

07

Линейные линзы Френеля с оптимизированным распределением плотности фототока на поверхности многопереходных солнечных элементов

© Н.А. Садчиков, А.В. Андреева

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: N.A.Sadchikov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 29 июля 2025 г.

В окончательной редакции 20 августа 2025 г.

Принято к публикации 22 августа 2025 г.

Разработана комбинированная линейная линза Френеля с оптимизированным распределением плотности фототока в фокальном пятне для использования в концентраторных модулях космического применения. В комбинированной линзе Френеля фокусные расстояния каждой микропризмы подбираются индивидуально на основе предложенного алгоритма, что позволило уменьшить неоднородность в профиле распределения плотности фототока в центральной области на поверхности солнечных элементов InGaP/InGaAs/Ge и AlInGaP/AlInGaAs/InGaAs/Ge, а также увеличить пиковые значения плотности фототока в центре фокального пятна.

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

DOI: 10.61011/PJTF.2025.22.61586.20458

В течение многих лет рассматривается возможность применения в солнечных батареях космических аппаратов [1–8], в том числе апробированных в успешном полете в дальний космос [7,8], концентраторных фотоэлектрических модулей (КФЭМ) на основе линейных линз Френеля (ЛФ), работающих в паре с многопереходными солнечными элементами (МПСЭ). Использование КФЭМ позволяет снизить расход высокоэффективных, но при этом дорогостоящих МПСЭ пропорционально кратности концентрирования солнечного излучения (СИ) [1,2,4–8]. Линзовые панели с линейными ЛФ изготавливаются методом полимеризации радиационно стойкого силиконового компаунда между негативной мастер-матрицей, изготовленной с помощью алмазного микроточения, и тонким кварцевым стеклом, служащим основанием для силиконового компаунда с профилем Френеля. При крупносерийном производстве возможно использовать апробированную технологию изготовления полиуретановых копий с негативным профилем Френеля.

Наиболее важным преимуществом использования концентраторов СИ на основе ЛФ в солнечных батареях данного типа является повышение эффективности и радиационной стойкости за счет увеличения КПД МПСЭ при концентрировании СИ и уменьшения влияния на МПСЭ факторов воздействия космического пространства (потоки электронов и ионов высокой энергии и т.д.), что в свою очередь существенно замедляет деградацию полупроводниковых структур МПСЭ. Современные МПСЭ достигают пиковых значений КПД при кратностях концентрации солнечного излучения свыше 100х, при этом заметный рост КПД начинается при

кратностях свыше 5х [2,3,6,7]. В то же время требования к массогабаритным параметрам КФЭМ космического применения ограничивают кратность концентрирования в пределах 10х, а фокусное расстояние ЛФ — величиной, сравнимой с апертурой ЛФ [1,2,4,6–8]. Поэтому важной задачей является разработка оптических концентраторов со спектральной однородностью и повышенной пиковой концентрацией СИ и плотностью фототока в центральной зоне фокального пятна.

При низких уровнях концентрации СИ на поверхности МПСЭ основными факторами, снижающими КПД концентраторных модулей, являются хроматическая аберрация, приводящая к неоднородности в профиле распределения СИ и плотности фототока для разных p – n -переходов [4,5], а также рекомбинационные потери носителей тока из-за низких уровней освещенности МПСЭ [2,9]. При этом чем ниже кратность концентрирования СИ, тем сильнее вклад рекомбинационных потерь. Использование короткофокусных ЛФ дополнительно усиливает негативное влияние хроматической аберрации [4].

В работах [5,10,11] была предложена методика снижения негативного эффекта хроматической аберрации в радиальных ЛФ за счет правильного выбора параметров профиля ЛФ (таблица углов с углами и размерами микропризм) при заданном размере ЛФ и ее фокусном расстоянии. Показатель преломления, значения которого выбираются из дисперсионной зависимости $n(\lambda)$ для оптического материала, является варьируемым параметром, используемым при формировании таблицы углов ЛФ. Критерием оптимизации является максимальная средняя концентрация излучения $C_{\max av}$, соответству-

ющая минимальному диаметру фокусного пятна $d_{\min}$. Было показано, что для выбранного материала и параметров ЛФ существует единственное значение показателя преломления n_{opt} для формирования профиля ЛФ, при котором обеспечивается достижение максимальных значений $C_{\max av}$ и $d_{\min}$.

В работе [4] данная методика была использована при формировании параметров короткофокусной линейной ЛФ с поперечным размером 25 mm и расчетным фокусным расстоянием 32 mm. Минимальный фототок обеспечивается средним p – n -переходом на основе InGaAs, работающим в спектральном диапазоне 640–900 nm, значение расчетного показателя преломления n_{opt} составило величину, равную величине показателя преломления при $n(\lambda) = 775$ nm при 50 °C.

В работах [4,12] рассматривается классическая короткофокусная линейная ЛФ с профилем, рассчитанным по принципу, предложенному в [5,10], который позволил достичь пиковой концентрации СИ в центре фокального пятна, достигающей величины 50 крат. Это означает, что кратность концентрации СИ находится в диапазоне, где КПД МПСЭ еще не достигают максимально возможных величин [3]. При этом из-за влияния хроматических aberrаций значения локальной концентрации СИ и, как следствие, плотности фототока для разных p – n -переходов различаются на десятки процентов на всей поверхности МПСЭ [4,12].

В данной работе предлагается оптимизированная методика уменьшения влияния хроматической aberrации, при которой для формирования профиля линейной линзы Френеля отдельно подбираются параметры каждой микропризмы (комбинированный тип ЛФ [11,12]). При этом варьируется только угол наклона микропризмы (фокусное расстояние) при постоянном шаге профиля Френеля, равном 0.25 mm, в отличие от варьирования фокусного расстояния и поперечного размера микропризмы, использованного в работе [12]. Значения параметров линейной ЛФ, использованные для расчетов, составляют следующие величины: поперечный размер линейной ЛФ 25 mm, расчетное фокусное расстояние 32 mm, размер фоточувствительной области МПСЭ 5×5 mm. Поперечный размер и фокусное расстояние линейной ЛФ были взяты на основании технического задания, предложенного промышленным партнером в рамках совместного проекта по разработке конструкции КФЭМ с использованием линейных ЛФ [4].

Для расчета профиля распределения солнечного излучения в фокусе линзы Френеля применяется метод трассировки лучей, используемый в работах [4,5,10–12]. При этом основным критерием для формирования профиля Френеля являются уменьшение разницы в величинах плотности фототока отдельных p – n -переходов в центре МПСЭ и минимальный поперечный размер фокального пятна для каждого p – n -перехода с коэффициентом перехвата СИ 90 %.

Формирование профиля линейной ЛФ проведено для МПСЭ с тремя p – n -переходами InGaP/GaAs/Ge и че-

тырмя p – n -переходами AlInGaP/AlInGaAs/InGaAs/Ge, значения спектральных чувствительностей которых взяты из работ [13,14]. Плотности фототока для каждого p – n -перехода данных МПСЭ приведены в табл. 1 для космического спектра AM0, 1366.1 W/m².

Программа для расчета параметров ЛФ позволяет анализировать влияние разных вариантов линейной ЛФ (как классической, так и комбинированной [11,12]) на формирование профиля распределения СИ и плотности фототока как целой ЛФ, так и отдельных микропризм. При формировании профиля комбинированной ЛФ за основу берется таблица углов классической ЛФ и соответствующие профили для каждого p – n -перехода. Далее начиная с крайней микропризмы осуществляется вариация углов наклона микропризм попеременно в сторону увеличения и уменьшения относительно значения для микропризмы с тем же расстоянием от центра, что и для классического профиля ЛФ. При подборе угла наклона используется метод градиентного спуска. На первом этапе достигается минимальное значение поперечного размера фокального пятна для каждой микропризмы. На втором этапе расчетов вариация углов наклона осуществляется с меньшей амплитудой с целью достижения минимальной разницы в величинах плотности фототока в центре МПСЭ для целой ЛФ.

На рис. 1 приведены профили распределения плотности фототока на поверхности МПСЭ InGaP/GaAs/Ge двух типов: для классической (а) и комбинированной (б) линейных ЛФ. На рис. 2, а, б показаны соответствующие профили распределения плотности фототока, формируемые крайней микропризмой линейной ЛФ.

На рис. 3 и 4 приведены профили распределения плотности фототока на поверхности МПСЭ AlInGaP/AlInGaAs/InGaAs/Ge для целых классической (а) и комбинированной (б) линейных ЛФ (рис. 3) и распределения плотности фототока, формируемые крайней микропризмой линейной ЛФ для классической (а) и комбинированной (б) линейных ЛФ (рис. 4).

Следует отметить, что крайние микропризмы обладают наибольшим углом наклона, что обуславливает максимальную хроматическую aberrацию от крайней области ЛФ (рис. 2, а и 4, а) и, как следствие, максимальную спектральную и пространственную неоднород-

Таблица 1. Величины плотности фототока для p – n -переходов МПСЭ двух типов: InGaP/GaAs/Ge и AlInGaP/AlInGaAs/InGaAs/Ge (равномерное освещение, спектр AM0, 1366.1 W/m²)

МПСЭ, 3 junction, p – n -переход	Плотность фототока, mA/cm ²	МПСЭ, 4 junction, p – n -переход	Плотность фототока, mA/cm ²
InGaP	16.8	AlInGaP	14.3
GaAs	17.6	AlInGaAs	14.8
Ge	25.6	InGaAs	15.9
—	—	Ge	15.3

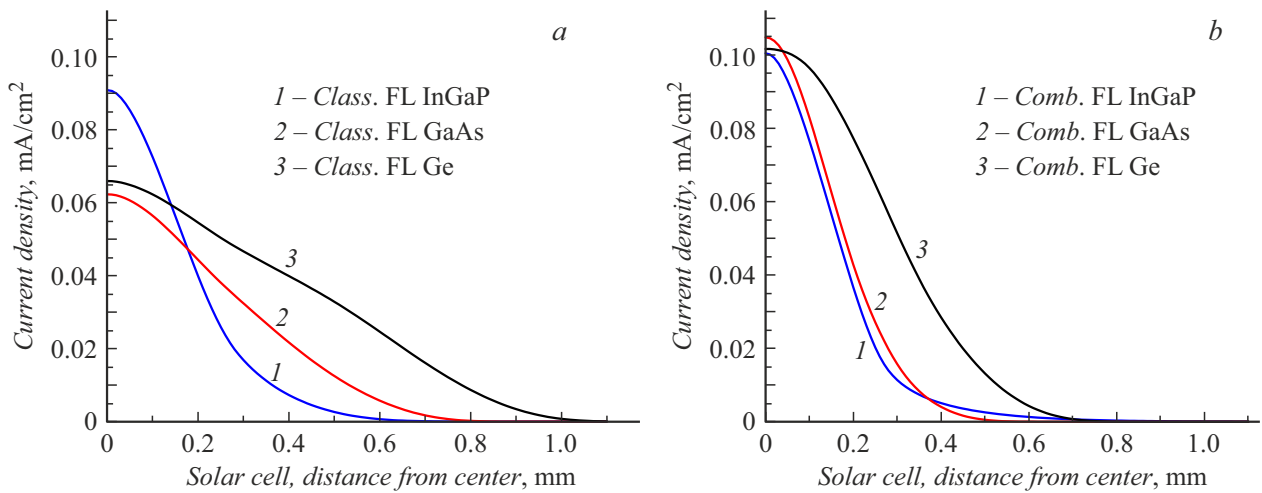


Рис. 1. Профили распределения плотности фототока на поверхности МПСЭ InGaP/GaAs/Ge от центра МПСЭ к краю. *a* — классическая ЛФ, *b* — комбинированная ЛФ.

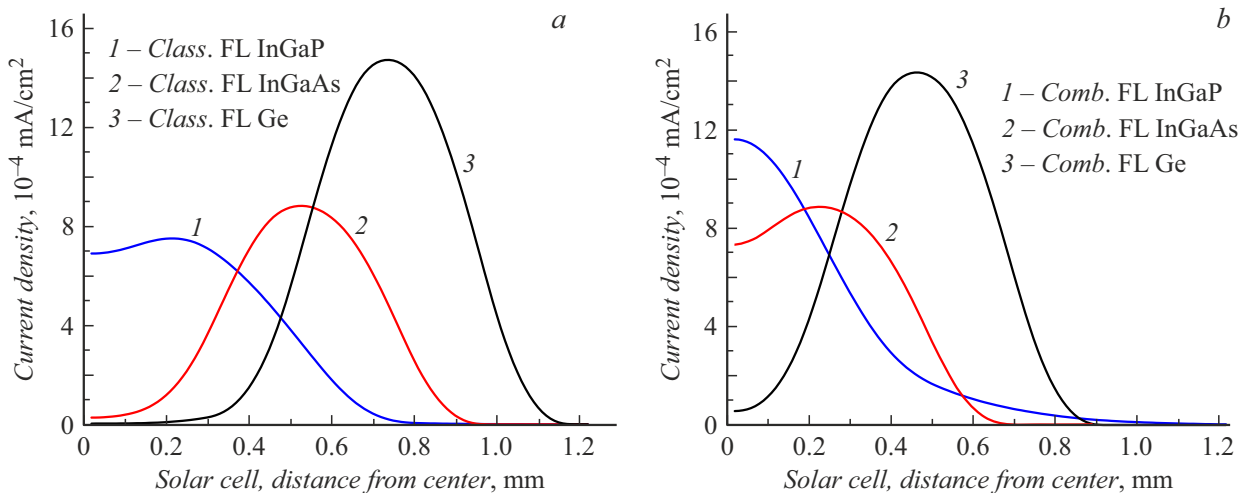


Рис. 2. Профили распределения плотности фототока на поверхности МПСЭ, формируемые крайней микропризмой линейной ЛФ, расположенной на наиболее удаленном участке от центра. *a* — классическая ЛФ, *b* — комбинированная ЛФ.

ность СИ в фокальном пятне целой ЛФ. Из рис. 2, *b* и 4, *b* видно, что подбор оптимального угла наклона для крайней микропризмы позволяет тем не менее уменьшить размер соответствующего фокального пятна для каждого p – n -перехода и уменьшить разницу в пиковых значениях плотности фототока соответствующего поддиапазона СИ. При движении от края к центру ЛФ поперечный размер фокального пятна, формируемого каждой микропризмой, и неоднородность плотности фототока уменьшаются для всех отдельных микропризм, что приводит к уменьшению размера фокального пятна и увеличению пиковых значений плотности фототока для целой ЛФ (рис. 1, *b* и 3, *b*). За счет этого происходит перераспределение СИ в центральную зону МПСЭ при использовании комбинированного профиля ЛФ.

При классическом подходе к формированию профиля короткофокусной линейной ЛФ углы наклона

каждой микропризмы не оптимальны с точки зрения упомянутых выше критериев, поскольку при варьировании показателя преломления как расчетного параметра [4,5,11,12] и формировании таблицы углов сразу для целой ЛФ за один этап был достигнут предел в уменьшении влияния хроматической аберрации в профиле распределения СИ и плотности фототока на поверхности МПСЭ.

Данные по локальной кратности концентрирования СИ являются промежуточными и используются для расчета величин плотности фототока. Для комбинированной линзы в обоих случаях максимальная пиковая концентрация солнечного излучения в центре солнечного элемента составляет 60.5 крат для МПСЭ InGaAs/GaAs/Ge и 53 крат для МПСЭ AlInGaP/AlInGaAs/InGaAs/Ge. Превышение величины кратности концентрирования СИ в сравнении с класси-

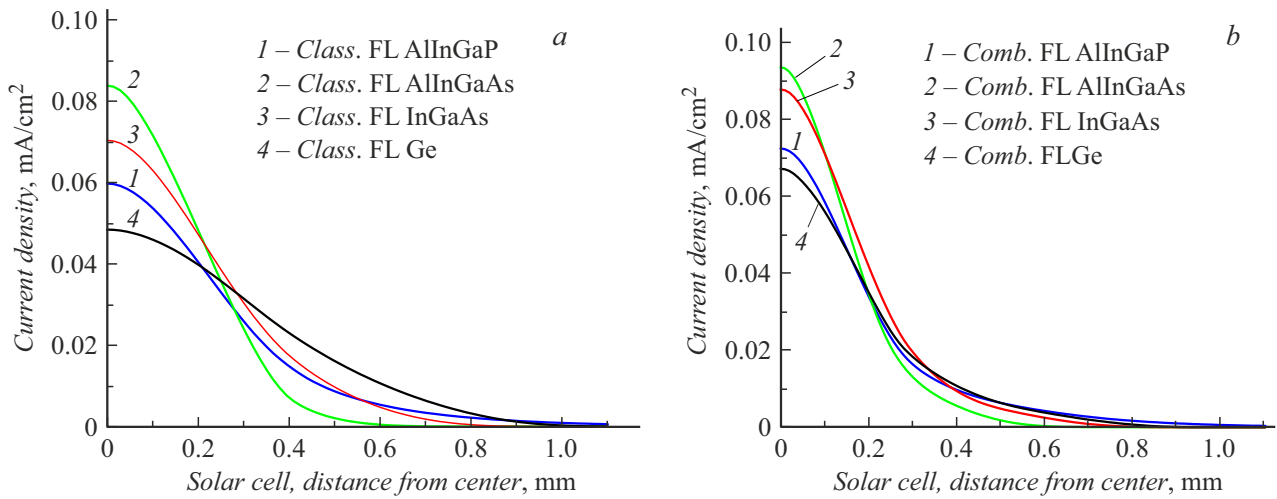


Рис. 3. Профили распределения плотности фототока на поверхности МПСЭ AlInGaP/AlInGaAs/InGaAs/Ge. *a* — классическая линейная ЛФ, *b* — комбинированная линейная ЛФ, оптимизированная под максимальную величину плотности фототока в центре фокального пятна.

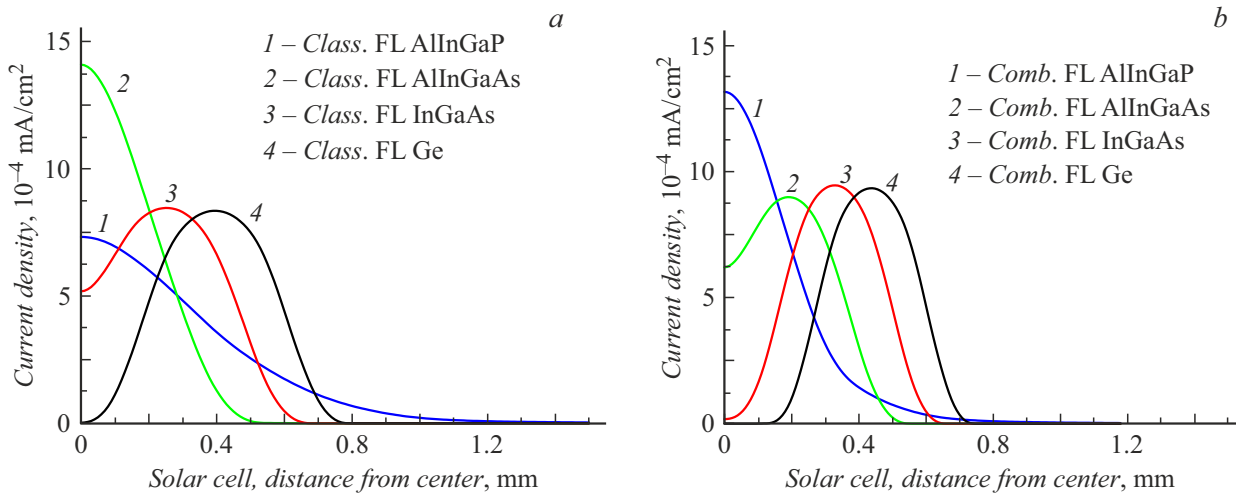


Рис. 4. Распределения плотности фототока на поверхности МПСЭ AlInGaP/AlInGaAs/InGaAs/Ge, формируемые крайней микропризмой линейной ЛФ, расположенной на наиболее удаленном участке от центра. *a* — классическая ЛФ, *b* — комбинированная ЛФ.

ческой линзой для всей площади солнечного элемента составляет в среднем 15%.

В табл. 2 приведены значения основных параметров профилей распределения плотности фототока для классической и комбинированной ЛФ для двух типов МПСЭ: пиковой плотности фототока в центре фокального пятна для каждого p - n -перехода, отношения между максимальными и минимальными величинами пиковой плотности тока и размера фокального пятна с коэффициентом перехвата 90%.

Следует отметить, что для варианта линейной ЛФ с МПСЭ InGaAs/GaAs/Ge характер профиля распределения плотности фототока для комбинированной ЛФ отличается от характера соответствующего профиля для МПСЭ AlInGaP/AlInGaAs/InGaAs/Ge. В первом случае

наблюдается минимальная разница в величинах плотности тока в центре фокального пятна (рис. 1, *b*), тогда как для второго случая для величин плотности тока в центре пятна сохраняется расхождение (рис. 3, *b*).

Причиной различий в профиле распределения плотности фототока для двух случаев является разное соотношение величин плотности тока отдельных p - n -переходов в спектральной чувствительности солнечных элементов двух типов (табл. 1). Для МПСЭ InGaAs/GaAs/Ge виден большой разброс значений плотности тока от 16.8 до 25.6 mA/cm², тогда как для МПСЭ AlInGaP/AlInGaAs/InGaAs/Ge разброс гораздо меньше (от 14.3 до 15.9 mA/cm²). При этом использован одинаковый алгоритм формирования профиля Френеля. Различие состоит только в разном числе спектральных

Таблица 2. Значения пиковой плотности фототока в центре МПСЭ двух типов для классической и комбинированной ЛФ, разница в величинах максимальной и минимальной плотности фототока $I_{peak\ max}/I_{peak\ min}$ ($I_{peak\ max}$ — наибольшая величина плотности фототока в центре фокального пятна, $I_{peak\ min}$ — наименьшая величина плотности фототока в центре фокального пятна), поперечный размер фокального пятна с коэффициентом перехвата СИ 90 %

МПСЭ, 3 junction, $p-n$ -переход	InGaP	GaAs	Ge	—
Плотность фототока в центре МПСЭ для классической ЛФ/комбинированной ЛФ, mA/cm^2	0.091/0.1	0.062/0.105	0.066/0.101	—
$I_{peak\ max}/I_{peak\ min}$ Для классической ЛФ/комбинированной ЛФ, rel. un.	1.46/1.05			
Поперечный размер пятна для классической ЛФ/комбинированной ЛФ, mm	1.52/0.96			
МПСЭ, 4 junction, $p-n$ -переход	AlInGaP	AlInGaAs	InGaAs	Ge
Плотность фототока в центре МПСЭ для классической ЛФ/комбинированной ЛФ, mA/cm^2	0.084/0.072	0.07/0.094	0.06/0.088	0.048/0.067
$I_{peak\ max}/I_{peak\ min}$ Для классической ЛФ/комбинированной ЛФ, rel.un	1.74/1.39			
Поперечный размер пятна для классической ЛФ/комбинированной ЛФ, mm	1.34/1.12			

поддиапазонов, соответствующем числу $p-n$ -переходов. В процессе подбора разных вариантов оптимизации был получен результат, при котором выравнивание пиковых значений плотности фототока в центре фокального пятна для МПСЭ AlInGaP/AlInGaAs/InGaAs/Ge привело к почти нулевой разнице данных величин (как в случае с МПСЭ InGaAs/GaAs/Ge), но при этом произошло существенное размывание фокального пятна и уменьшение пиковых значений почти в 1.5 раза. Приведенные профили распределения плотности фототока (рис. 1, b и 3, b) признаны авторами оптимальными с учетом целей и задач работы (увеличение пиковых значений плотности фототока и уменьшение размера фокального пятна). Очевидно, что в паре ЛФ–МПСЭ спектральная чувствительность МПСЭ (разница в величинах плотности фототока для каждого $p-n$ -перехода) накладывает ограничения по возможным результатам оптимизации ЛФ.

Комбинированная короткофокусная линейная ЛФ позволила значительно уменьшить разницу в значениях плотности фототока для разных $p-n$ -переходов в центре МПСЭ с тремя и четырьмя $p-n$ -переходами и повысить величины пиковой плотности фототока в центральной части фокального пятна (по сравнению с классической короткофокусной ЛФ). Если при использовании ЛФ в паре с МПСЭ InGaAs/GaAs/Ge для классической ЛФ разница в пиковых значениях минимальной и максимальной плотности фототока $I_{peak\ max}/I_{peak\ min}$

составляет 1.46 крат, то для комбинированной ЛФ соответствующая величина равна 1.05 крат (рис. 1, табл. 2).

В случае пары линейная ЛФ–МПСЭ AlInGaP/AlInGaAs/InGaAs/Ge также достигнуто уменьшение разницы в пиковых значениях плотности фототока: $I_{peak\ max}/I_{peak\ min} = 1.39$ (для классической ЛФ соответствующая величина равна 1.74).

Для комбинированной ЛФ поперечный размер фокального пятна с коэффициентом перехвата СИ 90 % уменьшился в 1.5 раза для МПСЭ InGaAs/GaAs/Ge и на 20 % для МПСЭ AlInGaP/AlInGaAs/InGaAs/Ge (табл. 2).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] V.D. Rumyantsev, 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] J. Pritchard, K. Simon, C. Dowd, E. Joshi, *PAM Rev.*, **3**, 2 (2016). DOI: 10.5130/pamrv3i0.1413
- [3] A.A. Abushattal, A.G. Loureiro, N.E.I. Boukortt, *Micro-machines*, **15**, 204 (2024). DOI: 10.3390/mi15020204

- [4] 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
- [5] 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
- [6] M. O'Neill, in *Fourth Int. Conf. on solar concentrators* (El Escorial, Spain, 2007). <https://www.markoneill.com/ICSC4-CMLMJ-2007.pdf>
- [7] 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
- [8] M.J. O'Neill, M.F. Piszczor, M.I. Eskenazi, A.J. McDanal, 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
- [9] *Handbook of concentrator photovoltaic technology*, ed. by C. Algora, I. Rey-Stolle (John Wiley & Sons, 2016). DOI: 10.1002/9781118755655
- [10] V.A. Grilikhes, M.Z. Shvarts, A.A. Soluyanov, E.V. Vlasova, V.M. Andreev, in *Proc. of the Fourth Int. Conf. on Solar Concentrators for the Generation of Electricity or Hydrogen* (El Escorial, Spain, 2007), p. 49–52.
- [11] M.Z. Shvarts, M.V. Nakhimovich, N.A. Sadchikov, A.A. Soluyanov, AIP Conf. Proc., **2298**, 050005 (2020). DOI: 10.1063/5.0032804
- [12] Н.А. Садчиков, А.В. Андреева, Письма в ЖТФ, **49** (23), 59 (2023). DOI: 10.61011/PJTF.2023.23.56855.173A [N.A. Sadchikov, A.V. Andreeva, Tech. Phys. Lett., **49** (12), 53 (2023). DOI: 10.61011/TPL.2023.12.57585.173A].
- [13] M. Meusel, B. Fuhrmann, S. van Riesen, A. Berg, W. Köstler, W. Guter, F. Dunzer, T. Torunski, in *12th European Space Power Conf.* (Juan-les-Pins, France, 2019).
- [14] W. Guter, F. Dunzer, L. Ebel, K. Hillerich, W. Köstler, T. Kubera, M. Meusel, B. Postels, C. Wächter, E3S Web Conf., **16**, 03005 (2017). DOI: 10.1051/e3sconf/20171603005