

07.2;09.2

## Увеличение КПД концентраторных фотоэлектрических модулей при использовании фоконов в качестве вторичных оптических концентраторов

© Н.Ю. Давидюк, Д.А. Малевский, П.В. Покровский, Н.С. Потапович, Н.А. Садчиков, А.В. Чекалин<sup>¶</sup>

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

<sup>¶</sup> E-mail: chekalin@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 4 декабря 2019 г.

В окончательной редакции 4 декабря 2019 г.

Принято к публикации 6 декабря 2019 г.

Разработаны концентраторные фотоэлектрические модули на основе линз Френеля и вторичных концентраторов — полых фоконов из листового алюминия. Для увеличения КПД преобразования солнечного излучения определена оптимальная конфигурация фоконов и исследованы фотоэлектрические характеристики модулей. Использование фоконов обеспечило увеличение допустимого угла разориентации модуля с  $\pm 0.45^\circ$  (без фокона) до  $\pm 0.8^\circ$  (с фоконом) и увеличение КПД модуля с 29.2% (без фокона) до 32.8% (с фоконом).

**Ключевые слова:** концентраторная фотоэнергетика, линзы Френеля, каскадные фотопреобразователи, вторичные оптические концентраторы.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.05.49107.18140

Вследствие высокой стоимости высокоэффективных каскадных фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) их применение в наземной солнечной электроэнергетике возможно только при совместном использовании с недорогими оптическими концентраторами, обеспечивающими уменьшение площади и стоимости ФЭП в 500–1000 раз. Высокие значения КПД преобразования солнечного излучения в каскадных ФЭП, превышающие 40%, сохраняются при кратностях концентрирования излучения 500–1000 „солнц“.

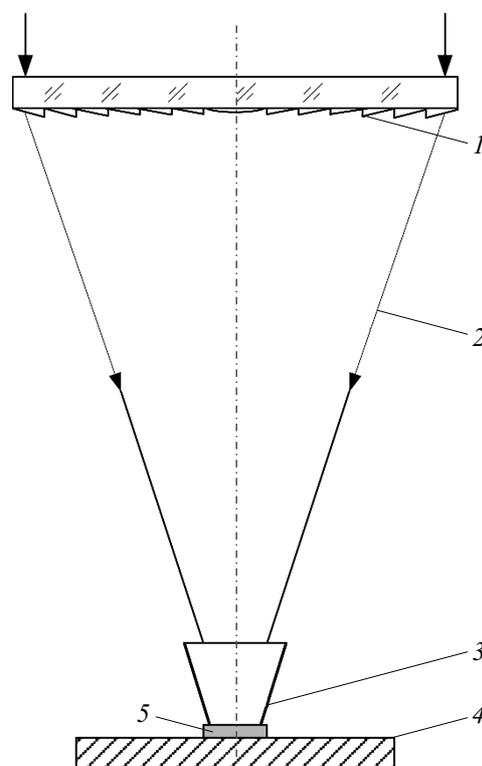
Высокие кратности концентрирования достигаются за счет совместного использования первичных и вторичных оптических концентраторов (ВОК). В качестве первичных концентраторов излучения наибольшее распространение получили линзы Френеля [1]. Использование вторичного концентратора позволяет увеличить кратность концентрирования излучения, улучшить разориентационные характеристики концентраторного фотоэлектрического модуля (КФЭМ) и уменьшить потери, связанные с хроматической аберрацией [2] и неравномерным распределением излучения по поверхности фотоэлектрических преобразователей [3]. В качестве ВОК обычно используются плосковыпуклые линзы или конические отражатели, изготовленные либо из полированного листового алюминия, либо из массива стекла с полированными боковыми поверхностями [4–7].

Основной задачей настоящей работы является определение наиболее оптимальных параметров вторичных концентраторов для фотоэлектрических модулей, а также последующее изготовление и исследование модулей с такими концентраторами.

Для увеличения энергоэффективности КФЭМ были разработаны ВОК в виде полый перевернутой усеченной

пирамиды с зеркальным отражением от внутренней поверхности боковых стенок (рис. 1).

Для измерения параметров разработанных модулей был использован лабораторный импульсный измери-



**Рис. 1.** Схема концентраторного модуля, включающего линзу Френеля, фоконов и каскадный солнечный элемент. 1 — линза Френеля, 2 — солнечные лучи, 3 — вторичная оптика, 4 — теплоотвод, 5 — солнечный элемент.

**Таблица 1.** Значения КПД преобразования излучения и электрической мощности, генерируемых в модуле в режиме оптимальной нагрузки с фоконами разной высоты при углах наклона боковых граней  $22^\circ$ 

Параметр	Высота фокона, mm				Без фокона
	10	17	22	30	
КПД преобразования, %	28.7	29.5	29.8	30.0	26.8
Электрическая мощность, W	4.13	4.25	4.29	4.32	3.84

**Таблица 2.** Значения КПД преобразования излучения и электрической мощности, генерируемых в модуле в режиме оптимальной нагрузки с фоконами высотой 20 mm при разных углах наклона граней

Параметр	Угол наклона граней, deg					Без фокона
	17	20	22	25	30	
КПД преобразования, %	28.7	29.3	29.8	29.7	29.3	26.8
Электрическая мощность, W	4.16	4.23	4.29	4.28	4.22	3.84

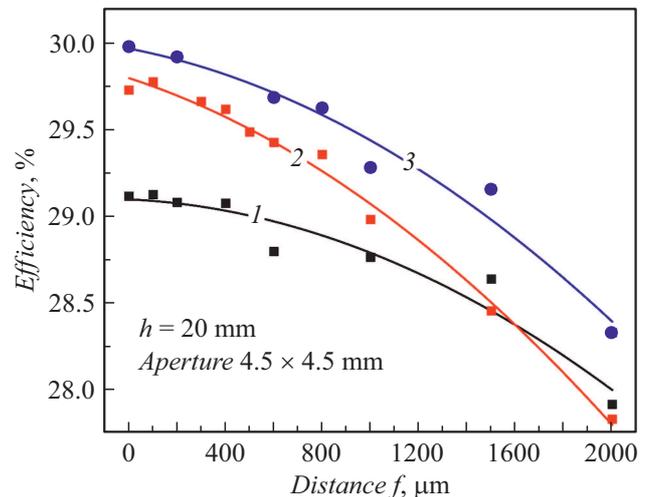
тельный комплекс, в котором источником излучения служила импульсная ксеноновая лампа, формирующая световой поток, идентичный идущему от солнечного диска (спектр AM1.5D). Измерения электрических параметров выполнялись при энергетической освещенности  $1000 \text{ W/m}^2$  и температуре окружающей среды  $25^\circ\text{C}$ .

КФЭМ включает линзу Френеля размером  $120 \times 120 \text{ mm}$  с фокусным расстоянием  $175 \text{ mm}$  и электрогенерирующую плату с ФЭП, скрепленные между собой при помощи алюминиевых стенок. На электрогенерирующей плате в фокальном пятне закреплен каскадный ФЭП GaInP/GaAs/Ge с размером фотоприемной площадки  $5.5 \times 5.5 \text{ mm}$  с установленным на нем фоконем (рис. 1).

В качестве материала для фоконев был использован листовой анодированный алюминий толщиной  $0.4 \text{ mm}$  с высокой отражающей способностью, равной  $96\text{--}98\%$ . Изготовление образцов фоконев осуществлялось посредством получения заготовок нужного профиля с помощью лазерной резки с последующим формированием фоконев пирамидальной формы. Было изготовлено несколько типов фоконев с различными параметрами: высотой ( $h$ ) от  $10$  до  $30 \text{ mm}$ , углом наклона граней ( $\alpha$ ) от  $17$  до  $30^\circ$  и размером выходной апертуры  $4.5 \times 4.5 \text{ mm}$ .

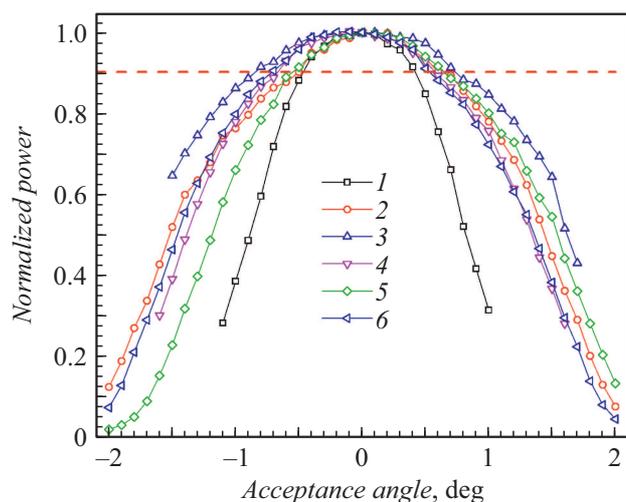
В табл. 1 приведены значения КПД преобразования излучения и электрической мощности, генерируемых в модуле в режиме оптимальной нагрузки при установке фоконев разной высоты с углом наклона граней фоконев  $\alpha = 22^\circ$ . Увеличение высоты фокона приводит к росту КПД и генерируемой модулем мощности, что обусловлено увеличением степени перехвата излучения линзы фоконем.

В табл. 2 приведены значения КПД преобразования излучения и электрической мощности, генерируемых в модуле в режиме оптимальной нагрузки при использовании фоконев высотой  $20 \text{ mm}$  с разными углами наклона

**Рис. 2.** Зависимости значений КПД модулей от расстояния ( $f$ ) нижней грани фоконев от поверхности ФЭП для фоконев высотой  $h = 20 \text{ mm}$  с углов наклона боковых граней  $\alpha = 20$  (1),  $22$  (2) и  $25^\circ$  (3).

граней. Из этой таблицы видно, что максимум мощности и КПД модуля достигается при использовании фоконев с  $\alpha = 22$  и  $25^\circ$ . Использование фоконев с большими углами наклона граней ведет к увеличению количества зеркальных отражений от стенок фокона и увеличению оптических потерь.

При использовании фоконев необходим их монтаж в непосредственной близости от поверхности ФЭП. Были выполнены исследования влияния высоты установки фокона над поверхностью ФЭП на эффективность работы модуля. Для измерений были использованы фоконев с тремя разными углами наклона граней ( $\alpha = 20, 22$  и  $25^\circ$ ). На рис. 2 представлены измеренные значения КПД преобразования солнечного излучения в модуле



**Рис. 3.** Разориентационные кривые модулей: без фокона (1); с фоконом с углом наклона граней  $\alpha = 20^\circ$ , расположенным вплотную к ФЭП ( $f=0$ ) (2); с фоконом с углом наклона граней  $\alpha=22^\circ$  и  $f = 0$  (3); с фоконом с углом наклона граней  $\alpha = 25^\circ$  и  $f = 0$  (4); с фоконом с углом наклона граней  $\alpha = 22^\circ$  и расстоянием от ФЭП  $f = 200 \mu\text{m}$  (5); с фоконом с углом наклона граней  $\alpha = 25^\circ$  и расстоянием от ФЭП  $f = 200 \mu\text{m}$  (6).

при использовании фоконов разной конфигурации и изменении зазора ( $f$ ) между нижней гранью фокона и поверхностью ФЭП. Увеличение зазора вплоть до  $f = 400 \mu\text{m}$  приводит к незначительному уменьшению КПД модуля.

Были выполнены исследования разориентационных характеристик модуля с линзой Френеля размером  $120 \times 120 \text{ mm}$  и фоконами различной формы. На рис. 3 представлены разориентационные кривые для модуля без вторичной оптики, а также с фоконами трех размеров, установленными как вплотную к фотоэлементу ( $f = 0$ ), так и на расстоянии  $f = 200 \mu\text{m}$  от поверхности ФЭП. „Допустимый“ угол разориентации, определяемый по разориентационным кривым на уровне 0.9 от максимума, для модуля без вторичной оптики составляет  $\pm 0.45^\circ$ . Наибольший „допустимый“ угол разориентации  $\pm 0.8^\circ$  имеет место в модуле с фоконом с углом наклона граней  $\alpha = 22^\circ$ , установленным вплотную к ФЭП ( $f = 0$ ).

При освещении имитатором солнечного излучения максимальный КПД модуля без фокона составил 29.2%. Добавление фокона обеспечило увеличение КПД модуля до 32.8%.

Таким образом, конфигурация фоконов высотой 20–22 mm с углом наклона его граней 22–25° оказалась наиболее оптимальной. Использование в КФЭМ фоконов с такими параметрами обеспечило увеличение КПД преобразования солнечного излучения модулей на 3 абсолютных процента и улучшило их разориентационные характеристики с  $\pm 0.45^\circ$  до  $\pm 0.8^\circ$ .

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] Rumyantsev V.D. // Springer Series in Optical Sciences. 2007. V. 130. P. 151–174.
- [2] Dominguez C., Anton I., Sala G., Askins S. // Prog. Photovolt.: Res. Appl. 2013. V. 21. N 7. P. 1478–1488.
- [3] Victoria M., Herrero R., Dominguez C., Antón I., Askins S., Sala G. // Prog. Photovolt.: Res. Appl. 2013. V. 21. N 3. P. 308–318.
- [4] Araki K., Kondo M., Uozumi H., Yamaguchi M. // 3rd World Conf. on photovoltaic and energy conversion. Osaka, Japan, 2003. V. 1. P. 853–856.
- [5] Jaus J., Nitz P., Peharz G., Siefer G., Schult T., Wolf O., Passig M., Gandy T., Bett A.W. // 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference. IEEE, 2008. P. 1–5.
- [6] Rumyantsev V.D., Davidyuk N.Yu., Ionova E.A., Larionov V.R., Malevskiy D.A., Pokrovskiy P.V., Sadchikov N.A., Andreev V.M. // Proc. of the 5th Int. Conf. on solar concentrators for the generation of electricity. Palm Desert, California, USA, 2008.
- [7] Давидюк Н.Ю., Ионова Е.А., Малевский Д.А., Румянцев В.Д., Садчиков Н.А. // ЖТФ. 2010. Т. 80. В. 7. С. 90–95.