

07

Эффективность концентраторных фотоэлектрических модулей на основе короткофокусных линз Френеля и A^3B^5 солнечных элементов

© В.М. Емельянов, С.А. Левина, М.В. Нахимович, А.А. Солуянов, М.З. Шварц

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: vm.emelyanov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 14 апреля 2024 г.
В окончательной редакции 1 июля 2024 г.
Принято к публикации 2 июля 2024 г.

Исследован КПД концентраторных фотоэлектрических модулей, построенных на основе высокоэффективных каскадных GaInP/GaAs/Ge солнечных элементов и линз Френеля размером 60×60 mm типа („силикон на стекле“) с сокращенным фокусным расстоянием. Проведено моделирование пространственных распределений фототоков для субэлементов каскадного солнечного элемента, на основании которого рассчитаны вольт-амперные характеристики и зависимости КПД от фокусного расстояния линз Френеля в диапазоне 85–125 mm и допустимого угла разориентации фотоэлектрического модуля от направления на Солнце. Установлено, что сокращение фокусного расстояния от величины 125 mm, которая является оптимальной с точки зрения эффективности для линзы выбранного размера, до 105 mm приводит к снижению КПД не более чем на 0.3 abs.% при углах разориентации до 2° . Следствием дальнейшего уменьшения фокусного расстояния линзы до 85 mm является падение КПД модуля на 0.6–1.2 abs.%.

Ключевые слова: линза Френеля, многопереходный солнечный элемент, концентраторный фотоэлектрический модуль, КПД, угол разориентации.

DOI: 10.61011/JTF.2024.10.58864.133-24

Введение

Создание солнечных фотоэлектрических установок (СФЭУ) на основе модулей с оптическими концентраторами солнечного излучения является одним из наиболее перспективных методов снижения стоимости энергии, вырабатываемой солнечной энергостанцией. Наибольшая их эффективность достигается при использовании каскадных (многопереходных) солнечных элементов (СЭ) на основе гетероструктур A^3B^5 с КПД более 40% в наземных условиях (солнечный спектр AM1.5D) и оптических концентраторов — линз Френеля (ЛФ) типа „силикон на стекле“ [1–8]. Такие ЛФ имеют невысокую стоимость производства, их применение позволяет как снизить себестоимость концентраторного фотоэлектрического модуля (КФЭМ) за счет экономии площади дорогостоящих A_3B_5 гетероструктур, так и улучшить термодинамические условия преобразования солнечного излучения в СЭ.

Достигнутые рекордные значения КПД для КФЭМ типа FLATCON с четырехпереходными A_3B_5 СЭ превышают 36% [5,6]. КПД КФЭМ на основе серийно производимых трехпереходных GaInP/Ga(In)As/Ge СЭ составляет 34% и более [4,7].

Необходимо отметить, что стоимость ЛФ и СЭ из состава КФЭМ является не единственным показателем, определяющим себестоимость производимой СФЭУ электроэнергии. Также на нее влияют:

- общая материалоемкость конструкции;
- затраты на производство и обслуживание системы наведения, которые тем выше, чем более строгими являются требования к точности наведения.

С другой стороны, снижение требований к точности наведения означает необходимость использования СЭ большей площади для поглощения солнечного излучения в условиях смещения фокального пятна относительно оптической оси ЛФ, а это, в свою очередь, приводит как к удорожанию квадратного метра КФЭМ за счет роста площади A^3B^5 гетероструктуры, так и к снижению КПД СЭ из-за увеличения (пропорционально площади $p-n$ -перехода) плотностей инжекционного и рекомбинационного токов, роста омических потерь в контактных шинах большей длины.

В работе [9] было показано, что для ЛФ из заданного материала существует единственная комбинация конструктивных параметров „размер (апертура)“, „фокусное расстояние“ и „шаг профиля“, обеспечивающая минимальный размер пятна, в котором фокусируется собираемое излучение. Так как шаг профиля является технологическим параметром, можно сказать, что для ЛФ заданного размера и шага зубцов существует оптимальное фокусное расстояние, обеспечивающее минимальный размер пятна сконцентрированного излучения на поверхности СЭ. Рассмотренные в статье [10] решения по формированию КФЭМ типа SMALFOC с сокращенной конструкционной высотой обеспечивают

уменьшение проектного фокусного расстояния ЛФ с 125 mm (оптимальная линза с минимальным радиусом фокального светового пятна) до 85 mm без существенной потери оптической эффективности. При этом, однако, короткофокусные ЛФ имеют две особенности:

1) при незначительном росте размера фокального пятна плотность световой мощности в центре короткофокусной (85 mm) ЛФ повышается до полутора раз (в сравнении с аналогичным показателем для оптимальной линзы), что приводит к увеличению омических потерь и снижению КПД СЭ;

2) величина смещения максимума излучения в фокальной плоскости при разориентации пропорциональна фокусному расстоянию, что позволяет для КФЭМ с сокращенным фокусным расстоянием либо уменьшить размер используемого СЭ для улучшения КПД, либо увеличить допустимый угол разориентации (погрешность наведения на Солнце).

Таким образом, для оценки целесообразности создания СФЭУ на основе КФЭМ с сокращенной конструкционной высотой актуальной является задача исследования зависимости КПД таких модулей от их основных параметров: фокусного расстояния ЛФ и допустимого угла разориентации КФЭМ от направления на Солнце. В настоящей работе представлены результаты моделирования фотоэлектрических характеристик КФЭМ на основе ЛФ размером 60 × 60 mm типа „силикон на стекле“ и серийно производимых трехпереходных высокоэффективных GaInP/GaAs/Ge СЭ. Далее под КФЭМ будет пониматься как отдельная концентраторная ячейка „ЛФ–СЭ“, так и набор таких ячеек, объединенных в модуль. Коммутационные электрические потери не обсуждаются.

1. Моделирование фотоэлектрических характеристик КФЭМ

Фотоэлектрические характеристики КФЭМ вычислялись в условиях облучения модулей прямым солнечным излучением наземного спектра в стандартных условиях (AM1.5D, 1000 W/m², 25°C). Указанная задача решалась в несколько этапов:

1) формирование профиля ЛФ апертурой 60 × 60 mm для заданного фокусного расстояния в соответствии с методикой, описанной в работах [11,12], и нахождение для нее спектральных оптико-энергетических характеристик (распределений облученности в фокальной плоскости для различных длин волн);

2) расчет пространственных распределений плотностей фототоков для субэлементов СЭ на основе распределений облученности и спектральных зависимостей внешнего квантового выхода фотоответа;

3) моделирование вольт-амперных характеристик (ВАХ) СЭ на основе пространственных распределений фототоков.

Моделирование спектральных оптико-энергетических характеристик ЛФ и формирование профилей генерации фототоков в субэлементах многопереходного СЭ проводилось с использованием инструмента (модели) трассировки лучей [11,12]. Поток проходящего через линзу излучения имитировался большим количеством конических пучков лучей. Каждый луч из пучка нормировался по энергии и прослеживался до пересечения с поверхностью СЭ, где производилось суммирование энергетических вкладов лучей в ячейках сформированной радиально-кольцевой сетки. Для каждой ячейки рассчитывалась плотность фототока:

$$J_{ph,m}(i) = \frac{e}{hc} \sum_{k=1}^N \sigma_i \Phi_i^{\lambda_{k-1} \dots \lambda_k} \times \int_{\lambda_{k-1}}^{\lambda_k} \lambda \Gamma(\lambda) Q_{em}(\lambda) d\lambda \cdot \left[\int_{\lambda_{k-1}}^{\lambda_k} \Gamma(\lambda) d\lambda \right]^{-1}, \quad (1)$$

где i — индекс ячейки, σ_i — ее площадь, $\Phi_i^{\lambda_{k-1} \dots \lambda_k}$ — плотность оптической мощности в спектральном диапазоне $[\lambda_{k-1}, \lambda_k]$, $Q_{em}(\lambda)$ — внешний квантовый выход m -го субэлемента, $\Gamma(\lambda)$ — спектральная плотность энергетической освещенности направленного (прямого) излучения, λ — длина волны, e — элементарный заряд, h — постоянная Планка, c — скорость света в вакууме, N — число диапазонов, на который разбивается спектр излучения. Интегралы со спектральной плотностью энергетической освещенности введены для компенсации погрешностей, определяемых выбором шага задания спектральных диапазонов для $\Phi_i^{\lambda_{k-1} \dots \lambda_k}$, обычно составляющих от 50 до 100 nm.

Фотоэлектрические характеристики моделировались для трехпереходного GaInP/GaAs/Ge СЭ. ВАХ СЭ рассчитывались с использованием трехмерной распределенной эквивалентной схемы [13]. Основной вклад в последовательное сопротивление СЭ давали сопротивление протеканию тока под контактной сеткой в латеральном направлении и сопротивление контактных шин, характеристические значения для которых учитывались в соответствии с подходом, предложенным в работе [14]

Характеристическое сопротивление протеканию латерального тока рассчитывалось как:

$$R_{sheet} = \frac{R_L}{4} \left(\frac{s}{A} \right)^2, \quad R_L = \left(\frac{d_{win}}{\rho_{win}} + \frac{d_{top}}{\rho_{top}} \right)^{-1}, \quad (2)$$

где R_L — „слоевое“ сопротивление под контактной сеткой (сопротивление латеральному току участка шириной и длиной 1 cm), ρ_{win} , ρ_{top} — удельные сопротивления широкозонного „окна“ и переднего слоя (эмиттера) верхнего субэлемента каскадного СЭ; d_{win} , d_{top} — их толщины; s — шаг контактной сетки; A — линейный размер (длина стороны) СЭ.

Использованные при моделировании ВАХ параметры GaInP/GaAs/Ge СЭ

Наименование параметра	Значение		
	GaInP	GaAs	Ge
Плотность фототока для субэлементов (AM1.5D, 1000 W/cm ²), mA/cm ²	15.87	15.03	19.23
Плотность инжекционного (диффузионного) тока <i>p-n</i> перехода, A/cm ²	$3.0 \cdot 10^{-27}$	$4.9 \cdot 10^{-21}$	$3.4 \cdot 10^{-6}$
Плотность рекомбинационного тока <i>p-n</i> перехода, A/cm ²	$3.1 \cdot 10^{-14}$	$2.2 \cdot 10^{-12}$	–
Слоевое сопротивление под контактной сеткой, Ω/□	1190		
Удельное сопротивление материала контактной сетки (материал — золото), Ω·см	$2.35 \cdot 10^{-6}$		
Шаг контактной сетки, μm	100	50	
Ширина контактных шин, μm	5	4	
Толщина контактных шин, μm	5	4	

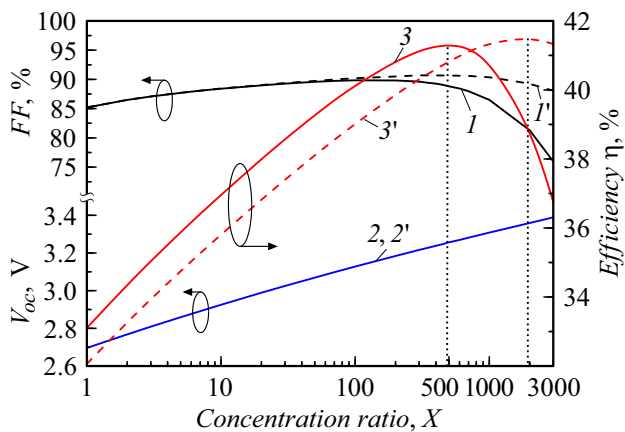


Рис. 1. Зависимости фотоэлектрических параметров GaInP/GaAs/Ge СЭ, использованного в качестве прототипа, от кратности концентрирования солнечного излучения (спектр AM1.5D) при равномерном распределении облученности поверхности приемника: 1, 1' — фактор заполнения ВАХ FF; 2, 2' — напряжение холостого хода V_{oc} (в масштабе рисунка совпадают); 3, 3' — КПД η . Сплошные линии (1–3) соответствуют шагу контактной сетки 100 μm, штриховые (1'–3') — 50 μm.

Характеристическое сопротивление контактной сетки с двумерным рисунком выражалось формулой

$$R_{grid} = \frac{1 \rho_{grid} s}{8 d_{grid} w}, \quad (3)$$

где ρ_{grid} — удельное сопротивление материала сетки; d_{grid} , w — толщина и ширина контактных шин.

Параметры СЭ, использованные при моделировании, были рассчитаны на основе экспериментальных спектральных зависимостей внешнего квантового выхода фототока для субэлементов и ВАХ прототипа СЭ (см. таблицу). Фотоэлектрические характери-

стики СЭ при равномерном освещении для двух значений шага контактной сетки приведены на рис. 1. Максимальный КПД исследованного трехпереходного GaInP/GaAs/Ge СЭ превышал 41%.

2. Влияние конструктивных параметров КФЭМ на их характеристики

При исследовании зависимости КПД КФЭМ от конструктивных параметров ЛФ и СЭ рассчитывались профили генерации фототоков субэлементов для выбранного прототипа GaInP/GaAs/Ge многопереходного приемника, размещенного в фокальной плоскости концентратора излучения. Величина омических потерь вследствие протекания латеральных токов в слоях под контактной сеткой существенно зависит от локальной плотности фототока в верхнем субэлементе каскадного СЭ. Распределения фототоков, соответствующие верхнему GaInP субэлементу, определенные для оптимальной линзы ($F = 125 \text{ mm}$, [9,10]) и для короткофокусных ЛФ, приведены на рис. 2.

Представленные на рис. 2 распределения хорошо иллюстрируют отличия в условиях работы СЭ под ЛФ с разным фокусным расстоянием: максимальное значение плотности фототока существенно увеличивается с сокращением фокусного расстояния (наблюдается для всех субэлементов). Однако в отличие от среднего GaAs и нижнего Ge субэлементов, фототок верхнего GaInP субэлемента для передачи во внешнюю цепь будет собираться контактной сеткой (для GaAs и Ge субэлементов роль коммутационных элементов выполняют сильнолегированные сплошные слои туннельных диодов). Это приводит к доминированию латерального компонента протекания тока в тонких слоях эмиттера

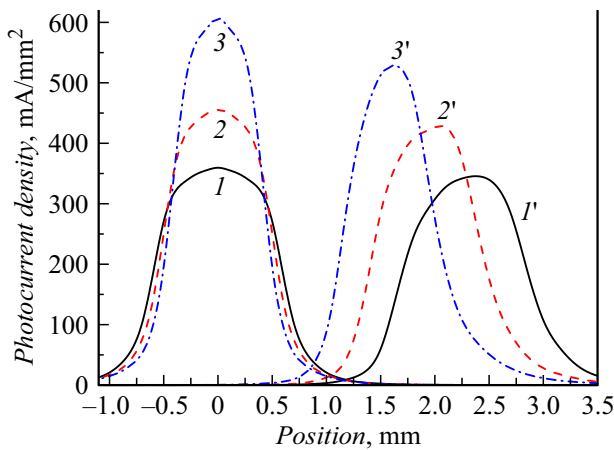


Рис. 2. Распределения фототоков в GaInP субэлементе GaInP/GaAs/Ge СЭ при работе с ЛФ для случаев нормального падения солнечного излучения (AM1.5D, 1000 W/m²) на КФЭМ (1–3) и разориентации модуля относительно направления на Солнце $\alpha = 1^\circ$ (1'–3') в зависимости от фокусного расстояния ЛФ: 1, 1' — 125; 2, 2' — 105; 3, 3' — 85 mm.

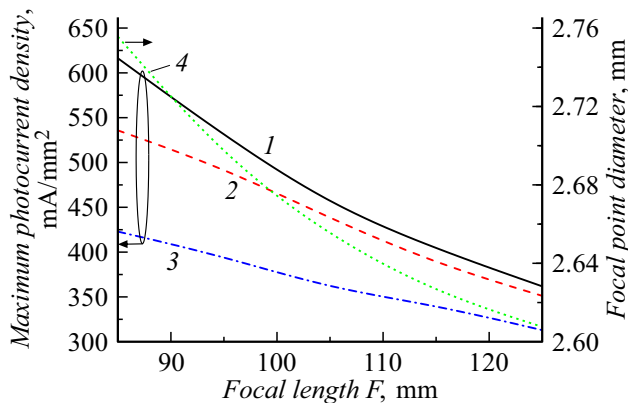


Рис. 3. Зависимость максимального значения локальной плотности фототока (1–3) GaInP субэлемента GaInP/GaAs/Ge СЭ в составе КФЭМ и диаметра фокального пятна (4) от фокусного расстояния ЛФ. 1, 4 — нормальное падения излучения на КФЭМ; 2, 3 — углы разориентации КФЭМ относительно направления на Солнце $\alpha = 1$ и 2° соответственно. Условия облучения КФЭМ: AM1.5D, 1000 W/m².

GaInP *p-n*-перехода и широкозонного окна и соответственно большему вкладу слоевого сопротивления под контактной сеткой в последовательное сопротивление СЭ.

При разориентации величина продольного (по поверхности СЭ) смещения положения максимума локальной плотности фототока обратно пропорциональна фокусному расстоянию ЛФ (рис. 2). Более точно это показано на рис. 3: при увеличении угла разориентации максимальная (пиковая) плотность фототока значительно снижается (рис. 3, линии 1–3). Область СЭ, в пределах которой генерируется 95% фототока каждого

из трех субэлементов СЭ, зависит только от фокусного расстояния (рис. 3, линия 4).

3. Результаты их анализ

На основе промоделированных распределений фототоков для СЭ квадратной формы с размером стороны от 2.6 до 12 mm и параметрами, соответствующими таблице, были проведены оценки КПД КФЭМ в зависимости от проектного фокусного расстояния ЛФ и допустимого угла разориентации модуля от направления на Солнце α_{\max} (угол, в пределах которого на поверхности СЭ концентрируется 95% оптической мощности).

Влияние шага контактной сетки на величину КПД показано на рис. 4. Видно, что величина шага в 100 μm является недостаточной как для ЛФ с фокусным расстоянием $F = 125$ mm, так и $F = 85$ mm. При этом КПД КФЭМ с короткофокусной линзой оказывается хуже для всех рассматриваемых размеров СЭ. Таким образом, для последующих оценок целесообразным является рассмотрение конструктивного варианта СЭ с шагом контактной сетки 50 μm .

Также необходимо отметить, что КПД снижается с увеличением размеров СЭ вследствие роста площади *p-n*-перехода и уменьшения рабочего напряжения. Зависимость допустимого угла разориентации от размера СЭ оказывается практически линейной. Сокращение фокусного расстояния с 125 до 85 mm позволяет увеличить допустимый угол разориентации только на 15%, что объясняется несколько увеличенным диаметром фокального пятна, формируемого короткофокусной линзой (рис. 3, линия 4).

На рис. 5 представлены зависимости КПД КФЭМ от допустимого угла разориентации для пяти значений

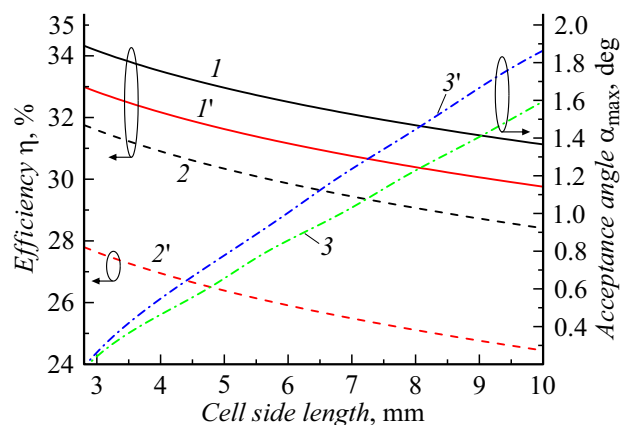


Рис. 4. Зависимость КПД и допустимого угла разориентации α_{\max} КФЭМ на основе GaInP/GaAs/Ge СЭ и ЛФ с фокусным расстоянием $F = 125$ mm (1–3) и $F = 85$ mm (1'–3') от размера стороны СЭ: 1, 1' — КПД для СЭ шагом контактной сетки 50 μm ; 2, 2' — КПД для СЭ шагом контактной сетки 100 μm ; 3, 3' — допустимый угол разориентации при приеме СЭ 95% сконцентрированного линзой светового потока. Условия облучения КФЭМ: AM1.5D, 1000 W/m².

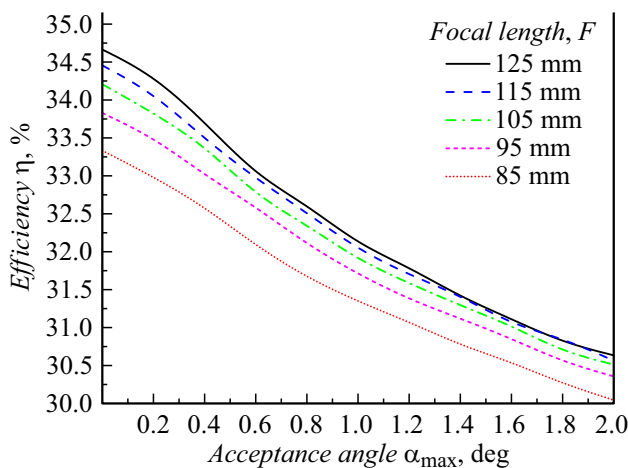


Рис. 5. Промоделированные зависимости КПД КФЭМ на основе GaInP/GaAs/Ge СЭ и ЛФ с различными фокусными расстояниями F от допустимого угла разориентации. Условия облучения КФЭМ: AM1.5D, 1000 W/m^2 .

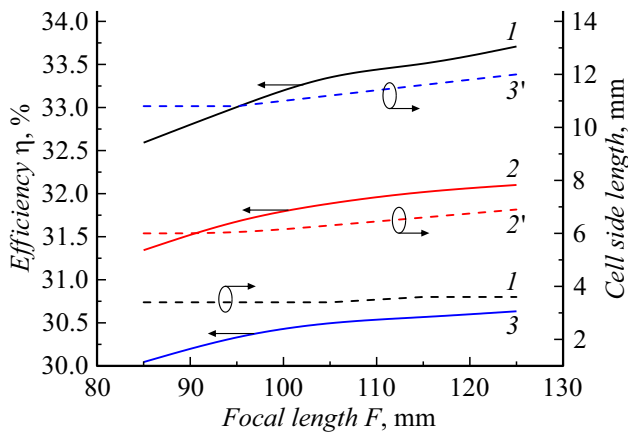


Рис. 6. КПД КФЭМ на основе GaInP/GaAs/Ge СЭ ($1-3$) и необходимый размер стороны СЭ ($1'-3'$) в зависимости от фокусного расстояния ЛФ для различных значений допустимого угла разориентации: $1, 1'$ — $\sigma_{\max} = 0.4^\circ$; $2, 2'$ — $\sigma_{\max} = 1^\circ$; $3, 3'$ — $\sigma_{\max} = 2^\circ$. Условия облучения КФЭМ: AM1.5D, 1000 W/m^2 .

фокусного расстояния ЛФ. Линза с фокусным расстоянием $F = 115 \text{ mm}$ обеспечивает КПД КФЭМ всего на $0.25 \text{ abs.}\%$ хуже по сравнению с линзой $F = 125 \text{ mm}$ в диапазоне разориентационных углов до 0.5° . Для углов более 1.2° прогнозируемые уровни эффективности модулей на основе ЛФ с $F = 115$ и 125 mm оказываются практически одинаковыми. Эффективности КФЭМ с короткофокусными ЛФ ($F = 95$ и 85 mm) в сравнении с модулем на основе оптимальной ЛФ ($F = 125 \text{ mm}$) прогнозируются ниже на величину $0.8-0.3 \text{ abs.}\%$ и $1.35-0.5 \text{ abs.}\%$ соответственно, по мере увеличения допустимого угла разориентации вплоть до 2° .

Графики для КПД КФЭМ и размера стороны СЭ, требуемой для перехвата (приема) 95% сконцентри-

рованного линзой светового потока, в зависимости от фокусного расстояния ЛФ приведены на рис. 6. Графики представлены для трех значений допустимого угла разориентации. Наблюдается незначительное увеличение размера стороны СЭ, достаточного для перехвата излучения, от фокусного расстояния при выделенных допустимых углах разориентации: от 3.4 до 3.6 mm при $\alpha_{\max} = 0.4^\circ$, от 6.0 до 6.9 mm при $\alpha_{\max} = 1^\circ$ и от 10.8 до 12.0 mm при $\alpha_{\max} = 2^\circ$.

С ростом фокусного расстояния от 85 mm (короткофокусная ЛФ) до 125 mm (оптимальная ЛФ) КПД меняется в диапазонах $32.6-33.7 \text{ abs.}\%$, $31.4-32.1 \text{ abs.}\%$, $30.0-30.6 \text{ abs.}\%$ при соответствующих допустимых углах разориентации (α_{\max}), равных 0.4° , 1° и 2° . Следует отметить, что в диапазоне 85–105 mm зависимость КПД от фокусного расстояния ЛФ более заметна, чем в диапазоне 105–125 mm.

Заключение

Проведенные исследования показывают, что для ЛФ типа „силикон на стекле“ с апертурой $60 \times 60 \text{ mm}$ сокращение фокусного расстояния с 125 до 105 mm (на 16%) приводит к уменьшению КПД КФЭМ на основе GaInP/GaAs/Ge СЭ на $0.1-0.3 \text{ abs.}\%$ в условиях преобразования солнечного излучения наземного спектра (AM1.5D, 1000 W/m^2) в пределах диапазона установленных допустимых углов разориентации (до $\alpha_{\max} = 2^\circ$). Дальнейшее сокращение фокусного расстояния до 85 mm (на 32% относительно оптимальной линзы с $F = 125 \text{ mm}$) вызывает дополнительное падение КПД КФЭМ на $0.6-1.2 \text{ abs.}\%$. Экономически значимое уменьшение размера и соответственно площади СЭ при применении более короткофокусных ЛФ на практике оказывается невозможным. Соответствующие параметры должны учитываться при проектировании КФЭМ типа SMALFOC на основе ЛФ с сокращенным фокусным расстоянием и A^3B^5 многопереходных СЭ.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M.A. Green, E.D. Dunlop, M. Yoshita, N. Kopidakis, K. Bothe, G. Siefer, X. Hao. Prog. in PV: Res. and Appl., **32** (1), 3 (2024). DOI: 10.1002/pip.3750
- [2] C. Algora, I. Rey-Stolle (eds.). *Handbook on Concentrator Photovoltaic Technology* (John Wiley & Sons, NY, 2016), DOI: 10.1002/9781118755655
- [3] M. Wiesenfarth, I. Anton, A.W. Bett. Appl. Phys. Rev., **5** (4), 041601 (2018). DOI: 10.1063/1.5046752
- [4] M. Wiesenfarth, M. Steiner, T. Dörsam, G. Siefer, F. Dimroth, P. Nitz, A.W. Bett. AIP Conf. Proc., **2149**, 030007 (2019). DOI: 10.1063/1.5124184

- [5] M. Steiner, A. Bösch, A. Dilger, F. Dimroth, T. Dörsam, M. Müller, T. Hornung, G. Siefert, M. Wiesenfarth, A.W. Bett. *Prog. in PV: Res. Appl.*, **23** (10), 1323 (2015). DOI: 10.1002/pip.2568
- [6] S. van Riesen, M. Neubauer, A. Boos, M.M. Rico, C. Gourdel, S. Wanka, R. Krause, P. Guernard, A. Gombert. *AIP Conf. Proc.*, **1679**, 100006 (2015). DOI: 10.1063/1.4931553
- [7] Е.А. Ионова, Н.Ю. Давидюк, Н.А. Садчиков, А.В. Андреева. *ЖТФ*, **91** (9), 1419 (2021). DOI: 10.21883/JTF.2021.09.51223.89-21 [Е.А. Ionova, N.Yu. Davidiyuk, N.A. Sadchikov, A.V. Andreeva. *Tech. Phys.*, **66** (9), 1208 (2021). DOI: 10.1134/S1063784221090073]
- [8] А.В. Чекалин, А.В. Андреева, Н.Ю. Давидюк, Н.С. Потапович, Н.А. Садчиков, В.М. Андреев, Д.А. Малевский. *ЖТФ*, **91** (6), 915 (2021). DOI: 10.21883/JTF.2021.06.50859.314-20 [A.V. Chekalin, A.V. Andreeva, N.Yu. Davidiyuk, N.S. Potapovich, N.A. Sadchikov, V.M. Andreev, D.A. Malevskii. *Tech. Phys.*, **66** (6), 857 (2021). DOI: 10.1134/S1063784221060050]
- [9] M.Z. Shvarts, V.M. Emelyanov, M.V. Nakhimovich, A.A. Soluyanov, V.M. Andreev. *AIP Conf. Proceed.*, **2149**, 070011 (2019). DOI: 10.1063/1.5124210
- [10] М.З. Шварц, В.М. Емельянов, С.А. Левина, М.В. Нахимович, А.А. Солюянов. *Письма в ЖТФ*, **50** (7), 8 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.07.57461.19823
- [11] M.Z. Shvarts, V.M. Andreev, V.S. Gorohov, V.A. Grilikhes, A.E. Petrenko, A.A. Soluyanov, N.H. Timoshina, E.V. Vlasova, E.M. Zaharevich. *Proc. 33rd IEEE PVSC* (2008), paper 403. DOI: 10.1109/PVSC.2008.4922751
- [12] M.Z. Shvarts, A.A. Soluyanov. *Adv. Sci. Technol.*, **74**, 188 (2010). DOI: 10.4028/www.scientific.net/AST.74.188
- [13] V.M. Emelyanov, N.A. Kalyuznyy, M.A. Mintairov, S.A. Mintairov, M.Z. Shvarts, V.M. Lantratov. *Proc. 25th EU PVSEC*, 406 (2012). DOI: 10.4229/25thEUPVSEC2010-1DV.2.33
- [14] В.М. Емельянов, С.А. Минтаиров, С.В. Сорокина, В.П. Хвостиков, М.З. Шварц. *ФТП*, **50** (1), 125 (2016). [V.M. Emelyanov, S.A. Mintairov, S.V. Sorokina, V.P. Khvostikov, M.Z. Shvarts. *Semiconductors*, **50** (1), 125 (2016). DOI: 10.1134/S1063782616010085]