

Поиск оптимального решения для оптической системы „micro-CPV“-модуля

© С.А. Левина, А.А. Солюянов, М.З. Шварц

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: levina@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 12 мая 2023 г.

В окончательной редакции 31 июля 2023 г.

Принято к публикации 30 октября 2023 г.

Проведено исследование оптико-энергетических характеристик оптической части микроконцентраторного модуля и осуществлен поиск оптимального дизайна малоразмерных плоско- и двояковыпуклых линз по критерию „максимум средней концентрации солнечного излучения в фокальном пятне минимального диаметра“. Результаты оптимизации линз показали, что оптимальным решением для micro-CPV-модуля является оптическая система на основе массива из двояковыпуклых линз. Такие линзы обладают лучшим потенциалом для micro-CPV-концепции по сравнению с плосковыпуклыми линзами сравнимой апертуры: формируют пятно сконцентрированного излучения меньшей площади на более коротком фокусном расстоянии.

Ключевые слова: фотовольтаика, микроконцентраторный фотоэлектрический модуль, многопереходный солнечный элемент, оптико-энергетические характеристики оптических систем, плосковыпуклая линза, двояковыпуклая линза.

DOI: 10.61011/PJTF.2023.23.56851.94A

Тенденции в современной концентраторной фотовольтаике последнего времени связаны с постепенным переходом ко все более компактным модулям, которые будут сформированы на основе малоразмерных короткофокусных микроконцентраторов и фотопреобразователей солнечных элементов (СЭ) субмиллиметровых размеров [1–3]. Подход, называемый „micro-CPV“, помимо сокращения габаритов модуля позволяет существенно снизить тепловую нагрузку в каждой ячейке модуля при сохранении высокой средней концентрации солнечного излучения. Более однородное распределение тепла на единой теплоотводящей панели уменьшает влияние механических напряжений из-за несоответствия температурных коэффициентов расширения материалов полупроводника и теплоотвода, и, как результат, повышается надежность модуля [2,3]. Кроме того, может подавляться влияние латеральных токов на вольт-амперные характеристики [4], вызванное неоднородностью засветки СЭ. За счет снижения резистивных потерь от латеральных токов открывается путь к использованию альтернативных более дешевых электрических контактов, таких, например, как прозрачные проводящие слои. Негативное влияние „периферии“, характерное для стандартных модулей [5], также оказывается более слабым в случае концептуальных решений micro-CPV.

Следует отметить, что простая миниатюризация традиционных концентраторных модулей, оптимизированных под трехпереходные СЭ с площадью фоточувствительной поверхности, равной десяткам квадратных миллиметров, не всегда является приемлемым решением для реализации micro-CPV [6]. Уменьшение размеров компонентов модуля накладывает существенно больше ограничений и требований: изготовление прецизионной

микрооптики, манипулирование множеством взаимосвязанных элементов в модуле, интеграция микрочипов на больших площадях, позиционирование и оптическое согласование различных элементов с микрометрической точностью, так как даже малые отклонения способны значительно повлиять на выходные характеристики модуля. Поэтому цель исследования состоит в поиске оптимальной оптической системы, используемой в качестве концентратора солнечного излучения в составе micro-CPV-модуля.

В настоящей работе для micro-CPV-модуля рассматриваются оптические системы на основе одиночных плосковыпуклых или двояковыпуклых линз (ПВЛ и ДВЛ соответственно) с квадратной апертурой. В расчетной модели при поиске радиуса кривизны преломляющих поверхностей в качестве основных входных данных задавались спектральная зависимость показателя преломления оптического материала (силикон Wacker 604), спектр солнечного излучения в диапазоне 300–1800 nm (диапазон спектральной чувствительности многопереходного СЭ), апертура (Ap) линзы из размерного ряда 20×20 , 15×15 , 12×12 , 10×10 , 8×8 , 5×5 mm, расстояние линза–СЭ. В случае ДВЛ принято, что радиусы входной и выходной преломляющих поверхностей (r) одинаковы. Локальные геометрические отклонения преломляющих поверхностей линзы от идеального сферического профиля не учитывались.

Моделирование основано на методе прослеживания световых лучей при прохождении сквозь оптическую систему. Излучение источника и его угловые размеры задаются потоком лучей, направляемых на входную апертуру концентратора. Концентратор представляется в виде набора плоских и криволинейных преломляющих по-

Оптико-энергетические характеристики линз для $k = 0.95$

Размер линзы, mm	Фокусное расстояние, mm		Максимальная средняя концентрация, крат		Диаметр пятна в фокусе, mm	
	ДВЛ	ПВЛ	ДВЛ	ПВЛ	ДВЛ	ПВЛ
20 × 20	40	60	229	129.8	1.42	1.88
15 × 15	30	45	232	129.9	1.06	1.4
12 × 12	24	36	235	129.7	0.84	1.12
10 × 10	20	30	237	129.5	0.70	0.94
8 × 8	16	24	240	129.9	0.56	0.74
5 × 5	10	15	251	129.5	0.34	0.46

верхностей заданного размера и разделяющих их оптических сред. Оптико-энергетические характеристики системы рассчитываются суммированием энергетических вкладов световых лучей в ячейки радиально-кольцевой сетки приемника с учетом всех видов оптических потерь, включая сферическую и хроматическую абберации. Наличие аббераций приводит к тому, что лучи, проходящие сквозь линзу, не собираются в одной точке, а пересекают оптическую ось в некоторой протяженной области. В этих условиях расчетное положение фокуса (f) в большинстве случаев не может служить ориентиром для получения координат размещения приемника, обеспечивающего оптимальные оптико-энергетические характеристики концентрирующей системы. С учетом этого при моделировании применялось парааксиальное приближение, при котором параметры оптической системы связаны через формулу тонкой линзы. При таком подходе радиус кривизны ПВЛ может оказывать значительное влияние на возникновение френелевских потерь вблизи периферийных участков линзы, вплоть до полного внутреннего отражения. Поэтому в случае ПВЛ были проведены оценки коэффициента пропускания в крайней угловой точке линзы в зависимости от величин r и f (см. рис. 1 и таблицу). Результаты показали, что для устранения влияния эффекта полного внутреннего отражения на краях ПВЛ (пропускание $> 95\%$, серая область на рис. 1) минимальный радиус кривизны линзы должен быть ограничен величиной $0.85Ar$. При этом фокусное расстояние ПВЛ оказывается на 30% больше, чем у ДВЛ при аналогичной апертуре. Таким образом, выбор в пользу более короткофокусной ДВЛ позволяет значительно уменьшить конструктивную высоту микро-CPV-модуля.

Расчет оптической системы начинается с фиксации заданного расстояния между вершиной выходной поверхности линзы и приемником, затем по формуле тонкой линзы рассчитывается начальное приближение радиуса линзы. При дальнейшей оптимизации радиус преломляющей поверхности варьируется до тех пор, пока не будет выполнен критерий минимума размера сфокусированного пятна на СЭ при максимальной средней кратности концентрирования излучения в нем. Такой подход в

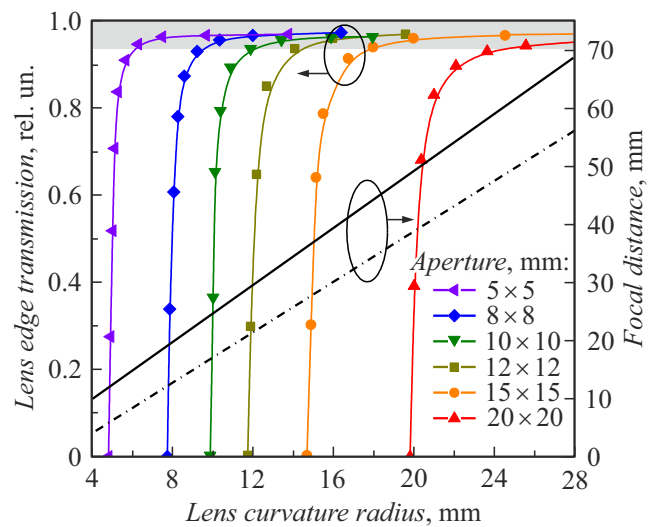


Рис. 1. Зависимости пропускания в угловой части ПВЛ от радиуса кривизны преломляющей поверхности для различных апертур и зависимости фокусного расстояния ПВЛ (сплошная линия) и ДВЛ (штрихпунктирная линия) от радиуса кривизны линзы.

случае микро-CPV-концепции позволяет не накладывать жесткие ограничения или требования по минимальной высоте модуля. На рис. 2 представлены результаты проведенной оптимизации для линз при различных коэффициентах перехвата (k) сконцентрированного излучения. Результаты показывают, что при оптимальных значениях радиуса преломляющих поверхностей средняя концентрация энергии в пятне для всех линз оказывается приблизительно одинаковой. То же самое можно сказать и об оптическом КПД, который составляет $\sim 94\%$ для обоих вариантов линз (ДВЛ и ПВЛ). Это объясняется тем, что при оптимизации отношение размера линзы к фокусному расстоянию остается фиксированным. Тем не менее при одинаковых k и габаритных размерах линз (рис. 2, а) средняя концентрация ПВЛ приблизительно в 1.75 раза ниже, а фокальное пятно пропорционально больше, чем у ДВЛ. Фокусное же расстояние, на кото-

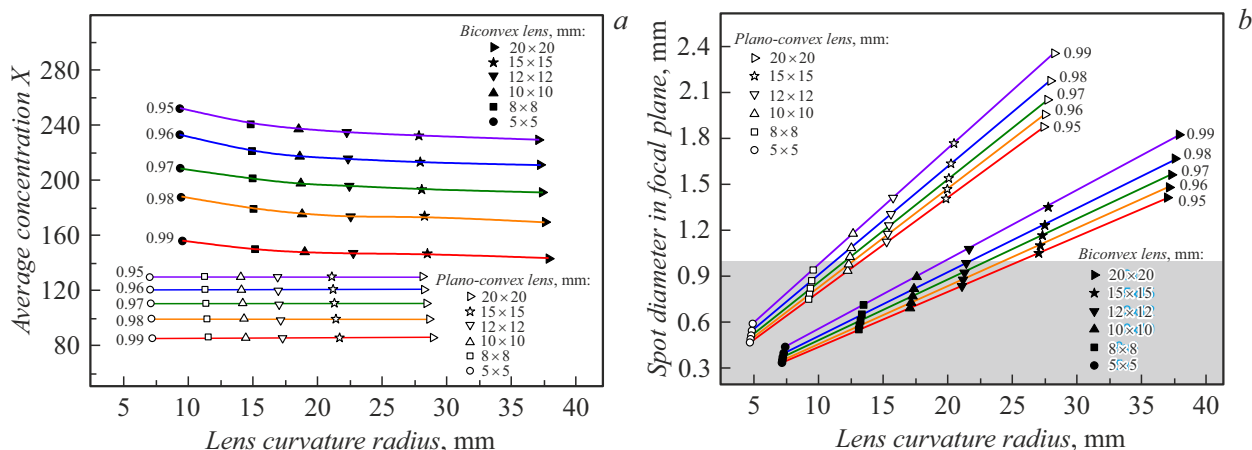


Рис. 2. Зависимости среднего коэффициента концентрации в пятне (а) и диаметра сфокусированного пятна (b) для ДВЛ и ПВЛ различных размеров от радиуса поверхности при коэффициентах перехвата сконцентрированного излучения $k = 0.95–0.99$.

ром достигается формирование минимального светового пятна, в 1.5 раза меньше в варианте ДВЛ.

Наиболее оптимальной с точки зрения диаметра сфокусированного пятна (рис. 2, b) также оказывается система с ДВЛ. Сравнительные оценки показали, что для СЭ субмиллиметрового размера следует подбирать линзы с апертурой менее 15 mm (серая область на рис. 2, b).

Таким образом, показано, что лучшим потенциалом для micro-CPV-концепции обладают оптические системы с ДВЛ, поскольку они формируют пятно сконцентрированного излучения меньшей площади на более коротком фокусном расстоянии в сравнении с аналогичными концентраторами типа ПВЛ.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00499 (<https://rscf.ru/project/23-29-00499/>).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] C. Domínguez, N. Jost, S. Askins, M. Victoria, I. Antón, AIP Conf. Proc., **1881** (1), 080003 (2017). DOI: 10.1063/1.5001441
- [2] K.-H. Yang, C.-Y. Chen, Y.-M. Lee, Z.-H. Shih, H.-F. Hong, 2019 IEEE Eurasia Conf. on IOT, communication and engineering (ECICE) (IEEE, 2019), p. 394–396. DOI: 10.1109/ECICE47484.2019.8942187
- [3] J.F. Martinez, M. Steiner, M. Wiesenfarth, S.W. Glunz, F. Dimroth, IEEE J. Photovolt., **9** (1), 160 (2019). DOI: 10.1109/JPHOTOV.2018.2877004
- [4] A. Ritou, P. Voarino, O. Racourt, Solar Energy, **173**, 789 (2018). DOI: 10.1016/j.solener.2018.07.074
- [5] P. Espinet, I. García, I. Rey-Stolle, C. Algora, M. Baudrit, AIP Conf. Proc., **1277** (1), 24 (2010). DOI: 10.1063/1.3509203

- [6] D. Li, L. Li, B. Jared, G. Keeler, B. Miller, M. Wood, C. Hains, W. Sweatt, S. Paap, M. Saavedra, C. Alford, J. Mudrick, U. Das, S. Hegedus, A. Tauke-Pedretti, J. Hu, T. Gu, Prog. Photovolt.: Res. Appl., **26** (8), 651 (2018). DOI: 10.1002/pip.3034