

Исследование концентраторных фотоэлектрических модулей с отражающими элементами вторичной оптики

© Н.А. Садчиков, Н.С. Потапович, Д.А. Малевский, Н.Ю. Давидюк, А.В. Андреева, А.В. Чекалин

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

Поступило в Редакцию 30 ноября 2022 г.

В окончательной редакции 20 марта 2023 г.

Принято к публикации 21 марта 2023 г.

Исследованы характеристики концентраторных фотоэлектрических модулей на основе линзы Френеля размерами 120×120 мм с вторичными концентраторами в виде полых алюминиевых фоконов с внутренними зеркальными стенками. Определены оптимальные размеры и конфигурации вторичных концентраторов для увеличения эффективности фокусирующих систем концентраторных модулей. Было получено максимальное значение допустимого угла разориентации, равное $\pm 0.75^\circ$, соответствующее падению мощности до уровня 90% относительно максимального значения мощности концентраторного фотоэлектрического модуля при нормальном падении лучей. Для модуля с наиболее эффективным фоконом высотой 40 мм и углами наклона боковых граней 17° было получено максимальное значение КПД модуля в лабораторных условиях, равное 35.15%. В натуральных условиях значение КПД достигло величины 33.8%. Достигнутые результаты соответствуют уровню, полученному для лучших зарубежных аналогов.

Ключевые слова: линза Френеля, солнечный элемент, концентраторный модуль, фокон, угол разориентации.

DOI: 10.21883/JTF.2023.06.55606.239-22

Введение

Одним из перспективных направлений получения электроэнергии методами „зеленой“ энергетики является фотоэлектрическое преобразование солнечного излучения с использованием высокоэффективных многокаскадных солнечных элементов (СЭ), КПД которых в настоящее время при преобразовании прямого солнечного излучения превышает 45% при уровне концентрирования солнечного излучения в 500–1000 крат. [1–3] Эти свойства СЭ позволяют сократить суммарную площадь солнечных элементов в энергоустановках пропорционально кратности концентрирования солнечного излучения при использовании недорогих оптических концентраторов, имеющих высокую оптическую эффективность и обеспечивающих необходимую степень концентрирования [4–7]. На данный момент в концентраторной фотоэнергетике существуют два основных подхода к способу концентрирования солнечного излучения на поверхности СЭ. В первом случае используются преломляющие свет оптические элементы, такие как, например, плоские линзы Френеля, во втором — отражающие сферические зеркала. На сегодняшний день именно использование линз Френеля в качестве первичных концентраторов солнечного излучения получило наиболее широкое распространение среди производителей концентраторных фотоэлектрических модулей (КФЭМ) [4–10].

Наиболее важными параметрами КФЭМ являются эффективность преобразования солнечного излучения (КПД) и разориентационная характеристика модуля. Анализ оптико-энергетических характеристик при использовании линз Френеля в качестве первичных линз показывает, что главным препятствием для повышения их энергетической эффективности и концентрирующей способности является хроматическая аберрация [11]. Одним из путей, позволяющим снизить влияние хроматической аберрации и неточной ориентации оптических концентраторов на энергетическую эффективность концентрирующей системы, а также повысить средний уровень концентрирования излучения на СЭ без уменьшения оптического КПД, является использование вторичной концентрирующей оптики (ВКО), размещаемой непосредственно перед поверхностью или на поверхности фотопреобразователей [12,13]. ВКО не только позволяют уменьшить потери, связанные с хроматической аберрацией [14] и неравномерным распределением излучения по поверхности солнечных элементов [15,16], но и улучшают разориентационные характеристики модулей. Используемое на практике семейство элементов вторичной оптики достаточно широко и включает отражающие и преломляющие элементы различной формы, а также их сочетания [17–22].

Наиболее простым способом увеличения концентрации света и угла захвата лучей является установка на фотоприемную поверхность СЭ в качестве элемента

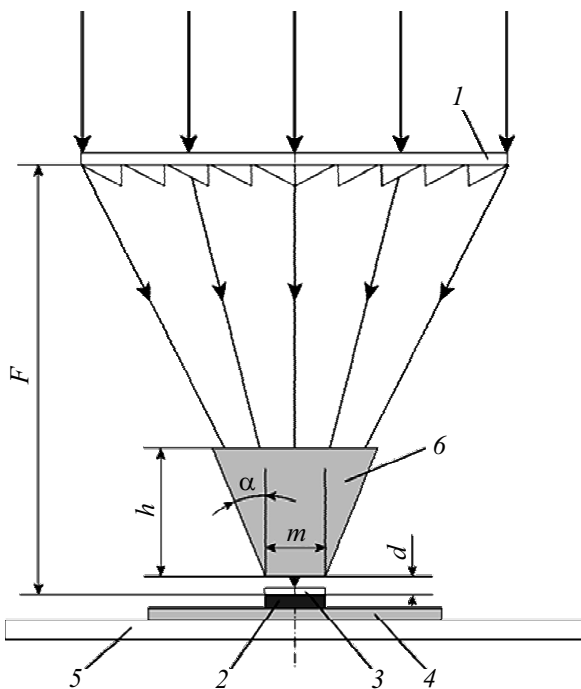


Рис. 1. Схема КФЭМ с вторичным концентратором в виде фокона: 1 — линза Френеля, 2 — СЭ, 3 — защитное стекло (при наличии), 4 — теплопроводящая электроизолирующая плата, 5 — алюминиевое теплопроводящее основание, 6 — фокон. F — фокусное расстояние линзы Френеля, h — высота фокона, m — размер выходной апертуры фокона, d — зазор фокон-СЭ, α — угол наклона граней фокона.

вторичной оптики отражающего типа перевернутой усеченной пирамиды с внутренними зеркальными стенками (фокона), размер выходного отверстия которой меньше размера сфокусированного светового пятна первичной линзы. При этом часть лучей, не попадающих на поверхность солнечного элемента после отражения от боковых поверхностей фокона, может быть перенаправлена на солнечный элемент. Данный вариант отражателя является предпочтительным при использовании солнечных элементов и линз Френеля квадратной конфигурации.

При исследовании характеристик разрабатываемых концентраторных фотоэлектрических модулей в качестве первичных концентраторов солнечного излучения были использованы линзы Френеля размерами 120×120 мм с фокусным расстоянием 225 мм. Приемниками излучения служили трехкаскадные GaInP/GaAs/Ge СЭ размерами 6×5.6 мм с КПД 42.5%. Над фотоприемной площадкой СЭ, размеры которой составляли 5.5×5.5 мм, устанавливались фоконы разных конфигураций и размеров (рис. 1).

Основной задачей настоящей работы является оптимизация параметров элементов вторичной оптики полых перевернутых усеченных пирамид с внутренними зеркальными стенками.

1. Методика изготовления и конструкции исследуемых элементов вторичной оптики

Для определения оптимальных параметров элементов вторичной оптики был изготовлен ряд фоконов разных конфигураций.

В качестве материала для фоконов был использован листовой анодированный алюминий толщиной 0.4 мм, имеющий дополнительное многослойное покрытие, позволяющее значительно увеличить отражение от поверхности материала и защитить его от деградации при длительном использовании в КФЭМ. Коэффициент отражения внутренней зеркальной поверхности фоконов составлял 96–98%.

Изготовление образцов фоконов осуществлялось посредством получения плоских заготовок нужного профиля с помощью лазерной резки с последующим формированием объемных отражателей с внутренними зеркальными стенками методом гибки на шаблонах пирамидальной формы.

Основными изменяющимися параметрами фоконов является их высота (h) и угол наклона граней (α) (рис. 1). Был изготовлен набор фоконов, высота которых изменялась от 5 до 50 мм, угол наклона граней — от 15 до 25°. Размер выходной апертуры (m) фоконов варьировался от 3.5×3.5 до 5×5 мм.

Для исследования характеристик концентраторных фотоэлектрических модулей с элементами вторичной оптики в фокусирующей системе был изготовлен экспериментальный образец модуля. На фотоприемной панели был закреплен СЭ размерами 5.5×5.5 мм, napаянный на теплопроводящую электроизолирующую

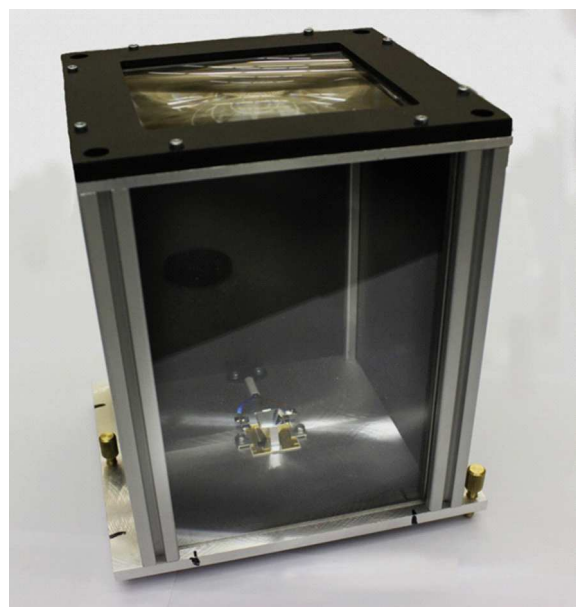


Рис. 2. Внешний вид КФЭМ с линзой Френеля и фоконем, установленным над фотоприемной площадкой СЭ.

плату, выполненную на основе алюмооксидной технологии размерами $30 \times 30 \times 3$ mm. Над фотоприемной площадкой СЭ размерами 5.5×5.5 mm, размещаемой в фокальном пятне линзы Френеля, был установлен исследуемый фокон. Линзовая и фотоприемная панели соединялись боковыми стенками. Внешний вид модуля показан на рис. 2.

2. Методика измерений

Для измерения параметров концентраторных фотоэлектрических модулей был использован лабораторный импульсный измерительный комплекс, включающий в себя импульсный источник света (ксеноновую лампу), коллиматор, систему позиционирования оптических элементов и модуля в целом и систему регистрации излучения [23]. Оптическая система измерительного комплекса обеспечивала формирование светового потока с плотностью излучения 1000 W/cm^2 , спектральным составом, соответствующим AM1.5D, и угловой расходимостью, идентичной расходимости светового потока, идущему от солнечного диска (32 arcmin). Система позиционирования комплекса обеспечивала прецизионные перемещения в световом потоке каждого из элементов исследуемых концентрирующих систем в трех координатах и поворот всей установленной конструкции относительно оптической оси падающего излучения. Шаги линейных перемещений и углы поворотов задавались с помощью компьютерной программы системы регистрации, которая также обеспечивала управление излучением лампы-вспышки, запись нагрузочной вольт-амперной характеристики (ВАХ) СЭ за время одиночного светового импульса и расчет таких параметров ВАХ, как ток короткого замыкания (I_{sc}), выходную электрическую мощность в точке оптимальной нагрузки (P_{max}), фактор заполнения ВАХ (FF) и эффективность фотоэлектрического преобразования излучения, падающего на поверхность линзы Френеля.

При определении влияния фоконов разной конфигурации на КПД исследуемого модуля линза Френеля и солнечный элемент с исследуемым фоконом закреплялись в держателях, обеспечивающих их взаимное соосное расположение в фокальной плоскости линзы Френеля, а оптическая ось фокусирующей системы устанавливалась параллельной оптической оси коллиматора. При облучении линзы Френеля коллимированным излучением от лампы-вспышки системой регистрации производились записи ВАХ СЭ и проводились расчеты КПД модулей с выбранным фоконом. Сравнение полученных результатов с КПД модулей с фокусирующей системой без фокона позволяли оценить влияние фоконов на характеристики исследуемых концентраторных модулей.

Система позиционирования позволяла осуществлять прецизионные перемещения СЭ с установленным фоконом в направлениях параллельном либо перпендикулярном оптической оси линзы Френеля. Это давало

возможность определять оптимальные значения фокусного расстояния концентрирующих систем с фоконами и предельные значения погрешностей при монтаже оптических элементов в КФЭМ.

Для исследования разориентационных характеристик фокусирующая система с фоконом либо единичный модуль устанавливались на поворотный столик, имеющий ось вращения, перпендикулярную оптической оси коллиматора. При измерениях осуществлялись дискретные повороты столика на фиксированные значения угла поворота и при облучении световыми импульсами в каждом положении производились записи ВАХ и определялись значения тока короткого замыкания. По результатам ВАХ строилась разориентационная кривая модуля, т.е. зависимость тока короткого замыкания от угла отклонения оптической оси модуля относительно оптической оси коллиматора. Поскольку величина тока короткого замыкания пропорциональна числу квантов излучения, падающего на фотоприемную площадку СЭ, то построенная разориентационная кривая характеризует только параметры фокусирующей системы модуля. Допустимый диапазон углов отклонения ($\pm W_{0.9}$) оценивался по полуширине этой кривой на уровне 0.9 от значения I_{sc} при нормальном падении лучей на первичную линзу.

3. Результаты лабораторных исследований

На первом этапе исследований характеристик изготовленных образцов фоконов, линза Френеля квадратной формы, размерами 120×120 mm устанавливалась перпендикулярно направлению светового потока измерительного комплекса. Трехкаскадный СЭ с размером фотоприемной площадки 5.5×5.5 mm был установлен на фокусном расстоянии 225 mm соосно с линзой Френеля. Эффективность преобразования излучения в модулях без фоконов составляла 32.5%. Исследуемый фокон закреплялся в держателе и размещался на поверхности фотоприемной площадки так, что стороны выходного окна фокона устанавливались параллельно боковым граням СЭ и симметрично относительно центра фотоприемной площадки. При проведении данной серии исследований все фоконы имели размер выходной апертуры 4.5×4.5 mm.

На рис. 3 показаны измеренные значения КПД модулей с использованием в качестве вторичных концентраторов групп фоконов разной высоты в зависимости от угла наклона боковых граней.

На рис. 4 продемонстрирован рост эффективности преобразования излучения в модулях при увеличении высоты фоконов, имеющих разные углы наклона боковых граней.

Как видно из результатов измерения, приведенных на рис. 3, во всех группах фоконов одинаковой высоты наблюдаются диапазоны оптимальных значений углов наклонов боковых граней, при которых значения

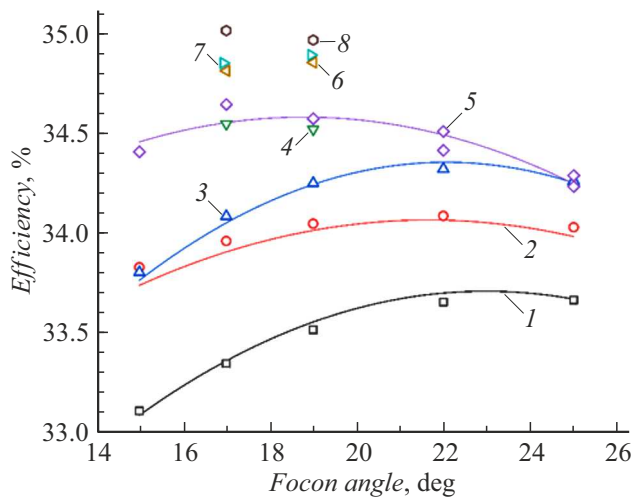


Рис. 3. Эффективность преобразования излучения в модулях с фоконами разной высоты в зависимости от угла наклона боковых граней фоконов. Высота фокона: 1 — 5, 2 — 10, 3 — 15, 4 — 20, 5 — 25, 6 — 30, 7 — 40, 8 — 50 mm.

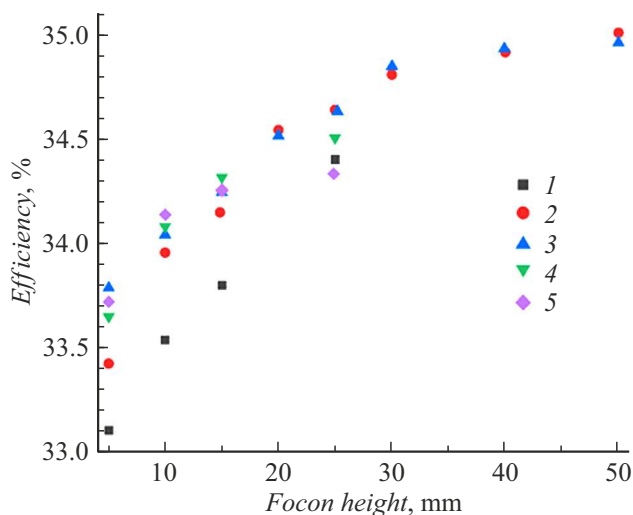


Рис. 4. Эффективность преобразования излучения в модулях с фоконами с разными углами наклона боковых граней в зависимости от высоты фоконов. Угол наклона: 1 — 15, 2 — 17, 3 — 19, 4 — 22, 5 — 25°.

эффективности преобразования излучения максимальные. Для фоконов высотой от 5 до 15 mm значения оптимальных углов наклонов находятся в диапазоне 21–23°. Для фоконов высотой от 20 до 30 mm — в диапазоне 17–19°. Уменьшение эффективности фоконов при значениях углов наклонов боковых граней, меньше оптимальных, объясняется уменьшением угла захвата рассеянного излучения от линзы Френеля при уменьшении входной апертуры фоконов, а спад кривых эффективности при значениях углов наклонов больше оптимальных — увеличением оптических потерь при росте числа переотражений света от боковых граней.

Результаты, приведенные на рис. 4, показывают, что при использовании фоконов всех конфигураций наблюдается увеличение эффективности преобразования излучения с ростом высоты фокона. Этот эффект объясняется увеличением угла захвата рассеянного излучения от линзы Френеля при увеличении входной апертуры фоконов с ростом высоты и приближении входного окна фоконов к линзе Френеля. Однако стоит отметить, что при высоте фоконов выше 30 mm увеличение эффективности преобразования света незначительно. Учитывая значительный дополнительный расход материалов при изготовлении высоких фоконов и сложности, возникающие при закреплении высоких фоконов на поверхностях СЭ в фотоэлектрических модулях, оптимальными представляются фоконы высотой около 25 mm при углах наклонов боковых граней 17–19°.

Следует отметить, что установка граней выходного окна фоконов непосредственно на фотоприемных площадках СЭ может вызывать повреждения фотоприемных поверхностей и контактной сетки, что приводит к уменьшению эффективности преобразования излучения и снижению срока службы фотоэлектрических модулей. Поэтому при сборке концентраторных фотоэлектрических модулей с элементами вторичной оптики целесообразно размещение фоконов над поверхностью фотоприемных площадок с зазором.

Были проведены исследования влияния величины зазора между гранями выходного окна фоконов и поверхностью фотоприемной площадки СЭ на эффективность фокусировки излучения. При проведении измерений были использованы фоконы одинаковой высоты 25 mm с разными размерами выходной апертуры. Для сохранения величин фокусируемых световых потоков все фоконы были выполнены с одинаковой входной апертурой, размерами 21.7×21.7 mm и разными наклонами боковых граней.

На рис. 5 показано изменение эффективности преобразования излучения в модулях с фоконами высотой 25 mm с разными размерами выходной апертуры в зависимости от величины зазора между гранями выходного окна фоконов и поверхностью фотоприемной площадки СЭ.

Сопоставление хода кривых, приведенных на рис. 5, позволяет сделать вывод о том, что в фоконах с размерами выходной апертуры 4.5×4.5 и 5×5 mm увеличение величины зазора между гранями выходного окна фоконов и поверхностью фотоприемной площадки до 0.7–0.8 mm не приводит к существенному изменению эффективности преобразования. Такой ход кривых объясняется тем, что размер сфокусированного линзой светового пятна на поверхности СЭ меньше размера выходной апертуры фокона, а добавка в эффективности фокусирующей системы происходит за счет фокусировки боковыми гранями фоконов рассеянного излучения линзы Френеля. При увеличении зазора более 0.7–0.8 mm часть сфокусированных лучей попадает на боковые грани фоконов вблизи выходного отверстия и

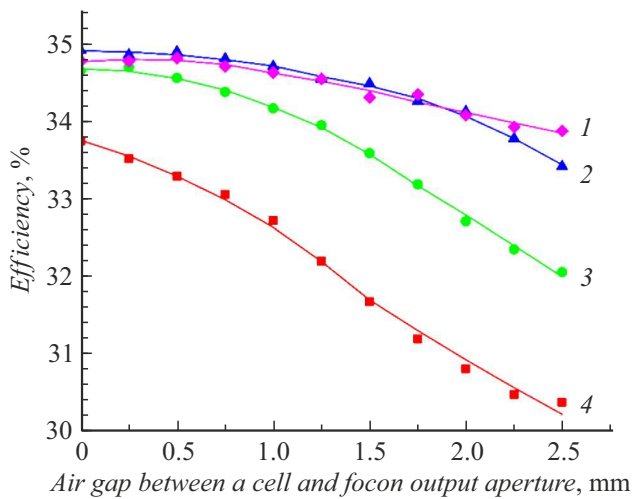


Рис. 5. Эффективность преобразования излучения в модулях с фоконами с разными размерами выходной апертуры в зависимости от величины зазора между гранями выходного окна фоконов и поверхностью фотоприемной площадки СЭ. Размер выходной апертуры: 1 — 5×5 , 2 — 4.5×4.5 , 3 — 4×4 , 4 — 3.5×3.5 mm.

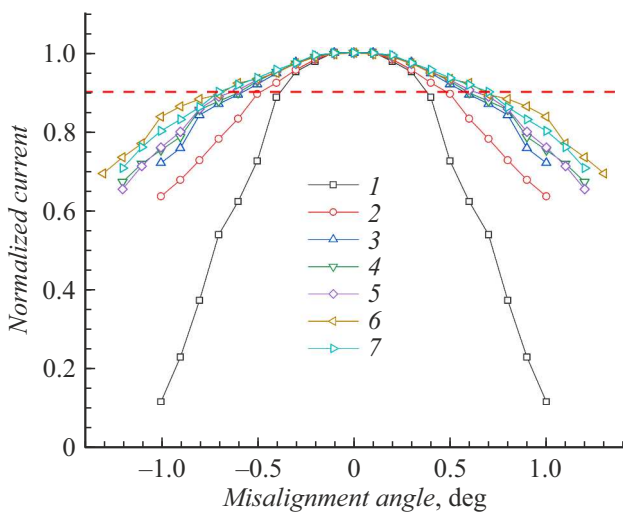


Рис. 6. Разориентационные характеристики КФЭМ без фокона (1) и с установленными фоконами с соответствующими углами наклона граней и высотами: 2 — 19 и 10; 3 — 19 и 15; 4 — 17 и 25; 5 — 19 и 25; 6 — 17 и 40; 7 — 19° и 40 mm. Красной штриховой линией (в онлайн версии) обозначен уровень, выше которого концентрация излучения, фокусируемого на фотоприемную поверхность СЭ, снижается не более чем на 10% от максимальной.

отражается за пределы фотоприемной площадки СЭ. В фоконах с размерами выходной апертуры 4×4 mm, близкими размерам сфокусированного светового пятна, такой эффект наблюдается при величине зазора более 0.2 mm. В случае, когда размер сфокусированного пятна больше выходной апертуры фокона (3.5×3.5 mm), часть сфокусированных лучей от линзы переотражаются

гранями фокона за пределы фотоприемной площадки СЭ при размещении фокона на поверхности СЭ, и доля этих лучей растет с увеличением зазора.

Возможность размещения фоконов с размерами выходной апертуры 4.5×4.5 и 5×5 mm над поверхностью фотоприемных площадок СЭ с зазором до 0.7 mm без уменьшения эффективности преобразования излучения позволяет устанавливать на фотоприемные поверхности элементы конструкции, защищающие поверхности от механических воздействий и воздействий внешней среды.

В ходе экспериментов было продемонстрировано, что наклейка на поверхности СЭ пластин из оптического стекла толщиной 0.2 mm оптическим силиконом с последующей установкой на поверхности стекла фоконов разной конфигурации с размерами выходной апертуры 4.5×4.5 mm приводила к снижению эффективности преобразования излучения на 4% по сравнению с вариантом размещения этих фоконов непосредственно на фотоприемных поверхностях СЭ. Такое снижение эффективности объясняется потерями на отражение на границе стекло-воздух и могут быть уменьшены за счет просветления поверхности стекла.

Влияние фоконов разной конфигурации на разориентационные характеристики фотоэлектрических модулей представлено на рис. 6.

Были произведены измерения разориентационных характеристик модулей, содержащих фоконы высотой от 10 до 40 mm и углами наклона граней 17 и 19°. Для сравнения на рис. 6 представлена разориентационная характеристика модуля без фокона. Как и следовало

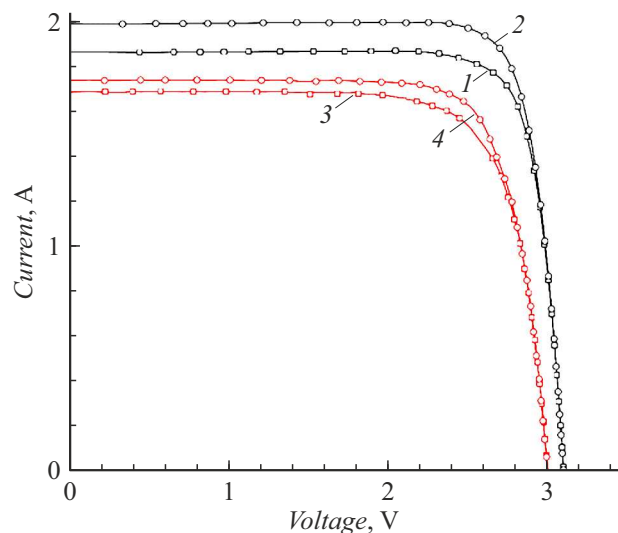


Рис. 7. ВАХ КФЭМ с линзой Френеля размерами 120×120 mm и трехкаскадным GaInP/GaAs/Ge СЭ размерами 5.5×5.5 mm, записанные при облучении импульсным имитатором: модуль без фокона (1), модуль с установленным фоконом высотой 40 mm (2) и записанные при облучении прямым солнечным излучением: модуль без фокона (3), модуль с установленным фоконом высотой 40 mm (4).

Результаты измерений электрических характеристик модулей, полученные при облучении световым потоком импульсного имитатора солнечного излучения и прямым солнечным излучением

Условия испытаний	Фоко́н	Солнечная инсоляция, W/m^2	I_{sc} , А	U_{xx} , V	I_{opt} , А	U_{opt} , V	P , W	FF , %	Eff, %
Лабораторные	Нет	1000	1.856	3.103	1.739	2.706	4.707	81.7	32.69
Лабораторные	Есть	1000	1.982	3.103	1.873	2.702	5.061	82.3	35.15
Натурные	Нет	824	1.681	3.006	1.513	2.466	3.734	74.7	31.46
Натурные	Есть	824	1.731	3.001	1.629	2.463	4.014	77.3	33.8

Примечание. I_{sc} — ток короткого замыкания, U_{xx} — напряжение холостого хода, I_{opt} — ток в точке оптимальной нагрузки, U_{opt} — напряжение в точке оптимальной нагрузки, P — мощность, FF — фактор заполнения ВАХ, Eff — эффективность.

ожидать, наибольшее уширение разориентационных кривых наблюдается в модулях с фоконами высотой 40 мм. Уменьшение угла наклона хода разориентационных кривых при увеличении высоты фоконов объясняется уменьшением расстояния между центром линзы Френеля и плоскостью входного окна фоконов, что приводит к меньшим линейным смещениям входной апертуры более высоких фоконов при одинаковых углах разориентации фокусирующей системы модулей относительно направления падения солнечного излучения. Изменение углов наклона боковых граней фоконов 17–19° не приводят к существенным изменениям хода кривых.

Из хода кривых, приведенных на рис. 6, можно считать допустимые углы разориентации $W_{0,9}$, определяемые на уровне 90% от максимального значения кривой, для фокусирующей системы модулей, образованной линзой Френеля, размерами 120 × 120 мм с фокусом 225 мм и СЭ и размерами фотоприемной площадки 5.5 × 5.5 мм с фоконами разной конфигурации. Без фоконов $W_{0,9}$ составляет ±0.4°. Установка над поверхность СЭ фокон высотой 40 мм увеличивает допустимый угол разориентации $W_{0,9}$ до значения ±0.75°.

Для определения влияния фоконов на эффективность преобразования излучения концентраторных модулей с фокусирующей системой на основе линз Френеля размером 120 × 120 мм и вторичных концентраторов в виде полых алюминиевых фоконов высотой 40 мм использовались модули, внешний вид которых представлен на рис. 2. При проведении измерений в модулях были установлены фоконы высотой 40 мм с углами наклона граней 17°. Измерение параметров исследуемых модулей проводилось в лабораторных условиях при облучении импульсным имитатором солнечного излучения, обеспечивающим энергетическую освещенность 1000 W/m^2 со спектром AM1.5D, при температуре окружающей среды $T = 24 \pm 1^\circ C$, а также в натуральных условиях при облучении прямым солнечным излучением мощностью 824 W/m^2 и температуре окружающей среды $T = 22^\circ C$. На рис. 7 приведены ВАХ концентраторных модулей с установленными фоконами и без них, а в таблице представлены результаты измерений электрических характеристик модулей.

При облучении импульсным имитатором солнечного излучения (при энергетической освещенности

1000 W/m^2), максимальная эффективность преобразования света в модуле с установленным фоконом высотой 40 мм составила 35.1%. Максимальная эффективность преобразования света в модуле с установленным фоконом в условиях облучения прямым солнечным излучением мощностью 824 W/m^2 составила 33.8%.

Уменьшение эффективности преобразования света модулями при облучении прямым солнечным излучением в натуральных условиях связано с повышением рабочей температуры СЭ в условиях непрерывной засветки. Второй причиной снижения эффективности модулей является изменение спектрального распределения солнечного излучения на широте Санкт-Петербурга при уровнях мощности 824 W/m^2 по сравнению с эталонным спектром AM1.5D, на которое рассчитано спектральное распределение чувствительности слоев трехкаскадного СЭ.

Полученные значения эффективности преобразования излучения разработанных концентраторных фотоэлектрических модулей с элементами вторичной оптики в виде фоконов соответствуют значениям лучших зарубежных аналогов [4,24].

Заключение

Исследованы характеристики КФЭМ, фокусирующая система которых содержала линзы Френеля размерами 120 × 120 мм и вторичные концентраторы в виде полых алюминиевых фоконов разных размеров и конфигураций с внутренними зеркальными стенками. В качестве приемников излучения были использованы трехкаскадные СЭ с размером фотоприемной площадки 5.5 × 5.5 мм. Для проведения экспериментов были изготовлены фоконы высотой от 5 до 50 мм, углами наклона боковых граней от 15 до 25° и размерами выходной апертуры от 3.5 × 3.5 до 5 × 5 мм.

Было установлено, что при использовании фоконов всех конфигураций наблюдается увеличение эффективности преобразования излучения с ростом высоты фокон. При облучении КФЭМ световым потоком импульсного имитатора солнечного излучения, значения эффективности преобразования излучения в модулях с фоконами высотой 5 мм возрастали до 33.8%, по сравнению со значением 32.5% в модулях без фоконов,

и до 35% в модулях с фоконами высотой 50 mm. Было определено, что для фоконов высотой от 5 до 15 mm значения оптимальных углов наклонов боковых граней находятся в диапазоне 21–23°, для фоконов высотой от 20 до 30 mm — в диапазоне 17–19°.

Были произведены измерения разориентационных характеристик модулей, содержащих фоконы высотой от 10 до 40 mm и углами наклона боковых граней 17 и 19°. В модулях с фоконами высотой 40 mm и углами наклона граней 17° были получены максимальные значения допустимого угла разориентации $W_{0,9} = \pm 0.75^\circ$, что почти в два раза превышает значения $W_{0,9} = \pm 0.4^\circ$ для аналогичных модулей, не содержащих фоконов.

Для модулей без вторичной оптики и содержащих фоконов высотой 40 mm с углами наклона граней 17° были определены значения эффективности преобразования прямого солнечного излучения в натуральных условиях. При мощности падающего солнечного излучения 824 W/m^2 и температуре окружающей среды $= 22^\circ \text{C}$ в модуле без вторичной оптики было получено максимальное значение электрической мощности в точке оптимальной нагрузки $P_{\text{max}} = 3.73 \text{ W}$ и эффективность преобразования излучения $\text{Eff} = 31.46\%$. Для модуля, в котором в качестве элемента вторичной оптики был использован фоконов высотой 40 mm с углами наклона боковых граней 17°, значения этих величин составили соответственно $P_{\text{max}} = 4.01 \text{ W}$ и $\text{Eff} = 33.8\%$, что соответствует значениям лучших зарубежных аналогов.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, в соответствии с соглашением № 22-19-00158 от 13.05.2022 г.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Fraunhofer ISE Develops the World's Most Efficient Solar Cell with 47.6 Percent Efficiency. [Online] Last accessed: 24.12.2022. https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/press-releases/2022/1322_PR_ISE_World_Record_47,6Percent-SolarCell.pdf
- [2] J.F. Geisz, R.M. France, K.L. Schulte, M.A. Steiner, A.G. Norman, H.L. Guthrey, M.R. Young, T. Song, T. Moriarty. *Nature Energy*, **5**, 326 (2020). DOI: 10.1038/s41560-020-0598-5
- [3] CPV Solar Cells. PV Solar Cells. [Online] Last accessed: 24.12.2022. <https://www.azurspace.com/index.php/en/products/products-cpv/cpv-solar-cells>
- [4] CPVMod — CPV Module in Modular Design. [Online] Last accessed: 24.12.2022. <https://www.ise.fraunhofer.de/en/research-projects/cpvmod.html>
- [5] New World Record for Concentrator Photovoltaics — 36.7 Percent for New Solar Module Using Highly Efficient Multi-Junction Solar Cells. [Online] <https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2014/new-world-record-for-concentrator-photovoltaics.html>
- [6] Zh.I. Alferov, V.M. Andreev, M.Z. Shvarts. In: *High-Efficient Low-Cost Photovoltaics. Recent Developments*, ed. by V. Petrova-Koch, R. Hezel, A. Goetzberger (Springer International Publishing, 2020), p. 133. DOI: 10.1007/978-3-030-22864-4
- [7] M. Green, E. Dunlop, J. Hohl-Ebinger, M. Yoshita, N. Kopidakis, A. Ho-Baillie. *Prog. Photovolt: Res. Appl.* **28** (1), 3 (2019). DOI: 10.1002/pip.3228
- [8] Zh.I. Alferov, V.M. Andreev, V.D. Rumyantsev. *III–V Heterostructures in Photovoltaics. Concentrator Photovoltaics*. Eds. A. Luque Lopez, V.M. Andreev. *Springer Ser. in Optical Sciences* (Berlin-Heidelberg, Springer-Verlag, 2007), v. 130, p. 25–50.
- [9] V.D. Rumyantsev. *Springer Series in Optical Sciences*, **130**, 151 (2007).
- [10] V.A. Grilikhes, M.Z. Shvarts, A.A. Soluyanov, E.V. Vlasova, V.M. Andreev. *The new Approach to Design of Fresnel Lens Sunlight Concentrator. Proc. of the 4th Int. Conf. on Solar Concentrators for the Generation of Electricity or Hydrogen* (El Escorial, Spain, 2007)
- [11] S. Kurtz, M.J. O'Neill. *Estimating and Controlling Chromatic Aberration Losses for Two-Junction, Twoterminal Devices in Refractive Concentrator Systems*. 25th PVSC, 361 (1996).
- [12] G. Peharz, J. Jaus, P. Nitz, T. Schmidt, T. Schult, A.W. Bett. *Development of Refractive Secondary Optics for FLATCON Modules*. Proceeding 23rd EPVSEC (2008).
- [13] I. Garca, C. Algora, I. Rey-Stolle, B. Galiana. *Study of Non-Uniform Light Profiles on High Concentration III-V Solar Cells Using Guasi-3D Distributed Models, Proceeding 33rd IEEE Photovoltaic Specialist Conf.* (2008).
- [14] C. Dominguez, I. Anton, G. Sala, S. Askins. *Photovoltaics*, **21** (7), 1478 (2013).
- [15] R. Herrero, M. Victoria, C. Dominguez, S. Askins, I. Anton, G. Sala. *AIP Conf. Proc.*, 1679, 050006 (2015);
- [16] M. Victoria, R. Herrero, C. Dominguez, I. Anton, S. Askins, G. Sala. *Prog. Photovoltaics*, **21** (3), 308 (2013).
- [17] P.A. Davies. *Pure Appl. Opt.*, **2**, 315 (1993).
- [18] M. Victoria, C. Dominguez, I. Anton, G. Sala. *Opt. Express*, **17**, 6487 (2009).
- [19] R. Winston, J. Miano, P. Bentez. *Nonimaging Optics* (2005)
- [20] P. Benitez, J.C. Minano, P. Zamora, R. Mohedano, A. Cvetkovic, M. Buljan, J. Chaves, M. Hernandez. *Opt. Express*, **18**, 25 (2010).
- [21] J. Jaus, P. Nitz, G. Peharz, G. Siefer, T. Schult, O. Wolf, M. Passig, T. Gandy, A.W. Bett. *Second Stage Reflective Andrefractive Optics for Concentrator Photovoltaics. 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conf.* (San Diego, USA, 2008), p. 1–5.
- [22] V.M. Andreev, V.D. Rumyantsev, N.Yu. Davidyuk, E.A. Ionova, V.R. Larionov, D.A. Malevskiy, A.O. Monastyrenko, P.V. Pokrovsky, N.A. Sadchikov. *Concentrator PV installations based on modules with Fresnel minilens parquets, Proceedings of the 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition/5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, (Valencia, Spain, 6–10 September 2010), p. 102–107, ISBN 3-936338-26-4

- [23] V.D. Rumyantsev, V.R. Larionov, D.A. Malevskiy, P.V. Pokrovskiy, N.A. Sadchikov. *Solar Simulator For Characterization Of The Large-Area HCPV Modules, Proceedings of the 7th International Conference on Concentrating Photovoltaics (CPV-7)* (Las Vegas, USA, AIP Conf. Proc., April 4–6, 2011), v. 1407, p. 212–215.
- [24] E. Gerster, T. Gerstmaier, A. Gombert, R. Krause, S. Riesena, S. Wanka, T. Zech. AIP Conf. Proc., **1679**, 040006 (2015).
DOI: 10.1063/1.4931517