

07.2;07.3

Поиск компромиссных конструктивных решений для модулей с линзовыми концентраторами солнечного излучения

© 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 30 ноября 2023 г.

В окончательной редакции 13 декабря 2023 г.

Принято к публикации 13 декабря 2023 г.

Обсуждаются варианты исполнения концентраторных фотоэлектрических модулей с уменьшенной конструктивной высотой, в основе которых лежат компромиссы между снижением оптической эффективности линзы Френеля, изменением профиля распределения световой энергии в фокальном пятне и обеспечением требуемых (допустимых) разориентационных углов при установленной средней геометрической концентрации в паре линза–солнечный элемент.

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

DOI: 10.61011/PJTF.2024.07.57461.19823

Дискуссия относительно построения оптимальных (сбалансированных по эффективности, эксплуатационным характеристикам и стоимости) концентраторных фотоэлектрических модулей (ФЭМ) продолжает оставаться актуальной как для проектировщиков, так и для тех, кто эксплуатирует фотоэлектрические системы, и охватывает все большее количество значимых и дополнительных (второстепенных) параметров. Очевидно, что конкурентоспособность концентраторной фотоэлектрической концепции и ее востребованность на энергетическом рынке будет определяться прежде всего минимизацией затрат на единицу установленной или вырабатываемой электрической мощности (стоимость kW/h). При использовании дорогих высокоэффективных многопереходных солнечных элементов (СЭ) успех лежит в плоскости поиска простых (с наименьшим количеством элементов), эффективных и недорогих оптических конструкций, позволяющих работать с максимальными техническими допусками при минимальной материалоемкости.

В классическом линзовом ФЭМ типа SMALFOC или FLATCON [1,2] указанные взаимосвязанные параметры будут взаимодействовать друг с другом следующим образом.

1. Энерговыводка (КПД) модуля определяется оптической эффективностью (η_{opt}) линзы Френеля (ЛФ) и КПД самого СЭ, работающего в режиме преобразования потока сконцентрированного излучения с задаваемым ЛФ профилем распределения освещенности. С точки зрения эффективного решения для ЛФ обеспечение наибольших значений выходной мощности ФЭМ требует одновременного выполнения двух условий: собирание максимальной доли оптической мощности на СЭ, с одной стороны, и обеспечение максимальной средней энергетической концентрации излучения (C_{av}^{max}) в фокальном пятне минимального размера (d^{min}) — с другой.

Как показано в работе [3], для ЛФ из выбранного материала существует единственная комбинация конструктивных параметров размер (апертура)/шаг профиля/фокусное расстояние ($a/t/F$), при которых одновременно обеспечивается достижение C_{av}^{max} и d^{min} на оптимальном фокусном расстоянии F_{optim} . Отклонение F от оптимального расстояния F_{optim} , равно как и увеличение шага профиля t , влечет за собой увеличение фокального пятна d^{min} и снижение средней концентрации излучения C_{av} . Технологические погрешности профиля Френеля, возникающие при точении мастер-матриц и формовании преломляющих граней (скругления в вершинах и впадинах, шероховатости и пр.), в большей мере оказывают влияние на оптическую эффективность η_{opt} ЛФ с малым шагом профиля t . Так, при увеличении количества зубцов доля излучения, рассеиваемого на шероховатостях и локальных неточностях рабочих граней (скругления, угловые ошибки профиля), будет нарастать, снижая η_{opt} . Соответственно при заданном шаге профиля t оптическая эффективность η_{opt} длиннофокусных ЛФ будет выше (рис. 1). Но чем больше фокусное расстояние F , тем больше конструктивная высота модуля, его материалоемкость и стоимость.

2. Функциональность следует связывать с требованием по точности наведения модуля на Солнце и поддержания параметров слежения при выбранном соотношении размеров концентратора и СЭ, т.е. с геометрической концентрацией C_{geo} . Под допустимым углом разориентации (α) понимают угол, при котором вырабатываемая мощность или фототок модуля составляют 90% от значения в точно ориентированном положении. Более высокие требования к точности ориентации приводят к росту сложности и материалоемкости системы наведения модулей для обеспечения установленных режимов слежения.

Компромисс между геометрической концентрацией C_{geo} и углом разориентации α предложено определять

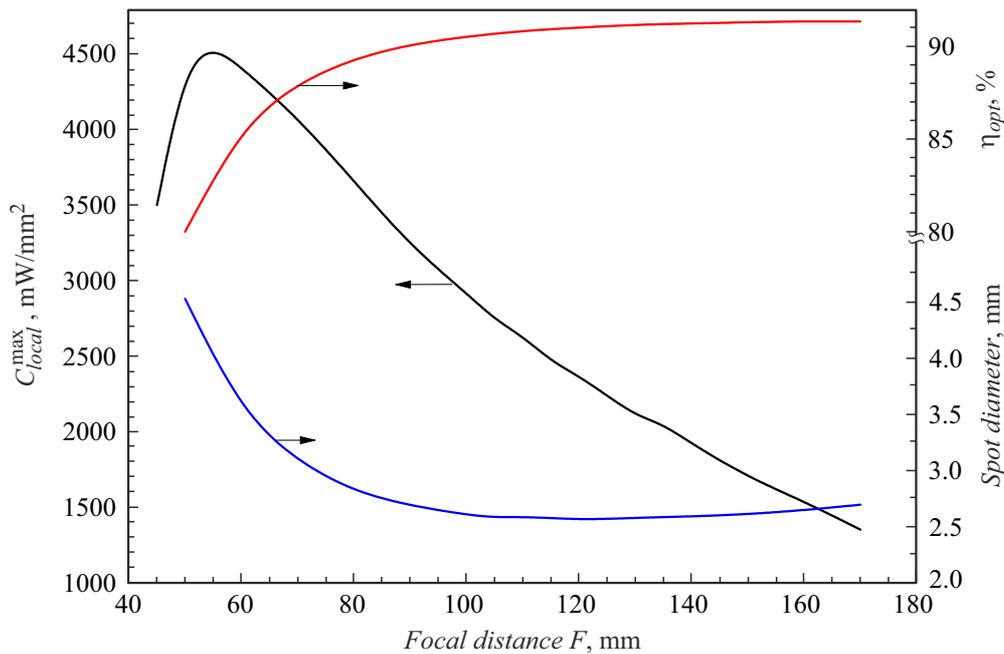


Рис. 1. Зависимости локальной кратности концентрации C_{local}^{max} , размера фокального пятна d^{min} , содержащего 95% энергии сконцентрированного солнечного излучения, и оптической эффективности η_{opt} ЛФ от проектного фокусного расстояния F . Шаг профиля преломляющих граней $t = 0.35$ mm. Оценки приведены для „идеальной“ ЛФ (без учета потерь энергии на скруглениях вершин и впадин зубцов и из-за отклонений формы преломляющих граней, шероховатостей оптических поверхностей и пр. [4,5]).

как [1]:

$$CAP = \sqrt{C_{geo}} \sin \alpha, \quad (1)$$

(CAP — concentration acceptance product).

Однако для простых ФЭМ (без вторичной оптики) выражение (1) не учитывает такие характеристики ЛФ, как уже упомянутая выше оптическая эффективность η_{opt} и профиль распределения световой энергии в фокальном пятне, которые также зависят от F и α .

3. Себестоимость ФЭМ зависит от размера СЭ, изготавливаемых из дорогостоящих III–V гетероструктур, т. е. от геометрической концентрации C_{geo} , количества оптических и электрогенерирующих элементов, материалоемкости ФЭМ, задаваемой его высотой и определяемой фокусным расстоянием линзы.

В настоящей работе авторы обсуждают возможные компромиссные решения для пары ЛФ–СЭ, позволяющие при сохранении высоких показателей для C_{geo} и α уменьшить фокусное расстояние линзы и, как следствие, конструктивную высоту и материалоемкость ФЭМ. Для системы слежения это будет означать уменьшение массы самой конструкции, а также снижение требований по жесткости, что позволит сократить эксплуатационные затраты на слежение.

При поиске компромиссных решений для конструктивных параметров ЛФ использовалась математическая модель концентрирования солнечного излучения, основанная на прямом прослеживании хода лучей [4,5]. Данный подход позволяет решать задачи проектирования ЛФ и сравнения их оптико-энергетических характеристик (с учетом ограничений со стороны применяемых

методов изготовления и погрешностей формы ЛФ: отклонения формы преломляющих граней, шероховатости поверхностей и т. п.). Помимо профилей распределения энергетической освещенности в фокусе ЛФ при различных углах разориентации комплект характеристик включает зависимости оптической эффективности η_{opt} от размера фокального пятна d для проектного фокусного расстояния F и разориентационную зависимость для пары ЛФ–СЭ.

В работах [6,7] рассматривались модули на основе ЛФ типа „силикон на стекле“ с апертурой 60×60 mm ($a = 60$ mm) и фокусным расстоянием 105 mm, тогда как оптимальное фокусное расстояние, оцениваемое авторами данной работы по методике [3], для такой ЛФ составляет $F_{optim} = 125$ mm (размер фокального пятна, содержащего 95% энергии сконцентрированного солнечного излучения, $d^{min} \approx 2.6$ mm). Выбор укороченного фокусного расстояния F в [6,7] четко не аргументировался, но может объясняться крайне слабой зависимостью d^{min} и η_{opt} от проектного F в диапазоне 125 ± 20 mm (рис. 1). Эффективность ЛФ с погрешностями формы при $F = 105$ mm оценивается по уровню $\eta_{opt} \approx 88\%$ (против 88.5% при $F = 125$ mm) при допустимом $\alpha \approx \pm 0.95^\circ$ для СЭ размером 6×6 mm ($C_{geo} = 100X$). Дополнительные возможности по обеспечению высокой геометрической концентрации и сохранению относительно больших разориентационных углов могут быть раскрыты при использовании вторичной концентрирующей оптики [8,9].

По мере уменьшения проектного фокусного расстояния размер фокального пятна d^{min} будет увеличивать-

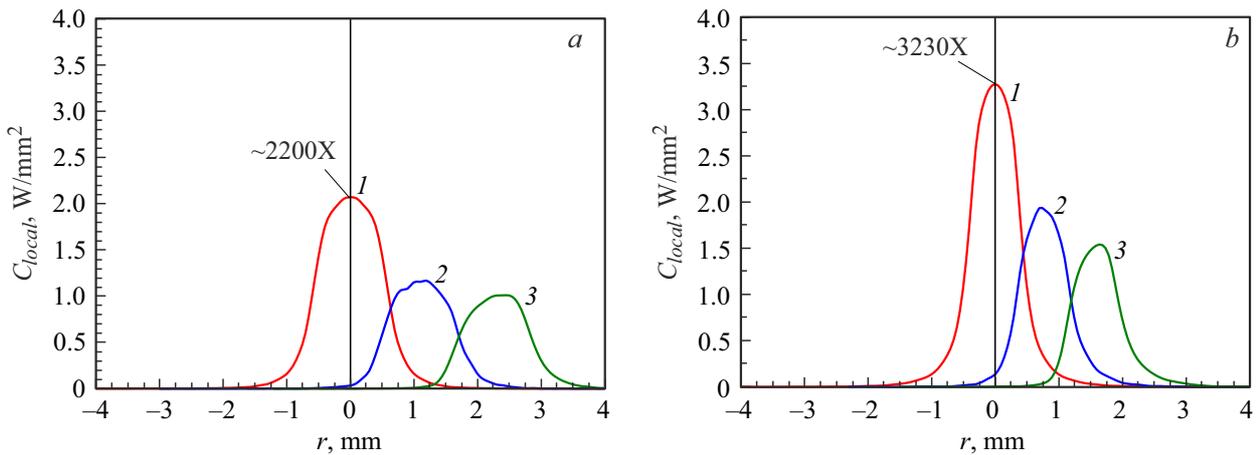


Рис. 2. Динамика изменения профиля распределения облученности в фокальном пятне оптимальной ($F_{opt} = 125$ mm) (a) и короткофокусной ($F = 85$ mm) (b) ЛФ и движения пятна по поверхности СЭ в зависимости от угла разориентации пары ЛФ–СЭ от направления на Солнце. 1 — $\alpha = 0^\circ$ (точная ориентация), 2 — $\alpha \approx 0.5^\circ$, 3 — $\alpha \approx 1.1^\circ$ (предельно допустимый угол разориентации).

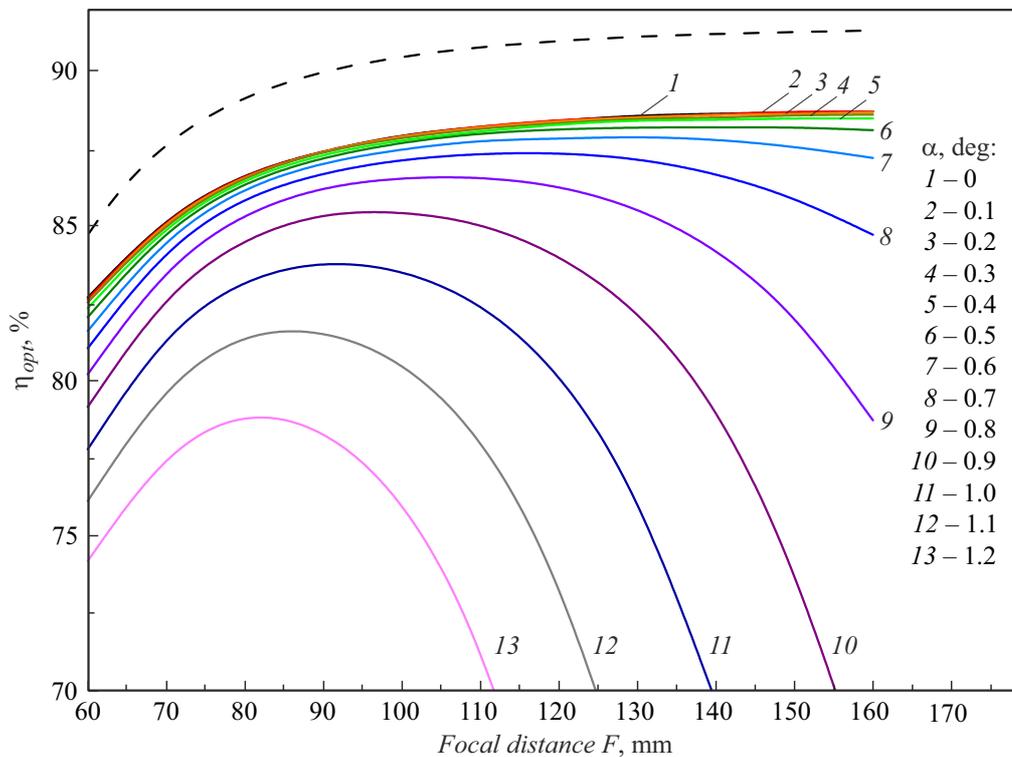


Рис. 3. Зависимости оптической эффективности линзы Френеля от проектного фокусного расстояния F и угла разориентации α пары ЛФ–СЭ от направления на Солнце. Оценки выполнены для ЛФ с погрешностями формы (размер 60×60 mm, шаг профиля преломляющих граней $t = 0.35$ mm). Оценки приведены для ЛФ, имеющей скругления вершин и впадин зубцов (ширина зоны скруглений $5 \mu\text{m}$), отклонения формы преломляющих граней (среднестатистическая величина отклонения углов наклона зубцов ЛФ ± 5 arcmin) и шероховатости оптических поверхностей (не более $0.1 \mu\text{m}$) [4,5]. Зависимость для „идеальной“ ЛФ представлена штриховой линией.

ся, а оптическая эффективность η_{opt} ЛФ уменьшаться (рис. 1), что означает снижение оптической мощности на поверхности СЭ и его фототока. Однако следует контролировать еще и локальную кратность концентрирования C_{local}^{max} . Так, сокращая F до 85 mm и жертвуя око-

ло 1.5–2% по оптической эффективности ($\eta_{opt} \approx 87\%$), получаем рост C_{local}^{max} с 2200X до 3230X (т.е. более чем на 45%) (рис. 1, 2). Соответственно уровень локальной генерации тока также пропорционально возрастет, увеличивая долю резистивных потерь мощности в СЭ [1],

что при определенных структурных решениях для СЭ может отрицательно сказываться на КПД ФЭМ, т.е. на его энерговыработке.

В условиях реальной эксплуатации (при слежении системы за Солнцем) оптическая эффективность ЛФ будет зависеть от угла разориентации α . Профиль распределения энергетической освещенности в фокусе ЛФ будет изменяться по мере роста α с характерным увеличением и размера пятна (его размытием), и уровня пиковой локальной облученности (рис. 2). При незначительных отклонениях от точного положения ($\alpha = 0-0.4^\circ$) оптическая эффективность ЛФ монотонно падает при всех F (рис. 3). В то же время уже при $\alpha \geq 0.5^\circ$ на зависимостях $\eta_{opt}(F)$ начинает проявляться максимум, который сдвигается в область более коротких фокусов с ростом угла разориентации. Одновременно начинает проследиваться выход части излучения за пределы поверхности СЭ. Для линзы с $F = 85 \text{ mm}$ при $\alpha = 1.1^\circ$ (следует рассматривать как предельный угол) оптическая эффективность η_{opt} составит чуть более 81% (0.93 от начального уровня) при прогнозируемом (допустимом) уровне ошибок формы преломляющих граней [4,5], т.е. ожидаемое падение фототока СЭ не превысит 10% относительно величины для оптимальной ЛФ ($F_{optim} = 125 \text{ mm}$), что находится в пределах обсуждаемых в литературе уровней [1]. Таким образом, найденное решение (рис. 3) — $F = 85 \text{ mm}$ для ЛФ типа „силикон на стекле“ с апертурой $60 \times 60 \text{ mm}$ — следует считать наилучшим и с точки зрения функциональных возможностей модулей (допустимый угол разориентации $\alpha = 1.1^\circ$ при падении оптической эффективности ЛФ или фототока СЭ до 10% от максимального значения, регистрируемого при точной ориентации), и с точки зрения их материалоемкости и веса (уменьшение строительной высоты модуля на $\sim 32\%$ позволит уменьшить его вес на $\sim 5\%$, а расход алюминиевого корпусного материала — на $\sim 30\%$).

Дальнейшее сокращение фокусного расстояния линзы и высоты модуля является нецелесообразным из-за значительного снижения оптической эффективности ЛФ как в положении $\alpha = 0^\circ$ (точная ориентация), так и при предельно допустимых углах разориентации. Здесь будет возрастать уровень локальной энергетической освещенности в центре фокального пятна (рис. 1) и связанное с этим повышение омических потерь в СЭ, что может отразиться на снижении ресурса элементов из-за световой деградации просветляющих покрытий и контактов при сверхвысоких облученностях.

Очевидным и часто рассматриваемым решением по расширению разориентационных угловых возможностей ФЭМ при одновременном увеличении средней (геометрической) кратности концентрирования излучения является встраивание элементов вторичной оптики, что требует дополнительных исследований с учетом обозначенных компромиссных решений.

Таким образом, в работе представлены ключевые аспекты при поиске компромиссных вариантов для

концентраторных ФЭМ, при которых обеспечивается снижение их конструкционной высоты, материалоемкости и веса. Предложен вариант по уменьшению конструкционной высоты модуля с сохранением основных оптико-энергетических показателей для концентратора типа „линза Френеля“. Обоснован практический вариант по снижению конструкционной высоты модуля на основе ЛФ с апертурой $60 \times 60 \text{ mm}$ на $\sim 32\%$ (с 125 до 85 mm) при сохранении оптической эффективности ЛФ более 83% с обеспечением средней (геометрической) кратности концентрирования излучения на СЭ более 100X при допустимых углах разориентации до 1.1° .

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] *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
- [2] M. Wiesenfarth, I. Anton, A.W. Bett, *Appl. Phys. Rev.*, **5**, 041601 (2018). DOI: 10.1063/1.5046752
- [3] 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
- [4] M.Z. Shvarts, V.M. Andreev, V.S. Gorohov, V.A. Grilikhes, A.E. Petrenko, A.A. Soluyanov, N.H. Timoshina, E.V. Vlasova, E.M. Zaharevich, in *Proc. of the 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conf.* (IEEE, 2008), p. 1–6. DOI: 10.1109/PVSC.2008.4922751
- [5] M.Z. Shvarts, A.A. Soluyanov, *Adv. Sci. Technol.*, **74**, 188 (2010). DOI: 10.4028/www.scientific.net/AST.74.188
- [6] 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 [Е.А. Ionova, N.Yu. Davidiyuk, N.A. Sadchikov, A.V. Andreeva, *Tech. Phys.*, **66**, 1208 (2021). DOI: 10.1134/S1063784221090073].
- [7] А.В. Чекалин, А.В. Андреева, Н.Ю. Давидюк, Н.С. Потапович, Н.А. Садчиков, В.М. Андреев, Д.А. Малевский, *ЖТФ*, **91** (6), 915 (2021). DOI: 10.21883/JTF.2021.06.50859.314-20 [A.V. Chekalin, A.V. Andreeva, N.Yu. Davidiyuk, N.S. Potapovich, N.A. Sadchikov, V.M. Andreev, D.A. Malevskii, *Tech. Phys.*, **66**, 857 (2021). DOI: 10.1134/S1063784221060050].
- [8] Н.А. Садчиков, Н.С. Потапович, Д.А. Малевский, Н.Ю. Давидюк, А.В. Андреева, А.В. Чекалин, *ЖТФ*, **93** (6), 809 (2023). DOI: 10.21883/JTF.2023.06.55606.239-22 [N.A. Sadchikov, N.S. Potapovich, D.A. Malevskii, N.Yu. Davidiyuk, A.V. Andreeva, A.V. Chekalin, *Tech. Phys.*, **68**, 751 (2023). DOI: 10.21883/TP.2023.06.56529.239-22].
- [9] Н.С. Потапович, Н.Ю. Давидюк, В.Р. Ларионов, В.П. Хвостиков, *ЖТФ*, **90** (12), 2118 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2020.12.50129.88-20 [N.S. Potapovich, N.Y. Davidiyuk, V.R. Larionov, V.P. Khvostikov, *Tech. Phys.*, **65**, 2026 (2020). DOI: 10.1134/S1063784220120221].