

Концентраторные фотоэлектрические модули на основе короткофокусных линз Френеля с комбинированным профилем

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

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

E-mail: vm.emelyanov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 2 мая 2024 г.

В окончательной редакции 8 июля 2024 г.

Принято к публикации 30 октября 2024 г.

Исследованы характеристики концентраторных фотоэлектрических модулей на основе короткофокусных линз Френеля (60×60 mm, фокусное расстояние $F = 85$ mm) и высокоэффективных GaInP/GaAs/Ge солнечных элементов. Показано, что оптимизация профиля линзы позволяет уменьшить негативные эффекты от сокращения фокусного расстояния в виде роста локальной кратности концентрирования излучения. КПД модулей на основе линз с комбинированным профилем оказывается на 0.7–0.9 abs.% выше, чем для линз с классическим профилем с сопоставимым фокусным расстоянием. При углах разориентации свыше 1° характеристики модулей с короткофокусными линзами соответствуют модулям на основе линз с $F = 125$ mm.

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

DOI: 10.61011/PJTF.2024.23.59408.6534k

Рентабельность солнечных энергостанций, обуславливающая целесообразность их создания, определяется стоимостью единицы установленной мощности и величиной эксплуатационных затрат [1,2]. Единица установленной мощности зависит от КПД и себестоимости солнечных панелей или концентраторных фотоэлектрических модулей (КФЭМ), входящих в состав следящей солнечной фотоэлектрической установки (СФЭУ). Стоимость СФЭУ будет формироваться из стоимости дорогих III–V гетероструктурных солнечных элементов (СЭ), материалоемкости КФЭМ, задаваемой его высотой (определяется фокусным расстоянием оптического концентратора), стоимости несущих конструкций системы слежения.

КФЭМ на основе линз Френеля (ЛФ) типа „силикон на стекле“ сравнительно дешевы и технологичны в производстве, поэтому представляют значительный интерес для фотовольтаики. На данный момент КПД модулей превышает 34% [3,4] и 36% [5,6] для вариантов с трехпереходными GaInP/GaAs/Ge и четырехпереходными GaInP/GaAs//GaInAsP/GaInAs СЭ соответственно.

В работе [7] было показано, что для ЛФ с заданными апертурой и шагом зубцов профиля существует единственное фокусное расстояние, обеспечивающее максимальную среднюю кратность концентрирования излучения при минимальном диаметре светового пятна. Для ЛФ с апертурой 60×60 mm при шаге 0.35 mm, определяемом погрешностью изготовления профиля, оно составляет 125 mm. Предложенные в [8] компромиссные решения по формированию КФЭМ с сокращением на 32% конструкционной высотой модуля позволяют уменьшить фокусное расстояние ЛФ с 125 до 85 mm при сохранении оптической эффективности линз более 83% при средней (геометрической) кратности концентриро-

вания излучения на поверхности СЭ более 100X и допустимом угле разориентации до 1.1° . Однако негативным последствием указанного решения являлось увеличение максимальной локальной кратности концентрирования излучения на поверхности СЭ с 2200X до 3230X, что приводит к росту резистивных потерь и может снизить КПД концентраторного фотоэлектрического модуля.

В [7,9] были предложены варианты для преломляющего профиля ЛФ, при которых обеспечивается снижение локальной кратности концентрирования излучения на поверхности СЭ при практически неизменных диаметре фокального пятна и средней кратности концентрирования.

Для исследования возможностей улучшения равномерности освещения и сокращения сопутствующих потерь КПД в настоящей работе рассматриваются два конструктивных варианта ЛФ:

— комбинированная линза с регулярным шагом зубцов преломляющего профиля (далее КЛФ), критерий выбора углов наклона зубцов описан в [9];

— ЛФ с переменным (нерегулярным) шагом зубцов преломляющего профиля (далее ВЛФ). Здесь критерий выбора ширины преломляющей грани и угла ее наклона соответствовал варианту для КЛФ с той только разницей, что поиск нового решения для профиля ЛФ производился за счет увеличения шага зубцов центральной части линзы.

Модель трассировки лучей [7] давала спектральные (в диапазонах чувствительности субэлементов многопереходного СЭ) распределения облученности в фокусе анализируемой ЛФ. На основе спектральных распределений облученности были получены пространственные распределения плотностей фототоков для субэлементов трехпереходного GaInP/GaAs/Ge СЭ. Основные параметры

Использованные при моделировании вольт-амперных характеристик параметры GaInP/GaAs/Ge СЭ

Параметр	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 $p-n$ -перехода, A/cm ²	$3.0 \cdot 10^{-27}$	$4.9 \cdot 10^{-21}$	$3.4 \cdot 10^{-6}$
Плотность рекомбинационного тока $p-n$ -перехода, A/cm ²	$3.1 \cdot 10^{-14}$	$2.2 \cdot 10^{-12}$	—
Слоевое сопротивление под контактной сеткой, Ω/\square		1190	
Слоевое сопротивление между GaInP- и GaAs-субэлементами, Ω/\square		200	
Слоевое сопротивление между GaAs- и Ge-субэлементами, Ω/\square		150	
Удельное сопротивление материала контактной сетки (материал — золото), $\Omega \cdot \text{cm}$		$2.35 \cdot 10^{-6}$	
Ширина/толщина контактных шин, μm		4/4	

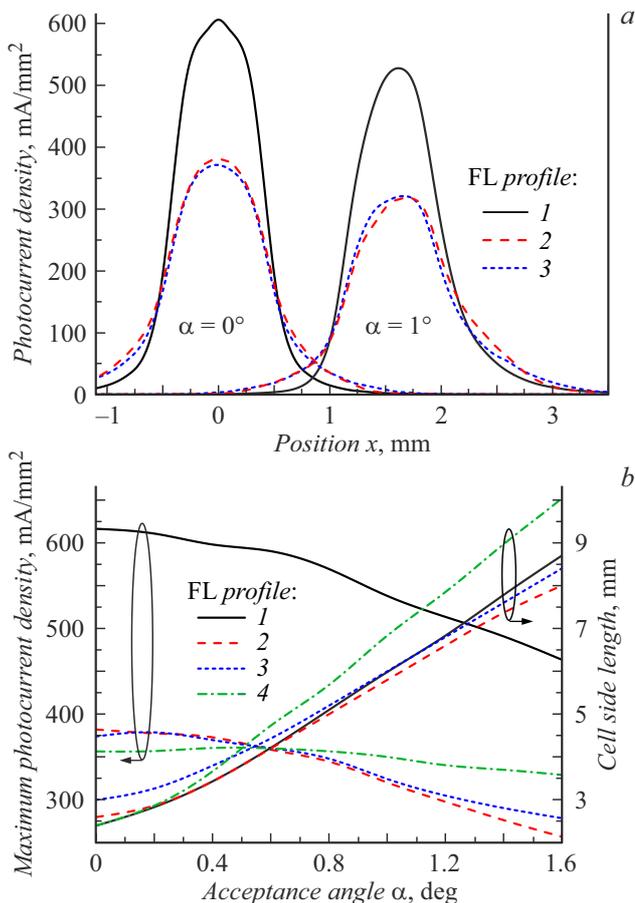


Рис. 1. Распределения фототоков в GaInP-субэlemente GaInP/GaAs/Ge СЭ при работе с ЛФ (а), а также значения максимальной плотности фототока и требуемого размера стороны СЭ при перехвате 95% прошедшего через ЛФ излучения (б) от угла разориентации α КФЭМ относительно направления на Солнце. 1, 4 — ЛФ с классическим профилем; 2 — ЛФ с комбинированным профилем (КЛФ); 3 — ЛФ с комбинированным профилем и переменным шагом зубцов (ВЛФ). $F = 85$ (1–3) и 125 mm (4).

СЭ, для которого проводилось моделирование, приведены в таблице. КПД солнечного элемента превышал 41% (кратность концентрирования (500–2000)X) при равномерной облученности его фотоприемной поверхности размером 2.8×2.8 mm. Характеристики модулей с КЛФ и ВЛФ сравнивались с характеристиками модулей с ЛФ классического профиля (далее классическая ЛФ), имеющими регулярный шаг зубцов преломляющего профиля, угол наклона которых выбран из условия собирания луча, параллельного оптической оси, в фокус [7].

На рис. 1, а представлены профили для фототока, генерируемого в GaInP-субэlemente экспериментального СЭ, в зависимости от угла разориентации α для трех конструктивных вариантов ЛФ. Заметим, что допустимое значение угла разориентации для КФЭМ жестко связано с размерами СЭ. В настоящей работе считается допустимым угол разориентации, при котором 95% солнечного излучения, прошедшего через ЛФ, концентрируется на поверхности СЭ. Максимальная плотность фототока в центре светового пятна классической ЛФ оказывается в 1.5 раза выше, чем для вариантов КЛФ и ВЛФ, во всем диапазоне углов. Для сравнения на рис. 1, б добавлена зависимость, соответствующая КФЭМ на основе классической ЛФ с оптимальным для размера 60x60 mm фокусным расстоянием 125 mm [7,8]. Для классической ЛФ сокращение фокусного расстояния с 125 до 85 mm приводит к значительному росту максимальной плотности фототока, в то время как у двух альтернативных вариантов ЛФ она оказывается лишь немногим выше, чем для классической ЛФ с фокусным расстоянием $F = 125$ mm.

Характеристики КЛФ и ВЛФ близки. Необходимо отметить, что все ЛФ с $F = 85$ mm демонстрируют уменьшение максимальной плотности фототока в СЭ по мере роста угла разориентации. ВЛФ в силу особенностей формирования профиля имеет несколько большее размытие светового пятна по сравнению с КЛФ и при

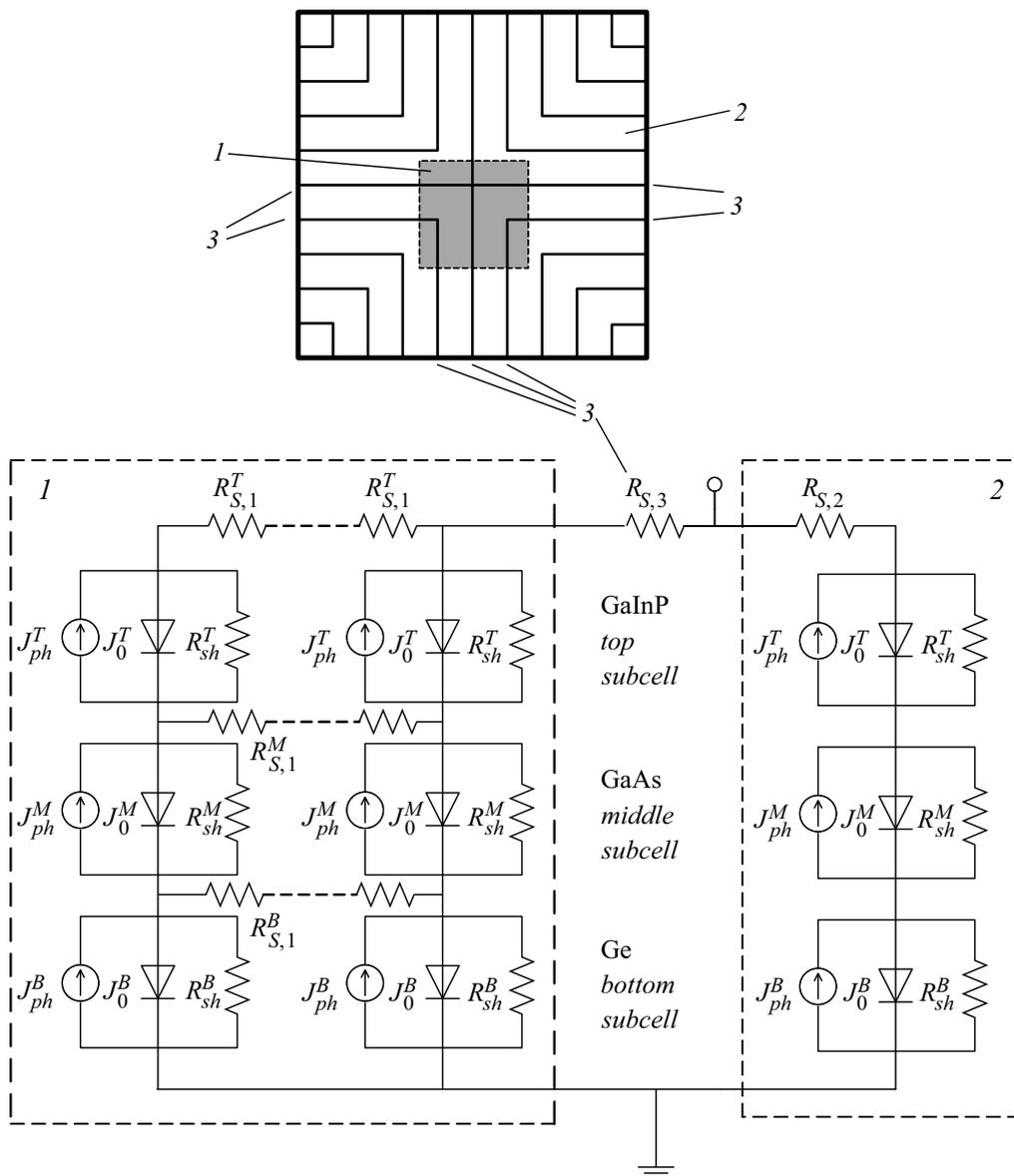


Рис. 2. Эквивалентная схема для моделирования вольт-амперных характеристик GaInP/GaAs/Ge СЭ. 1 — область высокой облученности, 2 — область низкой облученности, 3 — контактные шины, выводящие ток во внешнюю цепь из области высокой облученности. J_{ph}^T , J_{ph}^M , J_{ph}^B — плотности фототоков для верхнего (GaInP), среднего (GaAs) и нижнего (Ge) субэлементов; J_0^T , J_0^M , J_0^B и R_{sh}^T , R_{sh}^M , R_{sh}^B — соответственно плотности обратного тока насыщения и удельные шунтирующие сопротивления для тех же субэлементов; $R_{S,1}^T$, $R_{S,1}^M$, $R_{S,1}^B$, $R_{S,2}$, $R_{S,3}$ — эквивалентные последовательные сопротивления различных слоев структуры и контактной сетки.

малых значениях допустимого угла разориентации предполагает использование СЭ увеличенного размера. Для допустимого угла разориентации $\alpha_{max} = 1.0^\circ$ требуемый размер стороны СЭ в случае КЛФ составляет 5.8 mm против 6.0 mm для классической ЛФ (или ВЛФ) (все имеют $F = 85$ mm), т.е. площадь СЭ меньше на 7%. Для сравнения в варианте классической ЛФ с $F = 125$ mm размер стороны приемника, требуемый для обеспечения $\alpha_{max} = 1.0^\circ$, будет 6.9 mm, что подтверждает преимущества короткофокусных ЛФ с сокращением площади СЭ на 19%.

Представленные зависимости для фототоков (рис. 1) позволили получить оценки КПД концентраторного фотоэлектрического модуля с сокращенной конструктивной высотой. При моделировании использовалась двухкомпонентная модель (рис. 2), включающая распределенную эквивалентную схему для области преобразования высококонцентрированного излучения и одноэлементную модель для периферийной области.

Для КФЭМ с СЭ (параметры соответствуют данным таблицы) определялись значения КПД. В расчетах коммутационные потери при объединении отдельных

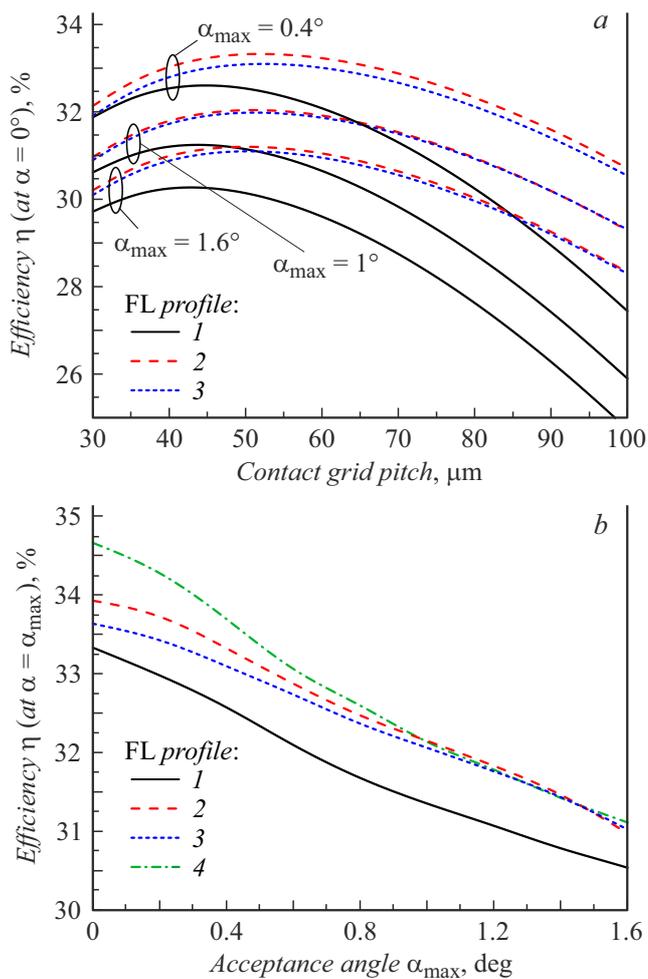


Рис. 3. Промоделированные зависимости КПД концентраторного фотоэлектрического модуля на основе GaInP/GaAs/Ge СЭ и ЛФ с различными вариантами профиля от шага контактной сетки (а) и допустимого угла разориентации α_{max} при оптимальном шаге контактной сетки $50 \mu\text{m}$ (b). 1, 4 — ЛФ с классическим профилем; 2 — ЛФ с комбинированным профилем (КЛФ); 3 — ЛФ с комбинированным профилем и переменным шагом зубцов (ВЛФ). $F = 85$ (1–3) и 125 mm (4). Условия облучения КФЭМ: AM1.5D, 1000 W/m^2 .

фотоэлектрических ячеек в единый модуль не учитывались. Используемая модель (рис. 2) дает необходимую точность моделирования вольт-амперных характеристик КФЭМ с учетом нелинейных резистивных потерь, определяемых протеканием латеральных токов в структуре СЭ, как в области высокой облученности, так и для периферийных областей с существенно меньшими значениями плотностей токов на единицу площади СЭ. Полученные оценки КПД представлены на рис. 3.

Для вариантов рассматриваемых оптических профилей ЛФ оптимальные значения шага контактной сетки для СЭ с принятыми параметрами структуры (см. таблицу) находятся вблизи $50 \mu\text{m}$: 45 и $55 \mu\text{m}$ для классической ЛФ и КЛФ соответственно. Для пары КЛФ/СЭ наибольший КПД в $33.3 \text{ abs.}\%$ прогнозируется при до-

пустимом угле разориентации не более $\alpha_{\text{max}} = 0.4^\circ$, в то время как в варианте классическая ЛФ/СЭ в этих же условиях КПД не превышает $32.6 \text{ abs.}\%$. С ростом угла разориентации до $\alpha_{\text{max}} = 1.0^\circ$ разница увеличивается: КПД уже составляет $32.2 \text{ abs.}\%$ для КЛФ против $31.3 \text{ abs.}\%$ для классической ЛФ. При малых значениях угла разориентации пара ВЛФ/СЭ демонстрирует несколько худшие характеристики вследствие большего исходного размытия светового пятна концентрированного излучения (рис. 1). При углах, превышающих $\alpha_{\text{max}} = 1^\circ$, характеристики КФЭМ с КЛФ и ВЛФ практически идентичны. Более того, по значению КПД они достигают уровня для КФЭМ на основе классической ЛФ с фокусным расстоянием 125 mm .

Таким образом, применение ЛФ типа „силикон на стекле“ с комбинированным профилем в составе КФЭМ позволяет сократить на 32% конструктивную высоту модулей без снижения КПД относительно КФЭМ на основе ЛФ с оптимальным фокусным расстоянием [7,8]. Сокращение конструктивной высоты уменьшает материалоемкость и объем капитальных затрат при создании СФЭУ. Кроме того, применение короткофокусных ЛФ с комбинированным профилем уменьшает требуемую площадь дорогостоящих гетероструктур СЭ, что также способствует снижению себестоимости энергоустановок.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00158 (<https://rscf.ru/project/22-19-00158/>).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] *Handbook on concentrator photovoltaic technology*, ed. by C. Algora, I. Rey-Stolle (John Wiley & Sons, N.Y., 2016), p. 59–244, 339–432, 589, 684. DOI: 10.1002/9781118755655
- [2] M. Wiesenfarth, I. Anton, A.W. Bett, *Appl. Phys. Rev.*, **5** (4), 041601 (2018). DOI: 10.1063/1.5046752
- [3] 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
- [4] 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. Davidyuk, N.A. Sadchikov, A.V. Andreeva, *Tech. Phys.*, **66**, 1208 (2021). DOI: 10.1134/S1063784221090073].
- [5] M. Steiner, A. Bösch, A. Dilger, F. Dimroth, T. Dörsam, M. Muller, T. Hornung, G. Siefer, M. Wiesenfarth, A.W. Bett, *Prog. Photovolt.: 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] 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
- [8] М.З. Шварц, В.М. Емельянов, С.А. Левина, М.В. Нахимович, А.А. Солуянов, Письма в ЖТФ, **50** (7), 8 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.07.57461.19823 [M.Z. Shvarts, V.M. Emelyanov, S.A. Levina, M.V. Nakhimovich, A.A. Soluyanov, Tech. Phys. Lett., **50** (4), 6 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.07.57461.19823].
- [9] M.Z. Shvarts, M.V. Nakhimovich, N.A. Sadchikov, A.A. Soluyanov, AIP Conf. Proc., **2298**, 050005 (2020). DOI: 10.1063/5.0032804