

09 От сферы до полусферы: выбор вторичных концентраторных элементов для „micro-CPV“-модуля

© С.А. Левина, Д.А. Малевский, М.В. Нахимович, П.В. Покровский, 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 22 октября 2024 г.
В окончательной редакции 30 октября 2024 г.
Принято к публикации 31 октября 2024 г.

Рассматриваются вторичные концентрирующие элементы формфактора полная сфера (стеклянный шарик)—усеченная сфера—полусфера для системы micro-CPV-модуля с первичной фокусирующей оптикой типа двояковыпуклая короткофокусная линза. Показано, что максимальный средний коэффициент концентрации излучения в фокальном пятне достигается при использовании усеченной сферы с минимальным диаметром, но при относительно большом расстоянии от первичного концентратора до приемника излучения. Увеличение диаметра сферы при одновременном снижении среднего коэффициента концентрации излучения в фокальном пятне позволяет сократить указанное расстояние, т.е. общую высоту micro-CPV-модуля.

Ключевые слова: micro-CPV-модуль, двояковыпуклая линза, вторичный концентратор излучения, солнечный элемент, средний коэффициент концентрации, фокальное пятно.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.05.59898.20163

Основной базовой концепцией для микроконцентраторных („micro-CPV“) модулей является использование короткофокусной оптики, формируемой на основе первичных (Primary Optical Element, POE) и вторичных концентрирующих элементов (Secondary Optical Element, SOE), направляющих солнечное излучение на приемник (солнечный элемент, Solar Cell, SC) субмиллиметрового размера [1,2].

В работе для системы с POE типа двояковыпуклая кварцевая линза (Biconvex Lens, BCL) проводится выбор параметров полнотелых SOE с формой типа „стеклянный шарик“ (полная сфера, далее Full Ball Lens, FBL), усеченная сфера (Truncated Balls Lens, TBL), полусфера (Half Balls Lens, HBL) и поиск оптимальной комбинации расстояний POE–SOE–SC, при которой в плоскости рациональной установки приемника излучения будет формироваться световое пятно минимального размера с долей энергии 90–95% от прошедшей через первичный концентратор. При выполнении этого условия будут обеспечиваться максимальные значения среднего коэффициента концентрации в пятне, и соответственно должны формироваться условия для минимизации размера фоточувствительной поверхности SC.

В основе модели лежит прослеживание световых лучей, проходящих 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 поверхностей 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 сфериче-

скую и хроматическую aberrации. В работе [3] показано, что одним из эффективных (оптимальных) решений для micro-CPV-модуля является оптическая система на основе массива из двояковыпуклых линз, которые в сравнении с плосковыпуклыми линзами сравнимой апертуры формируют при более коротком фокусном расстоянии пятно сконцентрированного излучения меньшей площади.

Поэтому в настоящей работе именно BCL (апертура 10×10 mm, радиусы кривизны преломляющих поверхностей 26 mm) рассматривается при моделировании в качестве POE. SOE представлен в виде различных вариантов полной сферы, полусферы и сферы с плоской гранью в месте примыкания SC при радиусах кривизны преломляющей поверхности 0,5, 1, 1,5, 2 mm (далее обозначаются как диаметры $D = 1, 2, 3$ и 4 mm соответственно). Схема размещения SOE в выходном пучке BCL представлена на рис. 1, где при изменении расстояния от вершины выходной поверхности BCL до центра вторичной сферы можно обозначить следующие важные ее положения: F_{\min} и F_{\max} — ближняя и дальняя границы рабочей зоны, внутри которой обеспечивается полный перехват излучения SOE и транзитных (излучение проходит мимо сферы и не преломляется ею) оптических потерь нет; Z_1, Z_2 — расстояния, на которых самые крайние лучи, выходящие из BCL, касаются поверхности сферы в сходящемся и расходящемся пучке соответственно. Оптические потери на преломляющих поверхностях вторичной сферы для самых крайних лучей, выходящих из BCL, не превышают 5%.

Во всех рассмотренных случаях размещения вторичной оптики приемник излучения расположен в непосредственном контакте с поверхностью сферы, с ее выходной плоской гранью или с полусферой (рис. 2). В зависи-

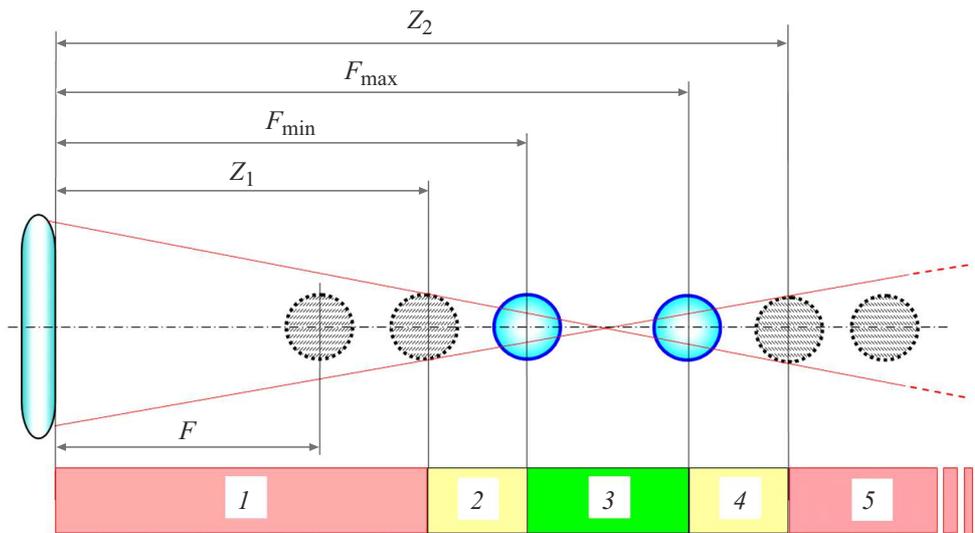


Рис. 1. Классификация зон размещения вторичной сферы. 1 — зона транзитных потерь в сходящемся пучке; 2, 4 — зоны повышенных оптических потерь крайних лучей пучка на поверхностях сферы; 3 — рабочая зона; 5 — зона транзитных потерь в расходящемся пучке. Цветной вариант рисунков представлен в электронной версии статьи.

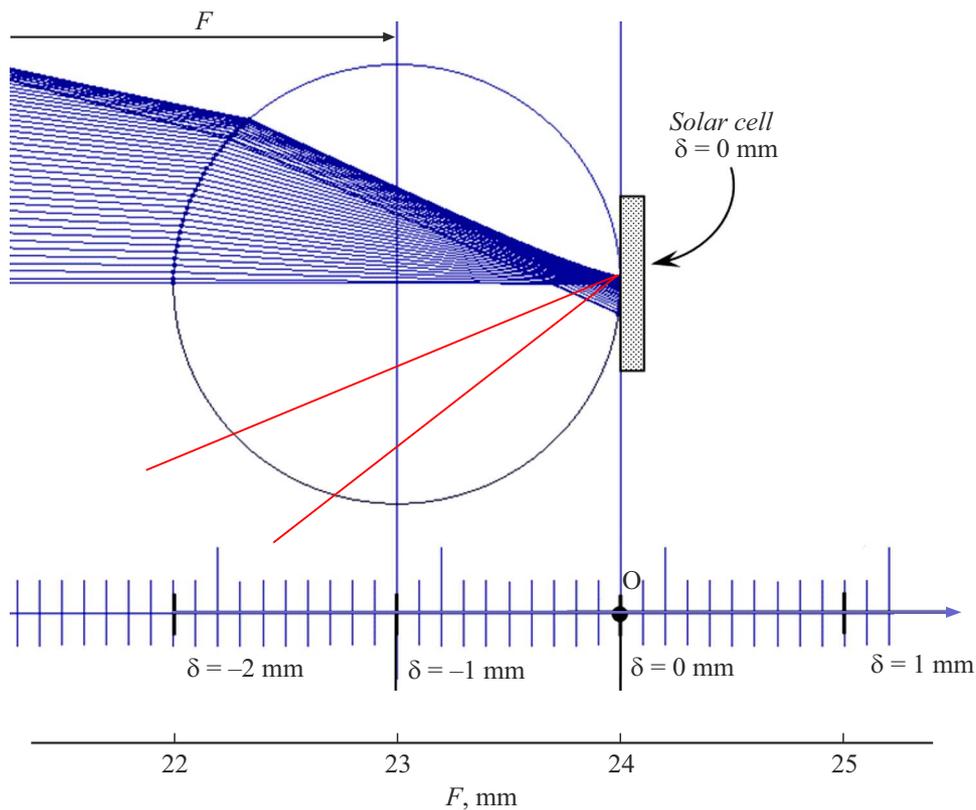


Рис. 2. Ход лучей через вторичный оптический элемент. δ — расстояние от вершины выходной поверхности FBL в направлении хода лучей от РОЕ, F — фокусное расстояние линзы. Красным отмечены лучи, испытывающие полное внутреннее отражение на выходной поверхности сферы.

мости от рассматриваемого вида вторичной оптики для величины δ , которой будет обозначаться расстояние от вершины выходной поверхности сферы в направлении хода лучей от РОЕ (иными словами, δ в данном случае

не что иное, как высота отсеченного у шара сегмента), возможны следующие варианты значений: a — полнотелая полная сфера ($\delta = \delta_{\text{FBL}} = 0$); b — полусфера ($\delta = \delta_{\text{HBL}} = -D/2$); c — усеченная сфера ($\delta_{\text{TBL}} < 0$).

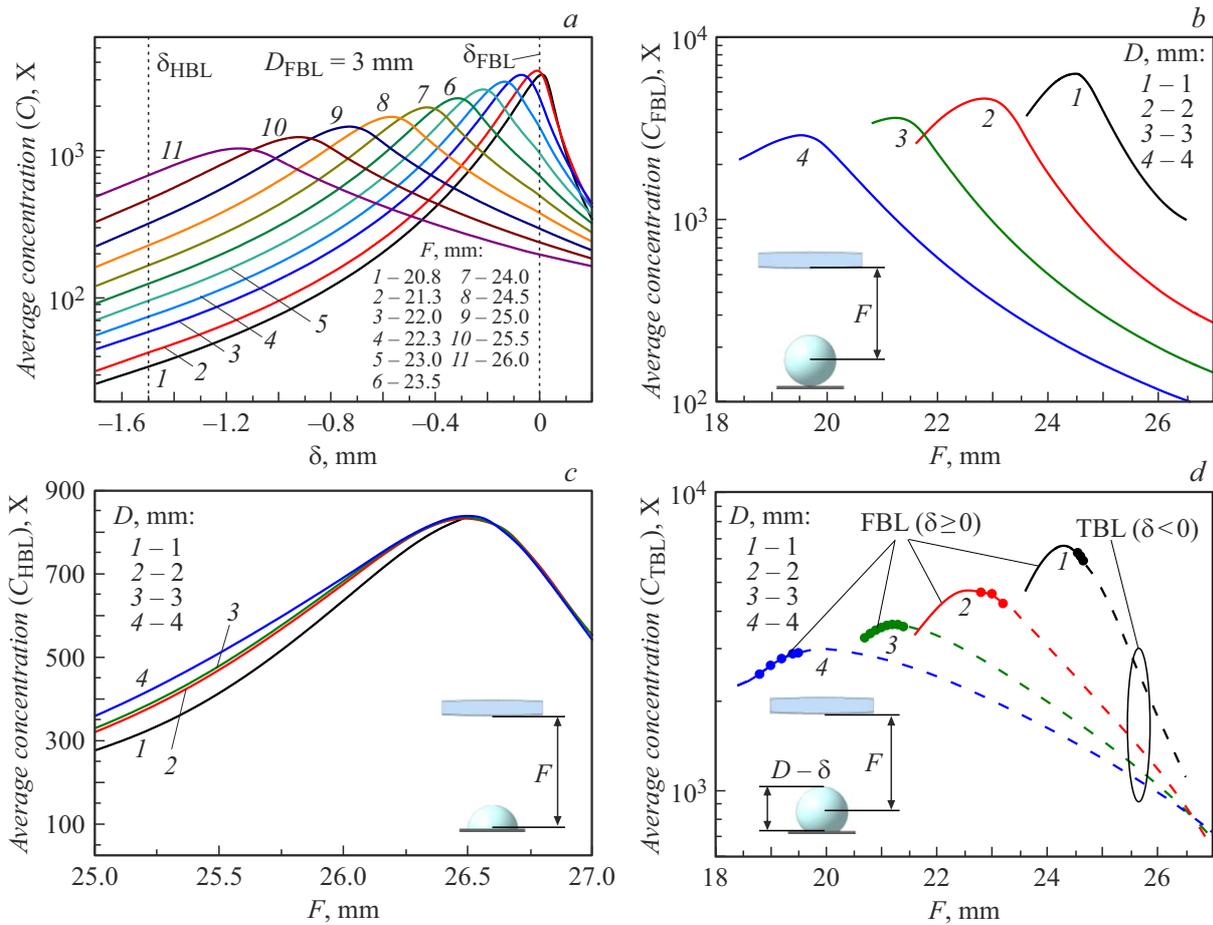


Рис. 3. Средний коэффициент концентрации в фокальном пятне в зависимости от положения плоскости сечения δ для SOE типа FBL с $D = 3$ mm (a) и от расстояния F для различных D при $\delta_{FBL} = 0$ (b), $\delta_{HBL} = -D/2$ (c). d — зависимость среднего коэффициента концентрации в фокальном пятне от расстояния F при $\delta > 0$ (сплошные линии), $\delta = 0$ (точки) для FBL и при $\delta < 0$ для TBL (штриховые линии). На вставках (b–d) изображены оптические схемы, состоящие из первичного и вторичного концентраторов.

Сечения δ_{HBL} и δ_{FBL} проходят через центр и вершину выходной поверхности сферы соответственно. Отрицательным значениям δ соответствует усеченный вид SOE, а положительным — зазор, возникающий между FBL и приемником.

Для удобства рассмотрения на рис. 2 отображается только половина лучей, проходящих через верхнюю часть BCL. Лучи через нижнюю часть BCL являются зеркальным отражением. Лучи, испытавшие полное внутреннее отражение на выходной поверхности сферы (красные линии на рис. 2), после отражения не прослеживались, и их возможное последующее преломление на границе сферы не рассматривалось.

По результатам проведенных расчетов были определены границы зон с повышенными оптическими потерями для крайних лучей на поверхностях SOE (зоны 2 и 4 на рис. 1), а также ближняя и дальняя границы рабочей зоны (зоны 1 и 5 на рис. 1, табл. 1). Величины F_{min} и F_{max} для FBL с $D = 1$ mm рассчитать не удалось. Установлено, что при таком диаметре не существуют

Таблица 1. Параметры рациональной плоскости установки SOE

Диаметр сферы D , mm	Z_1 , mm	F_{min} , mm	F_{max} , mm	Z_2 , mm
1	24.40	—	—	26.35
2	22.90	23.34	25.13	26.40
3	20.34	21.94	26.12	28.11
4	18.40	20.74	27.19	29.83

области, внутри которых оптические потери на преломляющих поверхностях вторичной сферы для самых крайних лучей, выходящих из BCL, не превышали бы 5%. Для всех остальных случаев ($D = 2, 3, 4$ mm) FBL теоретически может находиться на любом расстоянии от BCL в рабочей зоне с диапазоном расстояний $[F_{min}; F_{max}]$, в пределах которых энергетические потери в системе минимальны, а эффективность такой SOE соответствен-

Таблица 2. Средний коэффициент концентрации C (крат) и расстояние F (mm) для рациональной плоскости установки SC

Диаметр сферы D , mm	$\delta_{\text{FBL}} = 0$		$\delta_{\text{HBL}} = -D/2$		δ_{TBL}		Координата плоскости δ , mm
	C_{FBL}	F	C_{HBL}	F	C_{TBL}	F	
1	6288	24.55	836	26.5	6625*	24.35	0.010
2	4621	22.8	835	26.5	4710*	22.6	0.025
3	3603	21.2	838	26.5	3603*	21.2	0.000
4	2894	19.5	839	26.5	3005	20.0	-0.050

* При $\delta \geq 0$ для SOE рассматривается вариант FBL.

но максимальна. Вместе с тем следует отметить, что повышенные оптические потери в зонах 2 и 4 (рис. 1) относятся только к периферийным лучам пучков, тогда как остальные в подавляющем большинстве проходят через вторичный концентратор с достаточно высокой эффективностью. Поэтому целесообразно было расширить диапазон поиска оптимального положения сферы до граничных значений $[Z_1; Z_2]$.

Были получены зависимости среднего коэффициента концентрации в пятне, содержащем 95% сконцентрированного излучения, при различных значениях F в диапазоне $[Z_1; Z_2]$ (рис. 3, *a*). При этом значения среднего коэффициента концентрации отслеживались в следующих плоскостях по ходу прохождения лучей: вершина сферы (соответствует плоскости $\delta = \delta_{\text{FBL}} = 0$ mm), центр сферы (плоскость $\delta_{\text{HBL}} = -D/2$) и место расположения плоскости усечения (среза) сферы (δ_{TBL}).

На рис. 3, *a* приведен пример для случая $D = 3$ mm (аналогичные зависимости были получены для $D = 1, 2$ и 4 mm). Для каждой из выбранных плоскостей определялись соответствующие средние коэффициенты концентрации в пятне $C_{\text{FBL}}, C_{\text{HBL}}, C_{\text{TBL}}$ при различных диаметрах SOE (рис. 3, *b-d*). Результаты расчетов максимальных значений коэффициентов концентрации (C^{max}) для различных конфигураций вторичной оптики представлены в табл. 2. Установлено, что при SOE типа FBL с $D = 1, 2$ mm значения $C_{\text{FBL}}^{\text{max}}$ наблюдаются в случае, если сфера не касается приемника излучения и между ними имеется воздушный зазор $\delta_{\text{FBL}} = 0.01$ или 0.025 mm соответственно. Очевидно, что конфигурации со столь малым оптическим зазором между SOE и SC трудно реализуемы на практике. Поэтому варианты с оптическим контактом SOE–SC следует считать приоритетными и более технологичными при экспериментальном исполнении micro-CPV-модуля. Несмотря на максимумы для значений среднего коэффициента концентрации системах с FBL ($D = 1, 2$ mm), расстояния F , при которых такие значения достигаются, находятся за пределами диапазона рациональной установки SOE (табл. 1). А это означает значительный рост транзитных потерь: часть излучения, проходя мимо FBL, будет создавать рассеянный свет внутри

модуля и, попадая на электрогенерирующую плату, нагревать ее.

Расчеты показывают, что для рассматриваемой BCL с $R = 26$ mm и варианта SOE типа полная сфера координаты плоскости сечения с $C_{\text{FBL}}^{\text{max}}$ совпадают с таковыми для плоскости приемника при $D = 3$ mm, тогда как при $D = 4$ mm такая плоскость находится внутри SOE на расстоянии $\delta = -0.05$ mm. Соответственно в варианте SOE типа TBL с $\delta_{\text{TBL}} = -0.05$ mm будет обеспечиваться уменьшение светового пятна при одновременном росте средней кратности концентрирования излучения в нем по сравнению со случаем FBL аналогичного диаметра при расположенном на поверхности сферы SC ($\delta = \delta_{\text{FBL}} = 0$ mm). Однако наблюдаемый прирост величины средней кратности концентрирования излучения при использовании SOE типа TBL не превышает 3–5%, что делает нецелесообразным ее применение из-за сложностей в изготовлении оптики с формой „усеченная сфера“. С технологической точки зрения согласование оптической и электрической частей при монтаже micro-CPV-модуля оказывается в разы проще и дешевле с использованием SOE большего диаметра.

Следует заключить, что SOE типа полная сфера диаметром 3 mm является наиболее оптимальным вариантом для системы micro-CPV-модуля с первичным концентратором на основе кварцевой двояковыпуклой линзы с апертурой 10×10 mm, поскольку позволяет сохранять достаточно высокие значения максимального среднего коэффициента концентрации излучения в фокальном пятне (в сравнении с вариантом FBL с $D = 1$ mm). Одновременно обеспечивается уменьшение на 10–15% высоты модуля при практически отсутствующих транзитных потерях излучения. Предложенные подходы к поиску эффективного решения для оптической системы micro-CPV-модуля, очевидно, применимы при иных конструктивных параметрах POE (с другим радиусом кривизны преломляющих поверхностей) с сохранением принципов поиска оптимального диаметра полной сферы для SOE.

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] K.-H. Yang, C.-Y. Chen, Y.-M. Lee, Z.-H. Shih, H.-F. Hong, in *2019 IEEE Eurasia Conf. on IOT, Communication and Engineering (ECICE)* (IEEE, 2019), p. 394–396. DOI: 10.1109/ECICE47484.2019.8942187
- [3] С.А. Левина, А.А. Солюянов, 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].