

## Вторичная оптика для системы „micro-CPV“-модуля

© С.А. Левина, Д.А. Малевский, М.А. Нахимович, А.А. Солуянов, М.З. Шварц

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

E-mail: levina@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 3 мая 2024 г.

В окончательной редакции 10 июля 2024 г.

Принято к публикации 30 октября 2024 г.

Проведено исследование вторичных оптических элементов для системы micro-CPV-модуля и осуществлен поиск оптимальной конфигурации для его концентраторной части. Результаты экспериментальных исследований, проведенные с помощью имитатора солнечного излучения, показали, что комбинация двояковыпуклой линзы и линзы-шара в качестве оптической части модуля обладает лучшим потенциалом для micro-CPV-концепции с точки зрения допустимых углов разориентации.

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

DOI: 10.61011/PJTF.2024.23.59409.6584k

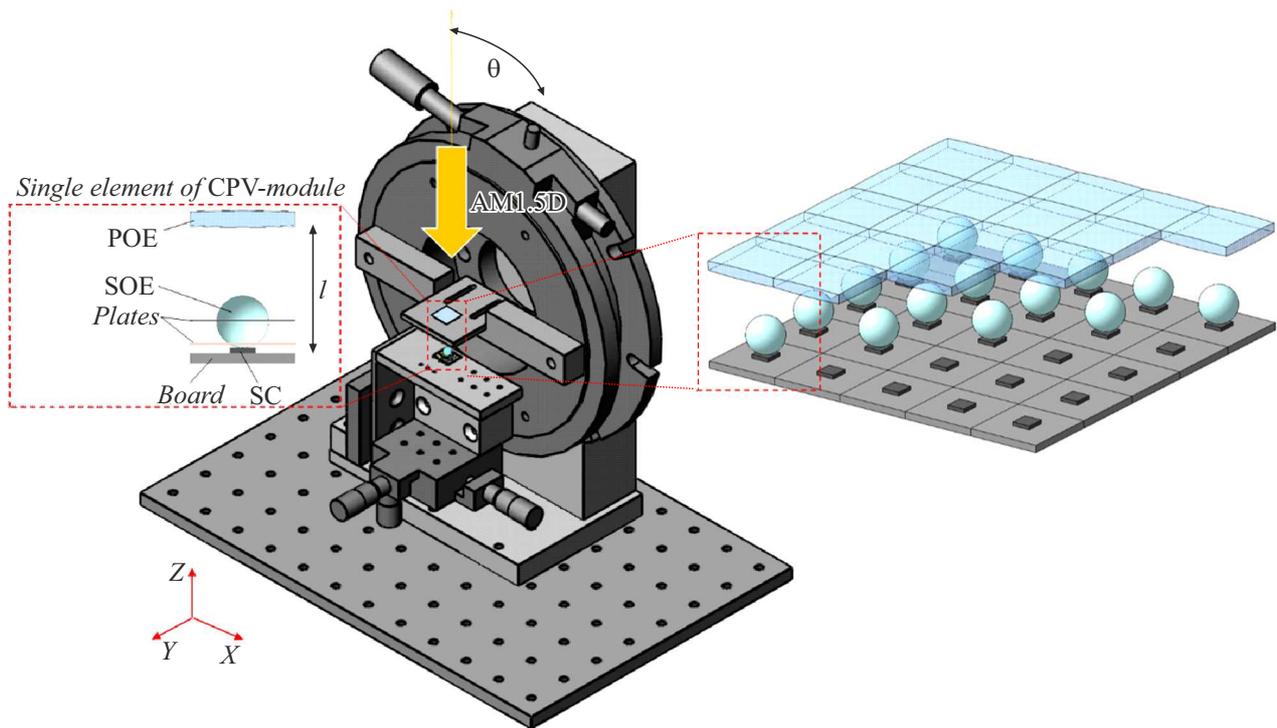
Технология фотоэлектрических микроконцентраторных („micro-CPV“) модулей базируется на использовании солнечных элементов (solar cell, SC) субмиллиметрового размера в комбинации с короткофокусной оптикой [1,2]. Главной задачей при разработке оптической системы для micro-CPV-модуля является получение высокой кратности концентрирования излучения в фокальном пятне диаметром менее 1 mm при коэффициенте перехвата излучения более 90%. Отвечающие этому требованию системы концентрирования обычно формируются на основе первичных оптических элементов в виде сферических линз или малоразмерных линз Френеля и вторичных оптических элементов сферической („шар“) или полусферической формы либо их близких аналогов (стеклянные фоконы, светодиодные линзы и т.п.).

В настоящей работе рассматривается вариант micro-CPV-модуля, формируемого на основе трехпереходных SC в комбинации с первичной и вторичной оптическими системами. Используемые GaInP/GaInAs/Ge SC с диаметром фоточувствительной поверхности 1 mm (фотоэлектрическая часть модуля) обеспечивали уровень генерации плотности фототока  $13.2 \text{ mA/cm}^2$  (AM1.5D,  $1000 \text{ W/m}^2$ ) при  $\sim 10\%$  затенении фотоприемной поверхности контактной сеткой.

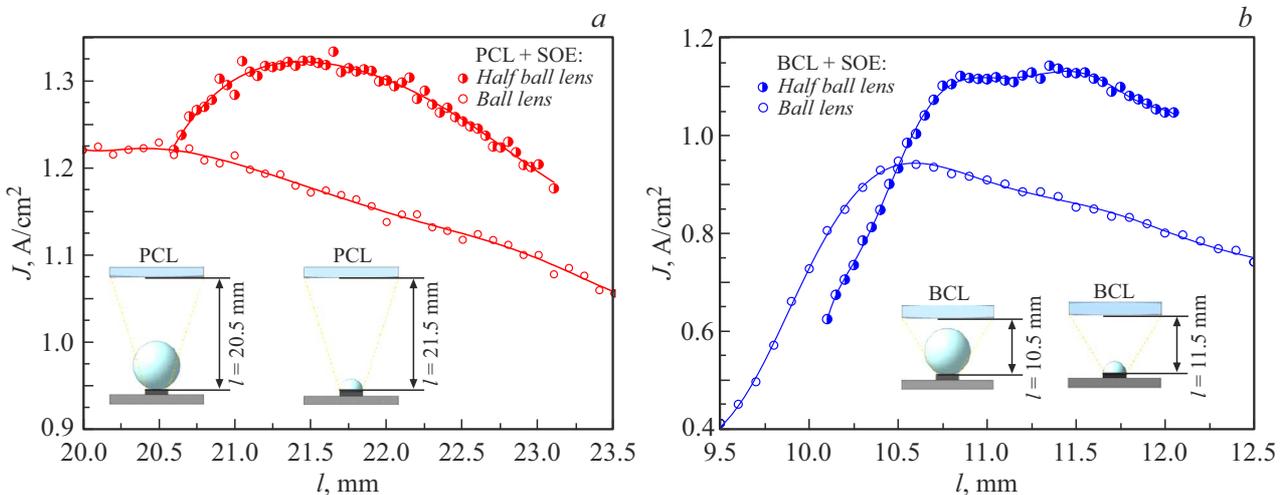
В качестве первичной оптики (primary optical element, POE) были выбраны одиночные плосковыпуклые (planoconvex lens, PCL) и двояковыпуклые (bi-convex lens, BCL) линзы с квадратной апертурой  $10 \times 10 \text{ mm}$  и радиусом кривизны 26 mm, выполненные из кварцевого стекла. Как показали предыдущие исследования [3], для SC субмиллиметрового размера такие линзы обладают лучшим потенциалом, поскольку обеспечивают большую среднюю кратность концентрирования в пятне меньшей площади на более коротком фокусном расстоянии в сравнении с аналогичными по габаритным размерам концентраторами преломляющего/отражающего

или комбинированного типа [4]. Вторичные оптические элементы (secondary optical element, SOE) представлены в двух конфигурациях: 1) линза-шар (далее ball lens, BL) диаметром 2 mm, для фиксации которого была использована прижимная система; 2) линза в форме половины шара (далее half ball lens, HBL) диаметром 1 mm, которая приклеивается непосредственно на фоточувствительную поверхность SC оптическим компаундом. Объект исследования представлен в виде единичной ячейки micro-CPV-модуля POE–SOE–SC, закрепленной на микрометрических трансляторах и гониометре (рис. 1), что позволяет прецизионно контролировать перемещение объекта в трех плоскостях, а также отклонение от нормали падающего излучения (угол разориентации  $\theta$ ).

Для проведения экспериментальных исследований был использован лабораторный имитатор солнечного излучения, формирующий коллимированный световой поток со спектром AM1.5D и энергетической освещенностью  $750 \text{ W/m}^2$  в плоскости расположения концентрирующих элементов micro-CPV-модуля. Несколько заниженный (по сравнению со стандартным —  $1000 \text{ W/m}^2$ ) уровень освещенности определялся светофильтрами, обеспечивающими качественное (по классу А) воспроизведение спектрального состава излучения имитатором, и не оказывал влияния на проводимые в работе сравнительные оценки систем концентрирования излучения. На рис. 2, 3 и в таблице представлены приведенные (нормированные) к условиям облученности  $1000 \text{ W/m}^2$  значения плотности фототока. Поиск плоскости наилучшей установки оптических компонентов модуля проводился экспериментально посредством изменения расстояния ( $l$ ) между POE и SC при использовании различных SOE, располагаемых непосредственно над поверхностью приемника излучения (см. рис. 2 и таблицу). Одновременно контролировались и разориентационные характеристики micro-CPV-модуля. Таким образом, установленному оптимальному расстоянию  $l$  для системы POE–SOE–SC



**Рис. 1.** Изображение единичного элемента модуля POE–SOE–SC (слева), зафиксированного на трансляторах и в гониометре.  $l$  — расстояние между поверхностью POE и SC,  $\theta$  — угол разориентации единичного элемента модуля относительно нормали падающего параллельного светового потока (спектр AM1.5D). Справа схематично показан один из вариантов micro-CPV-модуля.



**Рис. 2.** Зависимость плотности фототока SC от расстояния между поверхностью POE и SC в случае PCL (a) и BCL (b) при использовании различных SOE. На вставках изображены оптимальные расстояния между элементами модуля.

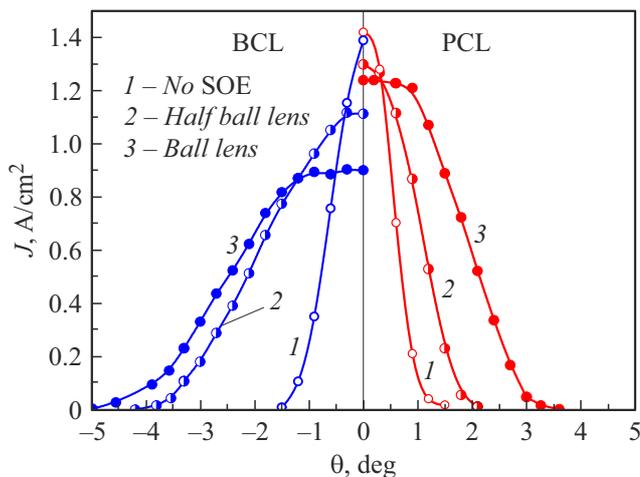
будет соответствовать минимальный размер светового пятна на фоточувствительной поверхности SC с максимальной средней кратностью концентрирования солнечной энергии в нем. В идентичных условиях эксперимента также тестировался micro-CPV-модуль, оснащенный только POE.

Сравнение значений плотностей фототока  $J$  (на рис. 2 и в таблице нормированы на площадь апертуры POE,

составляющей  $1 \text{ cm}^2$ ), полученных для всех вариантов исследуемых в работе оптических систем, показывает преимущество SOE типа HBL. Это выражается в более высоких регистрируемых значениях плотности фототока относительно данных, полученных при использовании SOE типа BL: на 10 и 20% для вариантов POE типа PCL и BCL соответственно. Следует отметить, что указанное преимущество определяется меньшими опти-

Параметры оптической системы микро-CPV-модулей и значения допустимых углов разориентации

Конфигурация оптической системы	Расстояние $l$ , mm	Плотность фототока $J$ , A/cm <sup>2</sup>	Допустимый угол разориентации $\theta$ , deg
PCL	21.5	1.41	0.3
PCL+HBL	21.5	1.32	0.5
PCL+BL	20.5	1.22	0.9
BCL	11.5	1.39	0.35
BCL+HBL	11.5	1.14	0.7
BCL+BL	10.5	0.94	1.5



**Рис. 3.** Зависимость плотности фототока SC от угла наклона модуля относительно нормали падающего излучения для различных комбинаций оптических элементов.

ческими потерями на границе HBL–SC ввиду непосредственного контакта указанных элементов. В варианте же BL–SC имеются дополнительные потери на границе стекло–воздух, так как фокусирующее излучение шар просто установлен на SC (без дополнительной среды типа оптического клея). Преимущество модуля с SOE типа BL заключается в меньшей конструктивной высоте (см. таблицу).

Разориентационные характеристики микро-CPV-модуля с SOE и без него при идентичных условиях эксперимента представлены на рис. 3. Результаты оценок „допустимого“ угла разориентации  $\theta$  для различных конфигураций модуля приведены в таблице. Добавление SOE позволило расширить диапазон отклонения от направления нормали к падающему излучению вплоть до  $\pm 1.5^\circ$  (в варианте оптической системы BCL+BL), что позволяет прогнозировать значительный рост вырабатываемой модулем мощности в режимах активного слежения на натурном Солнце. Сравнительные оценки (см. таблицу) показали, что наиболее оптимальной с точки зрения высокой геометрической концентрации и эффективности является оптическая система с линзой-шаром.

Таким образом, несмотря на то что дополнительные оптические элементы значительно усложняют процесс сборки модуля и требуют прецизионной точности при монтаже микролинз на поверхности SC, применение вторичной оптики оправдано, так как позволяет значительно расширить разориентационные характеристики модуля относительно направления на Солнце при сохранении высокой кратности концентрирования излучения. Заключение о наиболее оптимальных вариантах исполнения микро-CPV-модулей с PCL и BCL и вторичными полусферическими и сферическими элементами будет сделано по результатам дополнительных лабораторных и натуральных экспериментов.

### 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. Anton, AIP Conf. Proc., **1881**, 080003 (2017). DOI: 10.1063/1.5001441
- [2] A. Ritou, P. Voarino, O. Raccurt, Solar Energy, **173**, 789 (2018). DOI: 10.1016/j.solener.2018.07.074
- [3] С.А. Левина, А.А. Солуянов, М.З. Шварц, Письма в ЖТФ, **49** (23), 46 (2023). DOI: 10.61011/PJTf.2023.23.56851.94A [S.A. Levina, A.A. Soluyanov, M.Z. Shvarts, Tech. Phys. Lett., **49** (12), 42 (2023). DOI: 10.61011/TPL.2023.12.57581.94A].
- [4] K. Shanks, S. Senthilarasu, T.K. Mallick, Renew. Sust. Energy Rev., **60**, 394 (2016). DOI: 10.1016/j.rser.2016.01.089