

Линейные линзы Френеля с уменьшенной хроматической аберрацией для космических солнечных батарей

© 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 19 мая 2023 г.

В окончательной редакции 31 июля 2023 г.

Принято к публикации 30 октября 2023 г.

Предложена комбинированная линейная линза Френеля для использования в концентраторных модулях космического применения. В комбинированной линзе Френеля размер и фокусное расстояние каждой микропризмы подбираются индивидуально с учетом предложенных критериев, что позволяет существенно снизить спектральную неравномерность солнечного излучения в фокальном пятне на поверхности многопереходного солнечного элемента InGaP/InGaAs/Ge.

Ключевые слова: линейная линза Френеля, многопереходный солнечный элемент, концентраторы солнечного излучения, космические солнечные батареи.

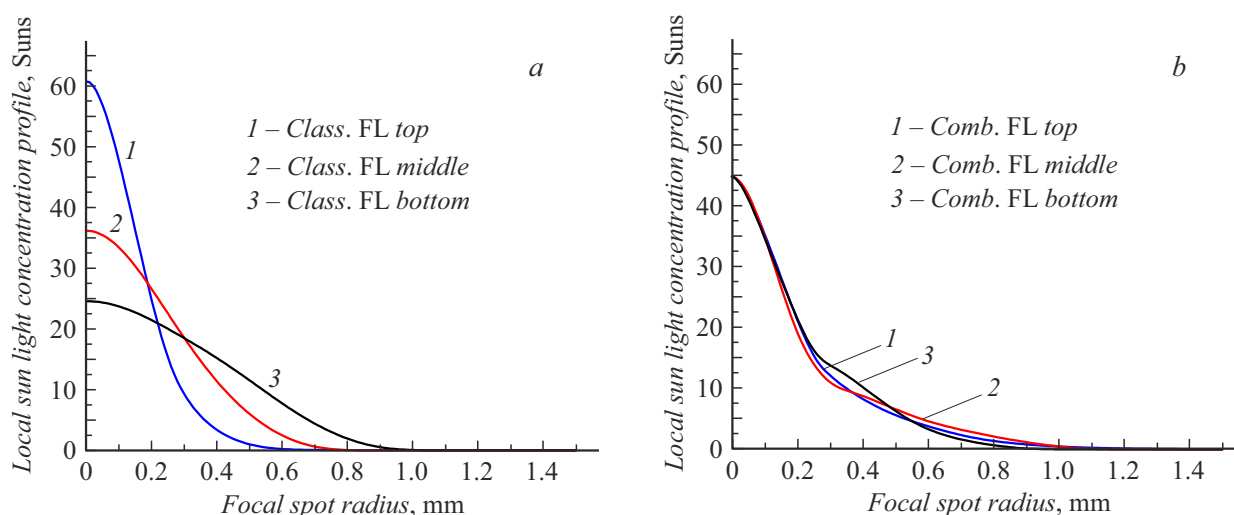
DOI: 10.61011/PJTF.2023.23.56855.173A

Системы концентрации солнечного излучения на основе линейных линз Френеля (ЛФ), работающие в паре с многопереходными солнечными элементами (МПСЭ), имеют реальную перспективу применения в солнечных батареях космических аппаратов. Использование концентраторных солнечных модулей позволяет снизить расход высокоэффективных, но при этом дорогостоящих МПСЭ пропорционально коэффициенту концентрации солнечного света [1–3]. Кроме того, концентрация солнечного света повышает эффективность и радиационную стойкость солнечных батарей. Это дает возможность использовать концентраторы солнечной энергии не только на околоземных орбитах, но и в дальних космических миссиях, где присутствуют высокие уровни радиации и низкая интенсивность солнечного света, приводящая к снижению удельной энерговыработки с единицы площади солнечных батарей при использовании плоских солнечных батарей без концентраторов. Ведущими научными лабораториями проведен ряд исследовательских проектов с концентраторами на основе линз Френеля [3–7], в том числе апробированных в успешном полете в дальний космос.

Классическая линейная ЛФ представляет собой массив, состоящий из множества преломляющих микропризм, изготовленных из силиконового компаунда методом полимеризации на стеклянном основании. Поперечный размер линейной ЛФ 25 мм, расчетное фокусное расстояние 32 мм. Шаг профиля Френеля равен 0.25 мм. Геометрическая концентрация такой ЛФ составляет 5–8 крат в зависимости от размера МПСЭ (поперечный размер 3–5 мм). При разработке такого типа концентраторов задачей было собрать солнечное излучение в центральной части МПСЭ в узкую полосу с целью достижения заданной точности ориентации космической батареи и снижения требуемой точности

монтажа солнечных элементов на теплоотводящем основании в составе солнечной батареи [1–3].

Главным фактором, снижающим эффективность линз Френеля в составе концентраторных систем при низких кратностях концентрирования солнечного излучения, является хроматическая аберрация. В МПСЭ фоточувствительные $p-n$ -переходы соединены последовательно. Поэтому спектральная неоднородность в профиле распределения солнечного излучения на поверхности МПСЭ в поддиапазонах, соответствующих спектральной фоточувствительности каждого $p-n$ -перехода в составе МПСЭ InGaP/InGaAs/Ge, приводит к ограничению суммарного фототока и КПД модулей. Так, при использовании исследуемых ранее линейных линз Френеля [1,3] с постоянным шагом 0.25 мм в центре фокального пятна разница в значениях максимальной и минимальной интенсивностей солнечного излучения для трех поддиапазонов солнечного спектра AM0 (1367 W/m^2) составляет десятки процентов [3]. Такая же пропорциональная разница существует в распределении плотности фототока для отдельных $p-n$ -переходов МПСЭ. Минимальное значение величины солнечного излучения, особенно в центре фокального пятна, будет ограничивать суммарный фототок МПСЭ, так как на центральную часть МПСЭ попадает максимальная часть сфокусированного солнечного излучения (см. рисунок, а). В ряде работ предложено решение данной проблемы путем создания линзы Френеля с более сложной конфигурацией, например путем формирования профиля Френеля, изготовленного из силиконового компаунда, на куполообразном прозрачном основании [4,7]. В работе [5] предложена конструкция составного концентратора солнечного излучения, состоящего из дифракционной решетки и линейной линзы Френеля, позволяющего осуществить спектральное и пространственное разделение солнечного излучения на поддиапазоны, соответствующие фото-



Профиль распределения локальной концентрации солнечной энергии на поверхности МПСЭ для классической линейной ЛФ с шагом 0.25 mm (a) и комбинированной линейной ЛФ с шагом 0.25 mm в центре и 0.15 mm с краю ЛФ (b).

Разница между максимальными и минимальными значениями локальной концентрации солнечного излучения в трех спектральных диапазонах в центре МПСЭ для двух типов ЛФ, а также масса двойной линейной ЛФ размером 100 × 50 mm с классическим и комбинированными профилями Френеля

Параметр	Шаг профиля Френеля для классической ЛФ и размер центральных микропризм для комбинированных ЛФ, mm			
	0.25	0.5	0.8	1.0
Разница в освещенности в центре МПСЭ для классической ЛФ, кратность	36.22	21.09	11.65	8.15
Разница в освещенности в центре МПСЭ для комбинированной ЛФ, кратность	0.051	0.103	0.799	0.845
Масса классической ЛФ (100 × 50 mm), g	2.020	2.380	2.810	3.120
Масса комбинированной ЛФ (100 × 50 mm), g	2.007	2.310	2.670	2.900

чувствительности Ge и GaAs $p-n$ -переходов. В обоих случаях происходит существенное усложнение конструкции концентраторного модуля.

В настоящей работе предлагается решение этой проблемы путем создания профиля линейной линзы Френеля, где отдельно подбираются параметры каждой микропризмы, при этом варьируются и фокусное расстояние, и шаг профиля Френеля. Также моделируется итоговый профиль распределения солнечной энергии на поверхности МПСЭ. Для расчета профиля распределения солнечного излучения в фокусе линзы Френеля использован метод трассировки лучей. Метод основан на прослеживании хода множества лучей от источника излучения через концентрирующую систему к приемнику (МПСЭ). Модель позволяет отследить ход всех лучей, идущих с поверхности солнечного диска с угловым размером 32 arcmin и приходящих на поверхность солнечного элемента.

При этом для расчета был введен критерий — поперечный размер фокального пятна с коэффициентом

перехвата 95% и минимальная разница в уровне кратности концентрации солнечного излучения для трех спектральных поддиапазонов (top, middle, bottom). Индивидуальный подбор параметров каждой микропризмы согласно упомянутым выше критериям обеспечил существенно более высокую спектральную и пространственную однородность излучения, формируемого ЛФ на всей поверхности МПСЭ. Так, при ширине центральных микропризм, равной 0.25 mm, и ширине крайних микропризм, равной 0.15 mm, величины пиковой концентрации солнечного излучения для трех спектральных поддиапазонов составляют около 45 крат с максимальной разницей 0.05 крат в центре фокального пятна, что показывает хорошую спектральную равномерность солнечного излучения для трех поддиапазонов, соответствующих спектральной фоточувствительности трех $p-n$ -переходов МПСЭ (см. рисунок, b и таблицу).

Были проведены расчеты и сформированы профили классических и комбинированных линейных ЛФ для широкого набора значений поперечных размеров

микропризм. Размер микропризм варьировался от 1 до 0.25 mm. Видно, что комбинированная линейная ЛФ обеспечивает существенно более высокую спектральную однородность солнечного излучения на всей поверхности МПСЭ по сравнению с классической ЛФ (см. таблицу).

В линейных линзах Френеля, используемых в космических аппаратах, применяются дорогостоящие сверхчистые силиконовые эластомеры, например Dow Corning DC 93-500 [5]. Это требование связано с необходимостью избежать дегазации и осаждения любых полимерных материалов на поверхности МПСЭ. Поэтому актуальным параметром для линейных линз Френеля является вес линзовых панелей, зависящий в первую очередь от геометрических размеров микропризм. В таблице приведены величины веса двоянной линейной линзы Френеля с двумя типами профиля Френеля размером 100 × 50 mm, где несущим основанием является кварцевое стекло толщиной 0.1 mm. Массы комбинированной и классической ЛФ с шагом 0.25 mm существенно ниже масс комбинированной и классической ЛФ с большим поперечным размером микропризм, что является существенным преимуществом для космических солнечных батарей и позволяет снизить их себестоимость. Однако для комбинированной ЛФ с любым размером микропризм величина спектральной неоднородности солнечного излучения в несколько раз ниже, чем для классической ЛФ (см. таблицу).

Предложенная концепция комбинированной линзы Френеля, где отдельно меняются поперечный размер и фокус каждой микропризмы, позволила значительно уменьшить влияние хроматических aberrаций на формирование профиля распределения локальной концентрации солнечного излучения на поверхности МПСЭ. При этом масса линзовой панели с комбинированным профилем ЛФ также меньше, чем в случае использования классического профиля. Для дальнейшего исследования данной тематики необходимо моделирование формирования профиля распределения плотности фототоков на поверхности МПСЭ, в том числе определение механизма потерь фототока при разных степенях спектральной и пространственной неоднородности падающего солнечного излучения.

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. Romyantsev, O.I. Chosta, V.A. Grilikhes, N.A. Sadchikov, A.A. Soluyanov, M.Z. Shvarts, V.M. Andreev, in *Proc. of 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conf.* (IEEE, 2002), p. 1596–1599. DOI: 10.1109/pvsc.2002.1190920
- [2] Zh.I. Alferov, V.M. Andreev, V.D. Romyantsev, in *High-efficient low-cost photovoltaics*, ed. by V. Petrova-Koch, R. Hezel, A. Goetzberg, Springer Ser. in Optics Sciences (Springer, Berlin–Heidelberg, 2009), vol. 140, p. 101–141. DOI: 10.1007/978-3-540-79359-5_8
- [3] V.S. Kalinovskii, E.A. Ionova, A.V. Andreeva, E.V. Kontrosh, V.M. Andreev, *AIP Conf. Proc.*, **2149**, 070007 (2019). DOI: 10.1063/1.5124206
- [4] M. O'Neill, in *4th Int. Conf. on solar concentrators* (El Escorial, Spain, 2007). <https://www.markoneill.com/ICSC4-CMLMJ-2007.pdf>
- [5] C. Michel, J. Loicq, F. Languy, S. Habraken, *Solar Energy Mater. Solar Cells*, **120**, 183 (2014). DOI: 10.1016/j.solmat.2013.08.042
- [6] M.F. Piszczor, S.W. Benson, D.A. Scheiman, D.B. Snyder, H.J. Fincannon, S.R. Oleson, G.A. Landis, in *2008 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conf.* (IEEE, 2008), p. 1–5. DOI: 10.1109/pvsc.2008.4922856
- [7] M.J. O'Neill, M.F. Piszczor, M.I. Eskenazi, A.J. McDaniel, P.J. George, M.M. Botke, H.W. Brandhorst, D.L. Edwards, D.T. Hoppe, *Proc. SPIE*, **5179**, 116 (2003). DOI: 10.1117/12.505801