оптимизации конструкции многопереходных СЭ и линз Френеля, направленные на повышение энергетических и функциональных характеристик КФЭМ в целом, неоднократно освещались в литературе [2–5]. В свою очередь обсуждения преимуществ КФЭМ с пяти- и шестипереходными СЭ по сравнению с аналогами на основе трехпереходных элементов пока крайне редки [6–9].

В настоящей работе авторы развивают дискуссию (см. работы [7,10,11]) по проблеме поиска конструктивных решений для пары ЛФ–СЭ, при которых обеспечивается снижение общей высоты модуля и формируются оптимальные условия работы концентраторных СЭ с точки зрения их максимальной энергетической отдачи (КПД).

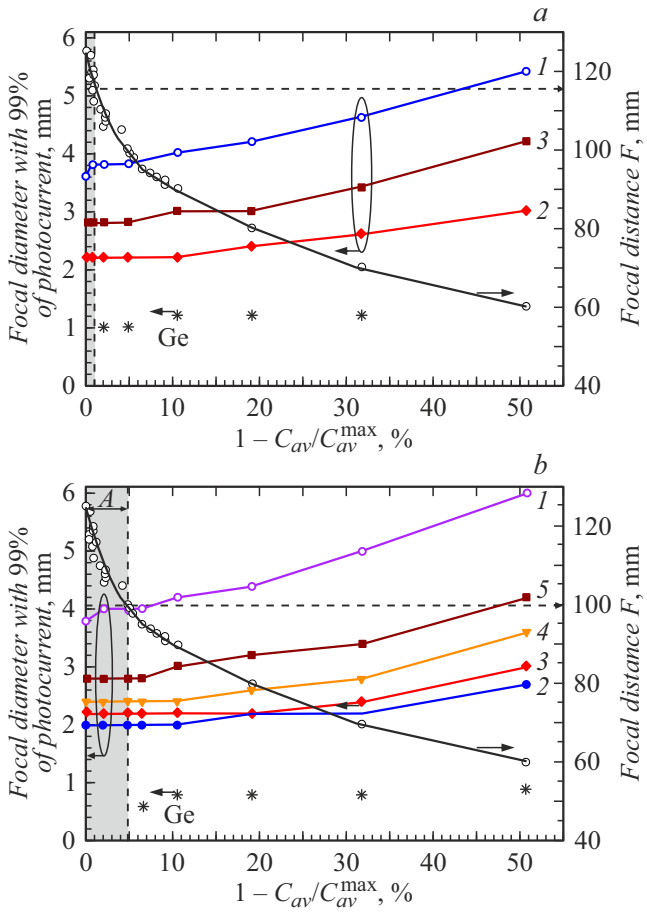
В силу хроматической аберрации (определяется дисперсией показателя преломления оптического материала, используемого при изготовлении ЛФ) возникает спектральное перераспределение энергии солнечного излучения в световом пятне, что предопределяет формирование различных профилей генерации фототока в субэлементах многопереходных СЭ. В зависимости от дизайна профиля ЛФ [10–12], полупроводниковой структуры и конструкции трехпереходного GaInP/GaInAs/Ge СЭ могут возникнуть такие рабочие условия, при которых в пределах определенной части фотоприемной площади СЭ будет превалировать режим „локального“ токового ограничения со стороны Ge-субэлемента. Такое ограничение, очевидно, будет инициировать протекание токов в латеральных плоскостях и повлечет за собой снижение коэффициента заполнения ВАХ и КПД многопереходных СЭ.

В работе [11] обсуждаются причины возникновения режимов токового ограничения в трехпереходном GaInP/GaInAs/Ge СЭ и их связь с конструктивным исполнением (принципами и подходами при проектировании) преломляющих зубцов ЛФ. Показано, что предотвратить проявление эффектов локальных токовых ограничений возможно при расположении СЭ на оптимальном или увеличенном (по сравнению с проектным) расстоянии от концентратора. Очевидно, что увеличение расстояния ЛФ–СЭ влечет за собой рост

общей конструктивной высоты КФЭМ и увеличение его материалоемкости и веса, что противоречит задачам развития дешевых (экономически эффективных) и легких (с малыми энергетическими затратами на слежение за Солнцем) наземных концентраторных фотоэлектрических систем.

Как и в [11,12], в настоящей работе авторы анализируют ЛФ типа „силикон на стекле“ с апертурой 60×60 mm с оптимальным (определяемым по методике [10]) фокусным расстоянием для такой линзы $F = 125$ mm (диаметр фокального пятна, содержащего 99% энергии сконцентрированного солнечного излучения, $d^{\min} \approx 3.8$ mm, средняя энергетическая кратность концентрирования излучения $C_{av}^{\max} \approx 600$X). При изменении проектных параметров ЛФ с целью сокращения ее фокусного расстояния рассматриваются параметры световых пятен в трех или пяти спектральных интервалах, для которых на основе стандартных данных по спектральной чувствительности трехпереходных [13] и пятипереходных [14] СЭ определяются фототоки субэлементов.

По мере уменьшения проектного фокусного расстояния диаметр фокального пятна $d^{\min}$ будет увеличиваться, а средняя энергетическая концентрация C_{av} излучения в нем уменьшаться. На рисунке такое уменьшение представлено величиной $C_{av}/C_{av}^{\max}$, выраженной в процентах. Построены зависимости, отражающие изменения размеров световых пятен, содержащих 99% излучения для генерации токов субэлементами 3J и 5J СЭ, и фокусных расстояний, при которых эти пятна формируются линзой, от величины $C_{av}/C_{av}^{\max}$. Для узкозонного субэлемента на основе Ge указаны диаметры световых областей, в пределах которых наблюдается его меньшая токовая генерация (локальное ограничение по фототоку) относительно всех остальных субэлементов многопереходных СЭ. Отрицательные аспекты данного явления, обсуждавшиеся в [7,11], накладывают ограничения на выбор конструкции ЛФ с сокращенным фокусным расстоянием. Представленные данные показывают (см. рисунок и таблицу) возможность незначительного уменьшения фокусного расстояния в паре ЛФ–3J СЭ (за счет изменения проектных параметров преломляющего профиля ЛФ) — со 125 до 115 mm (т.е. на 8%), тогда как в паре ЛФ–5J СЭ такое уменьшение может быть гораздо бóльшим — со 125 до 100 mm (т.е. на 20%). Одновременно наблюдается незначительный рост размера светового пятна, в котором концентрируемое излучение обеспечивает генерацию 99% фототока для соответствующего субэлемента многопереходных СЭ: с $d^{\min} \approx 3.8$ mm при $F = 115$ mm до $d^{\min} \approx 4$ mm при $F = 100$ mm для 3J и 5J СЭ, т.е. увеличение фотоприемной площади СЭ составляет $\sim 10\%$. В обоих случаях указанные размеры областей токовой генерации определяются верхними (широкозонными) субэлементами и непосредственно связаны с диапазоном их спектральной чувствительности. Для оптимальной ЛФ с $F = 125$ mm размеры областей со-



Расчетные данные по динамике изменения размеров световых пятен, содержащих 99% излучения для генерации токов субэлементами трехпереходных (линии *1–3*) (*a*) и пятипереходных (линии *1–5*) (*b*) СЭ, и фокусного расстояния, на котором эти пятна формируются линзой, от уровня снижения средней концентрации излучения $C_{av}/C_{av}^{\max}$. Для узкозонного субэлемента на основе Ge (звездочки) указаны диаметры световых областей, в пределах которых наблюдается его меньшая токовая генерация (локальное ограничение по фототоку) относительно всех остальных субэлементов многопереходных СЭ.

ставляют 3.6 mm для 3J СЭ и 3.8 mm для 5J СЭ. Иными словами, это означает снижение геометрической кратности концентрирования C_{geom} до ~ 285X для варианта „ЛФ с $F = 100$ mm + 5J СЭ“ против ~ 310X для „ЛФ с $F = 115$ mm + 3J СЭ“. Потери фототока из-за снижения оптической эффективности ЛФ, определяемой неоптимальной конфигурацией преломляющего профиля короткофокусных линз, в указанных случаях составляют ~ 0.2 и $\sim 0.5\%$ (в сравнении с оптимальным вариантом ЛФ с $F = 125$ mm). Соответственно следует ожидать и сравнимые по величине потери общей эффективности КФЭМ с короткофокусными ЛФ.

Важным преимуществом перехода к короткофокусным вариантам линзовых концентраторов является их более высокая оптическая эффективность при разориентации (в сравнении с оптимальной ЛФ). Как показано в ра-

Основные параметры для пары ЛФ–СЭ (см. рисунок)

Тип СЭ	Фокусное расстояние ЛФ F, mm	$d^{\min}$, mm (при 99% фототока)	$1 - C_{av}/C_{av}^{\max}$, %	C_{geom}, X
3J	115	3.8	1	310
	125	3.6	0	350
5J	100	4.0	5	285
	125	3.8	0	310

боте [12], для классической ЛФ с $F = 100\,\text{mm}$ при угле разориентации $\alpha \approx 1^\circ$ (размер приемника $6 \times 6\,\text{mm}$, геометрическая кратность концентрирования 100X) ее оптическая эффективность оказывается практически максимальной (в сравнении с другими вариантными исполнениями как более короткофокусных, так и более длиннофокусных линз). В случае ЛФ с $F = 115\,\text{mm}$ имеется снижение оптической эффективности ЛФ на $\sim 2.5\,\text{abs.}\%$.

Таким образом, следует заключить, что при практически равных исходных эффективностях 3J и 5J СЭ использование 5J СЭ дает ряд преимуществ с точки зрения всей конструкции КФЭМ: меньшая конструктивная высота способствует уменьшению материалоемкости и веса модуля (за счет снижения материалоемкости корпуса модуля снижение его веса должно составить не менее 20%), что в совокупности позволит проектировать более легкие системы слежения, снижать энергетические затраты на обеспечение слежения и общие ресурсы на эксплуатацию.

В работе показаны преимущества использования пятипереходных СЭ при построении КФЭМ со сниженной конструктивной высотой в сравнении с применением модулей на основе трехпереходных фотопреобразователей. Показано, что в модулях с 5J СЭ более эффективно (с точки зрения материалоемкости и веса модуля) использовать короткофокусные ЛФ. Незначительное снижение (на 10%) средней кратности концентрирования излучения в варианте с 5J СЭ компенсируется уменьшением на $\sim 15\%$ высоты КФЭМ с соответствующим этому показателю выигрышем по объему и весу для используемых конструкционных материалов (так, вес модуля в расчете на $1\,\text{m}^2$ его фотоприемной поверхности снижается на 5–7% только за счет выигрыша в материалоемкости алюминиевого корпуса). Неоспоримым выигрышем при переходе к короткофокусным КФЭМ в варианте „ЛФ с $F = 100\,\text{mm} + 5\text{J}$ СЭ“ против „ЛФ с $F = 115\,\text{mm} + 3\text{J}$ СЭ“ является и сохранение высокой оптической эффективности линзы при углах разориентации до $\alpha \approx 1^\circ$, что позволяет прогнозировать большую энерговыработку КФЭМ в составе следящей фотоэнергоустановки в натурных условиях эксплуатации.

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] M.A. Green, E.D. Dunlop, M. Yoshita, N. Kopidakis, K. Bothe, G. Siefer, X. Hao, Progr. Photovolt.: Res. Appl., **32**, 3 (2024). DOI: 10.1002/pip.3750

[2] *Handbook on concentrator photovoltaic technology*, ed. by C. Algora, I. Rey-Stolle (John Wiley & Sons, N.Y., 2016), p. 59–244, 339–432, 589, 684. DOI: 10.1002/9781118755655

[3] F. Dimroth, S.P. Philipps, G. Peharz, E. Welser, R. Kellenbenz, T. Roesener, V. Klinger, E. Oliva, M. Steiner, M. Meusel, W. Guter, A.W. Bett, in *Proc. of the 2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conf. (PVSC)* (IEEE, 2010), p. 001231–001236. DOI: 10.1109/PVSC.2010.5614168

[4] S. van Riesen, M. Neubauer, A. Boos, M. Munoz Rico, C. Gourdel, S. Wanka, R. Krause, P. Guernard, A. Gombert, AIP Conf. Proc., **1679**, 100006 (2015). DOI: 10.1063/1.4931553

[5] M. Steiner, M. Wiesenfarth, J.F. Martínez, G. Siefer, F. Dimroth, AIP Conf. Proc., **2149**, 060006 (2019). DOI: 10.1063/1.5124199

[6] https://www.strom-forschung.de/lw_resource/datapool/systemfiles/elements/files/C8903EFB6BCE4E73E0537E695E86248D/live/document/module-with-five-junction-solar-cell-achieves-efficiency-of-32-per-cent.pdf

[7] Е.А. Ионова, Н.Ю. Давидюк, Н.А. Садчиков, А.В. Андреева, ЖТФ, **91** (9), 1419 (2021). DOI: 10.21883/JTF.2021.09.51223.89-21 [E.A. Ionova, N.Yu. Davidyuk, N.A. Sadchikov, A.V. Andreeva, Tech. Phys., **66**, 1208 (2021). DOI: 10.1134/S1063784221090073].

[8] Е.А. Ионова, Н.Ю. Давидюк, ЖТФ, **93** (1), 122 (2023). DOI: 10.21883/JTF.2023.01.54071.160-22 [E.A. Ionova, N.Y. Davidyuk, Tech. Phys., **68**, 115 (2023). DOI: 10.21883/TP.2023.01.55541.160-22].

[9] M. Steiner, P. Schroth, R.F. Loeckenhoff, G. Siefer, M. Wiesenfarth, AIP Conf. Proc., **2841**, 030004 (2023). DOI: 10.1063/5.0146347

[10] 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
[11] M.Z. Shvarts, M.V. Nakhimovich, E.A. Ionova, N.Yu. Davidyuk, A.A. Soluyanov, AIP Conf. Proc., **2298**, 020009 (2020). DOI: 10.1063/5.0032805
[12] М.З. Шварц, В.М. Емельянов, С.А. Левина, М.В. Нахимович, А.А. Солуянов, Письма в ЖТФ, **50** (7), 8 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.07.57461.19823 [M.Z. Shvarts, V.M. Emelyanov, S.A. Levina, M.V. Nakhimovich, A.A. Soluyanov, Tech. Phys. Lett., **50** (4), 6 (2024).].
[13] *Concentrator triple junction solar cell type: 3C44-5.5 × 5.5 mm^2. Data Sheet (HNR 0004356-00-01)* [Электронный ресурс]. www.azurspace.com
[14] R. van Leest, D. Fuhrmann, A. Frey, M. Meusel, G. Siefer, S.K. Reichmuth, AIP Conf. Proc., **2149**, 020007 (2019). DOI: 10.1063/1.5124177