

07.2

## Комбинированная радиальная линза Френеля: управление распределением энергетической освещенности и профилем генерируемого фототока в многопереходном солнечном элементе

© Н.А. Садчиков, А.В. Андреева

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

Поступило в Редакцию 8 сентября 2023 г.

В окончательной редакции 27 сентября 2023 г.

Принято к публикации 28 сентября 2023 г.

Предложено решение для линзы Френеля с переменным шагом и фокусом, предназначенной для использования в наземных концентраторных модулях с высокой степенью концентрации солнечного излучения. По сравнению с линзой Френеля с постоянным шагом и фокусом такой подход обеспечил снижение пространственной и спектральной неоднородностей локальной концентрации солнечного излучения в фокальном пятне на поверхности многопереходного солнечного элемента InGaP/GaAs/Ge. Это позволило сформировать профиль распределения локальной плотности фототока со сниженными пиковыми значениями в центре солнечного элемента и минимальной разницей величин локальной плотности фототока для трех фоточувствительных  $p-n$ -переходов на всей поверхности многопереходного солнечного элемента.

**Ключевые слова:** концентраторный фотоэлектрический модуль, линза Френеля, многопереходные солнечные элементы.

DOI: 10.61011/PJTF.2023.22.56595.19723

Линзы Френеля (ЛФ) являются основным типом концентраторов солнечной энергии в концентраторных фотоэлектрических модулях (КФЭМ). Важным этапом в развитии технологии концентраторных фотоэнергосистем стала разработка технологии „силикон на стекле“ (SoG), используемой для изготовления ЛФ, позволившая создать недорогой и масштабируемый в условиях промышленного производства тип оптических концентраторов солнечной энергии с высоким оптико-энергетическим КПД [1–3]. Это позволило в свою очередь достигнуть высоких КПД для КФЭМ на основе многопереходного солнечного элемента (МПСЭ) InGaP/GaAs/Ge и ЛФ [3–5]. Рекордные значения КПД для МПСЭ достигли величины 47.6% [4], а рекорд КПД для КФЭМ с использованием ЛФ составляет 38.9% [5].

При работе МПСЭ в паре с линзой Френеля, формирующей неравномерное распределение облученности, главными факторами, ограничивающими КПД МПСЭ и концентраторного модуля, являются, во-первых, резистивные потери, существенно возрастающие при увеличении локальной концентрации солнечного излучения, достигающей величин до 2500–3000 крат в центре фокального пятна, а во-вторых, спектральная и пространственная неоднородность распределения энергии солнечного излучения в фокальном пятне ЛФ, обусловленная хроматической аберрацией [6–10]. Спектральная и пространственная неоднородность солнечного излучения приводит к неравномерности в профиле распределения локальной плотности фототока на всей поверхности МПСЭ, нарушению согласования фототоков для отдельных  $p-n$ -переходов и, как следствие,

к снижению величин суммарного фототока и КПД МПСЭ и КФЭМ [6–13]. Латеральные токи, возникающие при такой неоднородности, частично компенсируют неравномерность в профиле локальной плотности фототока [7–9], но при высоких уровнях освещенности для латеральных токов также работает механизм резистивных потерь [12].

Возможным решением данной проблемы является использование элементов вторичной оптики [14], однако это приводит к усложнению конструкции и увеличению стоимости КФЭМ.

Очевидно, необходимы поиски способов перераспределения концентрированной солнечной энергии на поверхности МПСЭ без использования вторичной оптики. Это может быть сделано путем оптимизации профиля ЛФ. В работах [15–19] предложены различные подходы к решению данной проблемы: комбинация разных углов наклона микропризм [15,16,19], использование криволинейных преломляющих поверхностей, применение составных ЛФ с двумя преломляющими профилями, изготовленными из материалов с разным показателем преломления [17,18]. Это позволило снизить кратность концентрации солнечной энергии и величину плотности фототока в центре фокального пятна.

Для оценки влияния высоких значений концентрации солнечного излучения и резистивных потерь на фотоэлектрические параметры МПСЭ с тремя InGaP/GaAs/Ge  $p-n$ -переходами и размером фоточувствительной поверхности  $3 \times 3$  mm были проведены измерения зависимостей фотоэлектрических параметров МПСЭ от кратности концентрирования в пределах

Зависимость фотоэлектрических параметров МПСЭ InGaP/GaAs/Ge от кратности концентрирования солнечной энергии

$C, X$	$I_{sc}, \text{mA}$	$U_{oc}, \text{V}$	$I_{opt}, \text{mA}$	$U_{opt}, \text{V}$	$P, \text{mW}$	$FF, \%$	$Eff, \%$
11.8	17.3	2.76	16.8	2.46	41.4	86.6	38.13
111.9	163.4	2.98	158.6	2.66	421.1	86.4	41.07
384.1	560.9	3.09	542.2	2.75	1490.1	86.1	42.35
659.0	962.1	3.13	935.8	2.73	2552.6	84.8	42.29
885.92	1293.5	3.15	1241.2	2.74	3409.5	83.7	42.01
1636.69	2389.6	3.18	2282.1	2.65	6064.5	79.7	40.45
2547.7	3719.8	3.20	3512.7	2.55	8954.4	75.2	38.37
3301.1	4819.7	3.20	4439.9	2.45	10888.8	70.6	36.01

Примечание.  $C$  — кратность концентрации относительно мощности  $1000 \text{ W/cm}^2$ ,  $I_{sc}$  — ток короткого замыкания,  $U_{oc}$  — напряжение холостого хода,  $I_{opt}$  — ток в точке оптимальной нагрузки,  $U_{opt}$  — напряжение в точке оптимальной нагрузки,  $P$  — мощность,  $FF$  — фактор заполнения вольт-амперной характеристики,  $Eff$  — КПД.

10–3300 крат. Спектральная фоточувствительность данного МПСЭ была использована при расчетах профиля распределения плотности фототока классической ЛФ в [7–9] и настоящей работе. В качестве измерительного оборудования применялся импульсный имитатор солнечного излучения со спектром AM1.5D, формирующий равномерное солнечное излучение на поверхности МПСЭ. При равномерной облученности в условиях проведенного эксперимента отсутствуют латеральные токи. Измерения показали, что величина максимального КПД (свыше 42%) такого МПСЭ достигается в диапазоне уровней концентрации 380–890 крат. При росте облученности свыше 1500 крат КПД снижается до 40%, а при 3300 крат — до 36% (см. таблицу).

Падение КПД МПСЭ при уровнях облученности свыше 1000 крат объясняется нарастающими резистивными потерями при высоких плотностях фототока. Для увеличения КПД МПСЭ в паре с ЛФ необходимо обеспечить снижение уровня концентрации солнечной энергии в центре фокального пятна, а также уменьшить неравномерность распределения солнечной энергии и плотности фототока на поверхности МПСЭ.

В работах [7–9] представлены результаты разработки ЛФ „силикон на стекле“ с апертурой  $60 \times 60 \text{ mm}$  с „классическим“ профилем преломляющих граней: постоянный шаг  $0.25 \text{ mm}$ , расчетное фокусное расстояние  $105 \text{ mm}$ , размер фоточувствительной поверхности МПСЭ  $3 \times 3 \text{ mm}$ . Выходными данными является профиль распределения плотности фототока на поверхности МПСЭ (рис. 1). Диаметр фокального пятна с коэффициентом перехвата энергии 90% равен  $1.91 \text{ mm}$ .

Из рис. 1 видно, что профиль локальной плотности фототока при использовании классической ЛФ обладает существенной неоднородностью для трех поддиапазонов на всей поверхности МПСЭ.

Для уменьшения пиковых значений фототока и неоднородности в профиле распределения плотности фототока на всей поверхности МПСЭ авторами настоящей работы разработан вариант „комбинированной“ ЛФ с апертурой  $60 \times 60 \text{ mm}$ : увеличен поперечный размер преломляющей микропризмы в составе ЛФ в централь-

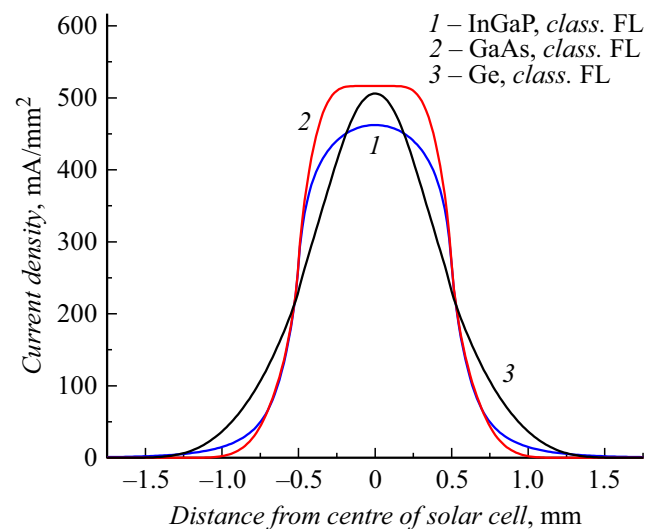


Рис. 1. Распределение плотности фототока для трех  $p$ - $n$ -переходов — от центра МПСЭ к краю для классической ЛФ.

ной зоне линзы. В качестве критерия при выборе новых параметров профиля устанавливался допуск на незначительное (в пределах 5–10%) увеличение размера фокального пятна. Расчет профилей распределения солнечного излучения и плотности фототока комбинированной ЛФ выполнен для каждой микропризмы. В качестве главного критерия формирования параметров комбинированной ЛФ был введен размер фокального пятна, формируемого каждой микропризмой, а также минимальная разница величин локальной плотности фототока на всей поверхности МПСЭ. При формировании профиля комбинированной ЛФ применяются базовый алгоритм прохождения оптических лучей через преломляющие поверхности ЛФ и принцип формирования профиля распределения плотности фототока на поверхности МПСЭ, используемый в работах [6–8].

Формирование профиля Френеля идет от центра в сторону края ЛФ. Поперечный размер отдельной микропризмы увеличивается до тех пор, пока диаметр пятна,

формируемого отдельной микропризмой, не будет равен диаметру пятна для классической ЛФ с таким же коэффициентом перехвата (90%). При этом также варьируется фокусное расстояние для каждой микропризмы в пределах  $\pm 1$  mm от расчетного фокуса 105 mm. Был получен итоговый профиль комбинированной ЛФ, в котором поперечный размер микропризм в центральной зоне ЛФ составляет 1.8 mm и уменьшается к периферийным областям до 0.5 mm.

На рис. 2 представлен профиль распределения плотности фототока на поверхности МПСЭ, формируемый комбинированной ЛФ.

Диаметр светового пятна для комбинированной линзы составил 2.39 mm (коэффициент перехвата 90%), что обеспечивает достаточный для МПСЭ размером  $3 \times 3$  mm (геометрическая концентрация 400 крат) запас по допустимому смещению положения солнечного пятна вдоль поверхности элемента (уменьшение мощности МПСЭ на величину, не превышающую 10% от максимальной).

Сравнение разницы величин локальной плотности фототока трех субэлементов на всей поверхности МПСЭ для классической и комбинированной ЛФ приведено на рис. 3.

Очевидно, что комбинированная ЛФ обеспечивает существенно более высокую пространственную и спектральную однородность плотности фототока на всей поверхности МПСЭ для трех  $p-n$ -переходов (рис. 2). Максимальные значения плотности фототока для классической ЛФ достигают  $515 \text{ mA/mm}^2$  (рис. 1), а для комбинированной ЛФ —  $353 \text{ mA/mm}^2$  (GaAs  $p-n$ -переход) (рис. 2). При этом для классической ЛФ максимальная разница между абсолютными величинами плотности фототоков субэлементов GaAs и Ge составляет  $131 \text{ mA/mm}^2$  на расстоянии 0.4 mm от центра МПСЭ, а для комбинированной ЛФ максимальная разница между величинами плотности фототоков субэлементов GaAs и InGaP составляет  $16 \text{ mA/mm}^2$  на расстоянии 0.2 mm от центра МПСЭ (рис. 3). Для комбинированной ЛФ разница между величинами плотности фототоков всех

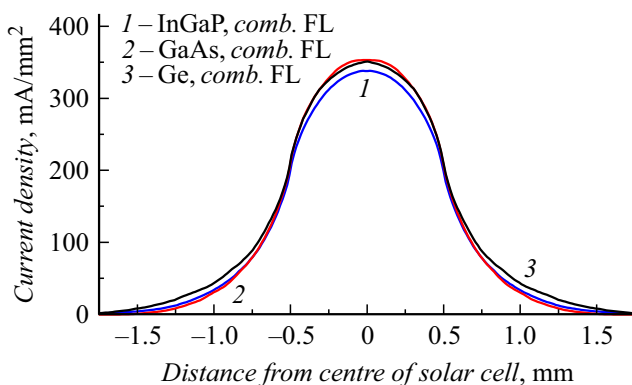


Рис. 2. Распределение плотности фототока для трех  $p-n$ -переходов — от центра солнечного элемента к краю для комбинированной ЛФ.

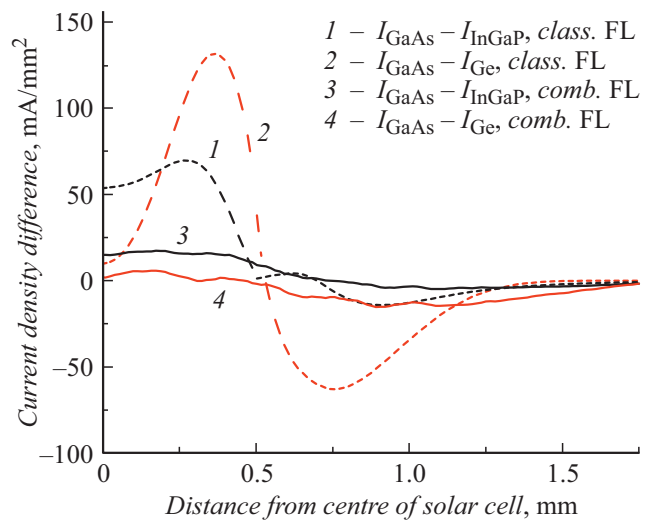


Рис. 3. Разница в величинах локальной плотности фототока  $I_{\text{GaAs}} - I_{\text{InGaP}}$  и  $I_{\text{GaAs}} - I_{\text{Ge}}$  для трех  $p-n$ -переходов МПСЭ для классической и комбинированной ЛФ.

субэлементов в разы меньше для всей области фокального пятна, особенно в центральной зоне, куда попадает основная доля солнечной энергии.

Дальнейшее снижение пиковых значений и неоднородности концентрированного солнечного излучения и плотности фототока возможно при более сложном алгоритме изменений параметров преломляющих поверхностей комбинированной ЛФ, в частности при использовании ЛФ с преломляющими асферическими поверхностями.

## Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда в соответствии с соглашением № 22-29-20190 от 23.03.2022 г., а также за счет гранта Санкт-Петербургского научного фонда в соответствии с соглашением № 30/2022 от 14.04.2022 г.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] V.D. Rumyantsev, V.M. Andreev, A.W. Bett, F. Dimroth, M. Hein, G. Lange, M.Z. Shvarts, O.V. Sulima, in *Proc. of the 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conf.* (IEEE, 2000), vol. 1, p. 1169–1172. DOI: 10.1109/pvsc.2000.916096
- [2] V.D. Rumyantsev, in: *Concentrator photovoltaics*, ed. by A. Luque, V.M. Andreev (Springer-Verlag, Berlin–Heidelberg, 2007), vol. 130, p. 151. DOI: 10.1007/978-3-540-68798-6\_8
- [3] M. Wiesenfarth, I. Anton, A.W. Bett, *Appl. Phys. Rev.*, **5**, 041601 (2018). DOI: 10.1063/1.5046752

- [4] *Fraunhofer ISE Develops the World's Most Efficient Solar Cell with 47.6 Percent Efficiency* [Электронный ресурс] (дата обращения 19.06.2023). [https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/press-releases/2022/1322\\_PR\\_ISE\\_World\\_Record\\_47,6Percent-SolarCell.pdf](https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/press-releases/2022/1322_PR_ISE_World_Record_47,6Percent-SolarCell.pdf)
- [5] *Soitec reaches 38.9% conversion efficiency with CPV module* [Электронный ресурс] (дата обращения 19.06.2023). [https://www.pv-tech.org/soitec\\_reaches\\_38-9\\_conversion\\_efficiency\\_with\\_cpv\\_module/](https://www.pv-tech.org/soitec_reaches_38-9_conversion_efficiency_with_cpv_module/)
- [6] Е.В. Бобкова, В.А. Гриликес, А.А. Солуянов, М.З. Шварц, Письма в ЖТФ, **32** (23), 86 (2006). [E.V. Bobkova, V.A. Grilikhes, A.A. Soluyanov, M.Z. Shvarts, Tech. Phys. Lett., **32** (12), 1039 (2006). DOI: 10.1134/s1063785006120133].
- [7] Е.А. Ионова, М.В. Уланов, Н.Ю. Давидюк, Н.А. Садчиков, ЖТФ, **86** (12), 87 (2016). [E.A. Ionova, M.V. Ulanov, N.Yu. Davidiyuk, N.A. Sadchikov, Tech. Phys., **61** (12), 1844 (2016). DOI: 10.1134/S1063784216120185].
- [8] Е.А. Ионова, М.В. Уланов, Н.Ю. Давидюк, Н.А. Садчиков, ЖТФ, **87** (4), 569 (2017). DOI: 10.21883/JTF.2017.04.44318.1951 [E.A. Ionova, M.V. Ulanov, N.Yu. Davidiyuk, N.A. Sadchikov, Tech. Phys., **62** (4), 589 (2017). DOI: 10.1134/S1063784217040090].
- [9] 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. Davidiyuk, N.A. Sadchikov, A.V. Andreeva, Tech. Phys., **66**, 1208 (2021). DOI: 10.1134/S1063784221090073].
- [10] S.R. Kurtz, M.J. O'Neill, in *Proc. of the 25th IEEE Photovoltaic Specialists Conf.* (IEEE, 1996), p. 361–364. DOI: 10.1109/PVSC.1996.564020
- [11] H. Cotal, C. Fetzer, J. Boisvert, G. Kinsey, R. King, P. Hebert, H. Yoon, N. Karam, *Energy Environ. Sci.*, **2** (2), 174 (2009). DOI: 10.1039/b809257e
- [12] P. Espinet-González, I. Rey-Stolle, C. Algora, I. García, *Prog. Photovolt.: Res. Appl.*, **23** (6), 743 (2014). DOI: 10.1002/pip.2491
- [13] M.Z. Shvarts, M.V. Nakhimovich, E.A. Ionova, N.Yu. Davidiyuk, A.A. Soluyanov, *AIP Conf. Proc.*, **2298**, 020009 (2020). DOI: 10.1063/5.0032805
- [14] *Handbook of concentrator photovoltaic technology*, ed by C. Algora, I. Rey-Stolle (John Wiley & Sons, Ltd., 2016). DOI: 10.1002/9781118755655
- [15] R. Fu, N. Chen, H. Liu, Z. Mi, Y. Bai, X. Zhang, J. Chen, X. Wang, *AIP Conf. Proc.*, **1616**, 58 (2014). DOI: 10.1063/1.4897028
- [16] J.-W. Pan, J.-Y. Huang, C.-M. Wang, H.-F. Hong, Y.-P. Liang, *Opt. Commun.*, **284** (19), 4283 (2011). DOI: 10.1016/j.optcom.2011.06.019
- [17] G. Vallerotto, M. Victoria, S. Askins, R. Herrero, C. Domínguez, I. Antón, G. Sala, *Opt. Express*, **24** (18), A1245 (2016). DOI: 10.1364/oe.24.0a1245
- [18] S. Askins, G. Vallerotto, M. Victoria, R. Herrero, C. Domínguez, I. Antón, G. Sala, in *IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conf. (PVSC)* (IEEE, 2016), p. 0204–0209. DOI: 10.1109/PVSC.2016.7749579
- [19] M.Z. Shvarts, M.V. Nakhimovich, N.A. Sadchikov, A.A. Soluyanov, *AIP Conf. Proc.*, **2298**, 050005 (2020). DOI: 10.1063/5.0032804