

Концентраторы солнечного излучения в паре с многопереходными фотоэлектрическими преобразователями в наземных гелиоэнергетических установках. Часть 2

© Е.А. Ионова,¹ М.В. Уланов,¹ Н.Ю. Давидюк,² Н.А. Садчиков¹

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский Академический университет РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: ionova@mail.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 23 июня 2016 г.)

Настоящая работа посвящена определению условий совместной работы пар „фотоэлектрический преобразователь–концентратор солнечного излучения“, используемых в гелиоэнергетических установках с концентраторами. Рассмотрены трехкаскадные фотопреобразователи на основе материалов A^3B^5 с различным распределением солнечного излучения по спектральным интервалам. Концентраторы солнечного излучения выполнены в виде линз Френеля со структурой силикон-на-стекле. Преломляющий профиль линз на основе силиконовой резины Wacker RT604 характеризуется значительным изменением показателя преломления от температуры. Определено влияние геометрических параметров линз Френеля, а также их рабочей температуры на характеристики концентрирования солнечного излучения в заданных спектральных интервалах. Рассчитаны параметры концентраторов, которые в паре с фотоэлектрическим преобразователем могут обеспечить эффективное функционирование гелиоэнергетической установки.

DOI: 10.21883/JTF.2017.04.44318.1951

Введение

В настоящей работе рассматривается эффективность преобразования солнечного излучения гелиоэнергетическими установками (ГЭУ) с высокоэффективными (КПД > 35%) трехкаскадными фотопреобразователями (ФЭП) на основе гетероструктур. Конструкция ГЭУ включает каркас, оснащенный приводами двуосевого слежения за Солнцем, и установленные на нем фотоэлектрические модули, каждый из которых содержит множество идентичных пар концентратор–ФЭП [1]. Концентратор представляет собой линзу Френеля квадратной формы из прозрачной силиконовой резины (СР), закрепленную на основании из стекла [2]. Ориентированный перпендикулярно направлению на Солнце концентратор перенаправляет падающее на него излучение на фоточувствительную область ФЭП, находящуюся в фокусе концентратора. В настоящей работе продолжается исследование пары концентратор–ФЭП — повторяющегося элемента фотоэлектрического модуля. От ее свойств зависит эффективность преобразования солнечной энергии и соответственно стоимость единицы вырабатываемой мощности.

В первой части настоящей работы [3] было предложено решение проблемы эффективного концентрирования излучения с учетом особенностей трехкаскадной структуры ФЭП. В рамках этого решения были исследованы оптические характеристики СР, задано определение эффективности пары (ЭП) концентратор–ФЭП,

предложен метод определения оптимального значения n_c — расчетного показателя преломления, параметра формулы для расчета углов наклона преломляющих поверхностей концентратора.

Также была рассмотрена конкретная пара концентратор–ФЭП с ФЭП1 (табл. 1) и концентратором с фокусным расстоянием $F = 80$ mm, стороной концентратора $a = 40$ mm и шириной преломляющей грани $s = 0.25$ mm. Для этой пары в условиях расчетной температуры $T_c = 25^\circ\text{C}$ был определен оптимальный расчетный показатель преломления $n_c = 1.4076$, обеспечивающий максимальную эффективность пары концентратор–ФЭП1, равную 90.92%.

Во второй части работы проводится сравнение двух пар с концентраторами со сходными свойствами и отличающимися ФЭП — ФЭП1 и ФЭП2. Спектральные характеристики ФЭП1 и ФЭП2, умноженные на спектр СИ AM1.5D, составляют мультиплицированные спектры (МС) для трех активных p – n -переходов (далее переходов). Спектры МС1–3 для ФЭП1 и ФЭП2 приведены на рис. 1, *c, d* в первой части работы [3]; они отличаются незначительно. Остальные параметры этих ФЭП приведены в табл. 1. ФЭП1 и ФЭП2 имеют разные размеры и формы фоточувствительной области (круг и квадрат), а также у них отличаются плотности фототока, генерируемого в каждом из трех p – n -переходах (J_{1-3}) при освещении неконцентрированным СИ со спектром AM1.5D и плотностью мощности 1000 W/m². В [3] было показано, что на величину ЭП η влияют только отно-

Таблица 1. Параметры ФЭП1 и ФЭП2

ФЭП	Размер, форма фоточувствительной области	Структура	Плотность фототока J , mA/cm^2 для трех $p-n$ -переходов		
			1	2	3
1	Круг, $\varnothing 1.7 \text{ mm}$	GaInP/GaAs/Ge	13.14	13.29	20.36
2	Квадрат, $3 \times 3 \text{ mm}$	GaInP/GaInAs/Ge	15.71	14.90	18.09

шения плотностей фототока J_{1-3} , а не их абсолютные значения:

$$\eta = \min(\eta_1 k_1, \eta_2 k_2, \eta_3 k_3) 100\%, \quad (1)$$

где η_1, η_2, η_3 — доли прошедшего через концентратор и попавшего на фоточувствительную область ФЭП излучения из соответствующего МС_{1-3} , а величины $k_1 = J_1/J_{\min}$, $k_2 = J_2/J_{\min}$, $k_3 = J_3/J_{\min}$ — увеличивающие коэффициенты для η_{1-3} . Индекс \min относится к наименьшей из трех плотностей фототока. Для ФЭП1 и ФЭП2 коэффициенты k_{1-3} составляют соответственно 1/1.01/1.55 и 1.05/1/1.21 для трех $p-n$ -переходов.

Для выявления влияния свойств ФЭП на характеристики пары концентратор в паре с ФЭП2 должен иметь параметры, пропорционально зависящие от параметров концентратора в паре с ФЭП1. В паре концентратор—ФЭП1 диаметр фоточувствительной области составлял 1.7 mm, фокус концентратора $F = 80 \text{ mm}$, ширина ступени концентратора s зависела от F как $F/320$, а сторона концентратора a — как $F/2$.

Квадратной форме $3 \times 3 \text{ mm}$ фоточувствительной области ФЭП2 соответствует диаметр 3 mm. В таком случае в паре концентратор—ФЭП2 концентратор должен иметь следующие параметры: $F = 140.8 \text{ mm}$, $a = 70.4 \text{ mm}$, $s = 0.44 \text{ mm}$.

В фотоэлектрическом модуле ФЭП2 ориентирован так, что его диагональ параллельна диагонали концентратора.

В [3] описан вычислительный алгоритм, с помощью которого для пар концентратор—ФЭП определяются распределения фотонов из МС_{1-3} по фоточувствительной области ФЭП, и с их помощью определяется ЭП η , распределения локальной концентрации (ЛК) СИ в виде МС_{1-3} , максимумы ЛК. В настоящей работе дополнительно будут определены следующие характеристики.

Во-первых, это распределения генерированных носителей тока (ГНТ) внутри трех активных $p-n$ -переходов ФЭП, которые соответствуют распределениям фотонов из МС_{1-3} по фоточувствительной области ФЭП, умноженным на соответствующие коэффициенты k_{1-3} . Нетождественные распределения ГНТ в этих слоях вызывают латеральные токи вдоль слоя, увеличивающие резистивные потери ФЭП. Из-за видоизменения спектра СИ в течение светового дня нетождественность этих распределений неизбежна, но общие резистивные потери будут тем меньше, чем больше будут соответствовать

друг другу распределения ГНТ в трех активных слоях при „среднем“ спектре AM1.5D.

Во-вторых, будет рассмотрена характеристика пары концентратор—ФЭП, позволяющая обозначить требования к точности выполнения фотоэлектрического модуля, — это зависимость ЭП η от расфокусировки, связанной с отклонением от фокусного расстояния между концентратором и ФЭП вдоль оптической оси в двух направлениях.

В-третьих, функционирование ГЭУ в условиях окружающей среды характеризует величина изменения ЭП η при расфокусировке из-за изменения температуры концентратора. Действительно, особенностью СР как оптического материала является значительное объемное расширение с ростом температуры. Ему соответствует значительное изменение дисперсионной зависимости показателя преломления, приводящее к размытию светового пятна в фокусе концентратора при температурах, отличающихся от температуры T_c , для которой концентратор был рассчитан. При этом часть излучения может выйти за пределы ФЭП и ЭП понизится.

1. Пара концентратор—ФЭП1

В разд. 1 продолжено исследование характеристик пары концентратор—ФЭП1, начатое в [3]. Были вычислены распределения ГНТ в трех переходах ФЭП1. Они показаны в сечении плоскостью, проходящей через оптическую ось и диагональ концентратора (кривые 1–3, рис. 1, *a*). Вертикальная штриховка идет от участков кривых с наименьшим среди трех переходов числом ГНТ: от центра до радиуса 0.28 mm это третий $p-n$ -переход, до радиуса 0.42 mm — второй, далее — первый. Поэтому направление движения ГНТ вдоль активных слоев в первом и втором переходах — от центра ФЭП к краю, в третьем переходе — наоборот, от края к центру. Разница между объемами под распределениями ГНТ и штрихованной областью пропорциональна доле ГНТ, составляющих латеральные токи. С помощью этого графика можно оценить степень нетождественности распределений ГНТ в активных слоях.

Для пары концентратор—ФЭП1 с указанными параметрами с помощью вычислительного алгоритма определена зависимость ЭП $\eta/100\%$ от расфокусировки вдоль оптической оси (сплошная линия, рис. 2, *a*). Условно варьировалось расстояние между концентратором и ФЭП

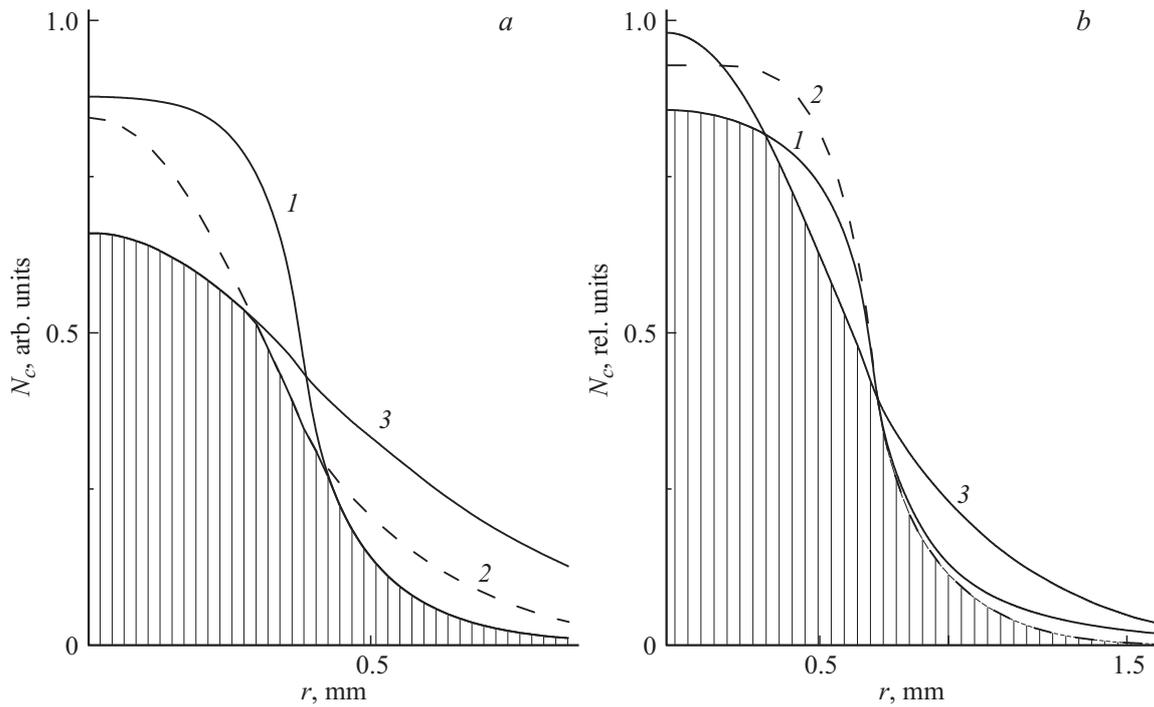


Рис. 1. Распределения ГНТ в трех $p-n$ -переходах (зависимости 1–3) в относительных единицах, построенные вдоль радиуса ФЭП, параллельного диагонали концентратора. Зависимости построены вдоль радиуса ФЭП1 $r = 0.85$ мм (а) и вдоль диагонали ФЭП2 от 0 до 2.12 мм (б). Штриховка отмечает число ГНТ, не образующих латеральные токи.

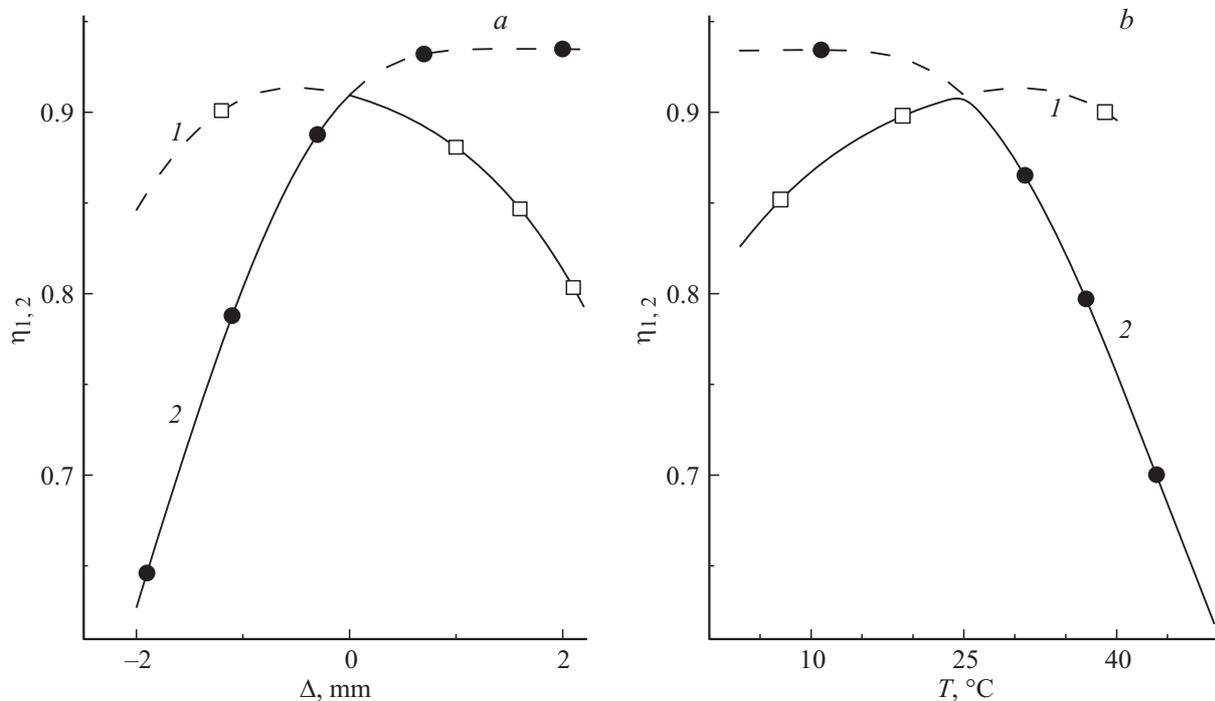


Рис. 2. Зависимость долей η_1 и η_2 (кривые 1 и 2) прошедшего через концентратор и попавшего на фоточувствительную область ФЭП1 из MC_1 и MC_2 , умноженных на коэффициенты $k_1 = 1.0$ и $k_2 = 1.01$ соответственно, от отклонения расстояния между концентратором и ФЭП1 от фокусного на величину Δ (а) и от температуры концентратора (б). Сплошная линия — эффективность пары $\eta/100\%$.

от сближения на -2 mm до $F = 80\text{ mm}$ к отдалению на $+2\text{ mm}$ и для каждого его значения определялись доли η_{1-3} прошедшего через концентратор и попавшего на фоточувствительную область ФЭП излучения из $МС_{1-3}$. Концентратор обеспечивает наибольшую собранность части светового пятна, преобразуемой первым переходом, при расстоянии между ним и ФЭП $79-80\text{ mm}$ (рис. 2, кривая 1). При этом часть светового пятна, преобразуемая вторым переходом, будет размыта, и тогда ЭП η совпадет с зависимостью для η_2 с коэффициентом $k_2 = 1.01$, как с наименьшей (рис. 2, кривая 2). В точке, соответствующей фокусному расстоянию 80 mm ($\Delta = 0\text{ mm}$), значения η_1 и η_2 1.01 сравниваются, обеспечив максимум ЭП. При расстоянии между концентратором и ФЭП больше 80 mm ЭП будет определяться η_1 . Наибольшая собранность части светового пятна, преобразуемой вторым переходом, начинается с расстояния 80.8 mm . Результаты вычислений показывают, что исследуемая пара достаточно чувствительна к неточностям сборки: ЭП η остается больше 90% только в интервале отклонений от фокуса $-0.15-+0.45\text{ mm}$ и опускается ниже 85% при расфокусировке за пределами $-0.65-+1.55\text{ mm}$.

Дополнительно в этом расчете можно рассматривать изменение положения ФЭП относительно концентратора как способ продемонстрировать влияние дисперсии показателя преломления $СР$ на свойства концентратора. А также показать, что в многпереходных ФЭП каждому $p-n$ -переходу соответствует свое оптимальное фокусное расстояние концентратора, и определить его значение.

Результаты расчета ЭП $\eta/100\%$ исследуемой пары при расфокусировке, вызванной изменением температуры концентратора, представлены на рис. 2, *b* (сплошная линия). С помощью вычислительного алгоритма определялись доли η_{1-3} попавшего на фоточувствительную область ФЭП излучения из $МС_{1-3}$ при условном варьировании температуры концентратора в интервале $0-50^\circ\text{C}$. Соответственно температуре варьировалась дисперсионная зависимость показателя преломления $СР$ (формулы (1)–(3) в [3]). Расчет показал, что при нагреве концентратора относительно температуры $T_c = 25^\circ\text{C}$, для которой он был рассчитан, ЭП определяется зависимостью $k_2\eta_2(T)$, при охлаждении ЭП определяется $k_1\eta_1(T)$, где $k_1 = 1.0$, $k_2 = 1.01$.

Действительно, как было показано выше, лучи с длинами волн в области поглощения первого $p-n$ -перехода пересекаются на оптической оси на меньшем, чем F , расстоянии, а лучи, относящиеся ко второму переходу, пересекаются на расстоянии, большем F . Тогда при нагреве концентратора и соответственно уменьшении показателей преломления $СР$ $n(\lambda)$ точки пересечения лучей сдвинутся вдоль оптической оси в направлении от концентратора. При этом в фокусной плоскости часть светового пятна, преобразуемая вторым переходом, значительно размоется, а η_2 уменьшится. Наоборот, при охлаждении концентратора точки пересечения лучей на

оптической оси приблизятся к концентратору и в фокусной плоскости наибольшее размытие будет у светового пятна, относящегося к первому $p-n$ -переходу. В точке $T_c = 25^\circ\text{C}$ на графике зависимости $k_1\eta_1(T)$ и $k_2\eta_2(T)$ сравнялись при наибольшем значении ЭП.

Результаты расчета показывают сильную зависимость характеристик пары концентратор–ФЭП от отклонения температуры концентратора от расчетной температуры T_c : ЭП η остается больше 90% в узком интервале $19.8-26.5^\circ\text{C}$ и опускается ниже 85% при температуре за пределами интервала $6.7-32.6^\circ\text{C}$.

Зависимости $\eta_3(\Delta)$ и $\eta_3(T)$, умноженные на $k_3 = 1.55$, показывают избыточное количество поглощенных фотонов, поэтому не приведены на графике.

2. Концентратор для ФЭП2

Основные параметры концентратора (F, a, s) для ФЭП2 задавались, исходя из пропорциональности параметрам пары концентратор–ФЭП1. Тем не менее у пары концентратор–ФЭП2 имеются существенные отличия:

- большая площадь фоточувствительной области, так как к круглой форме области добавляются угловые зоны квадрата;

- большее фокусное расстояние в абсолютных значениях;

- среди коэффициентов k_{1-3} , относящихся к трем $p-n$ -переходам, присутствует увеличивающий коэффициент для первого $p-n$ -перехода, а не для второго ($k_1 = 1.05$; $k_2 = 1.0$), в отличие от пары концентратор–ФЭП1, где $k_1 = 1.0$ и $k_2 = 1.01$;

- в форме спектральных характеристик переходов ФЭП и соответственно в форме $МС$.

Первые три отличия являются преимуществами пары концентратор–ФЭП2, что отразится в ее характеристиках.

Как и в [3], для известного набора параметров ($F, a, s, T_c = 25^\circ\text{C}$) и для каждого из значений параметра n_c от 1.38 до 1.42 с шагом 0.001 были определены углы наклона преломляющих поверхностей концентратора (формула (5) в работе [3]). Для этих концентраторов был произведен расчет относящихся соответственно к трем $p-n$ -переходам долей η_{1-3} , прошедшего через концентратор и попавшего на фоточувствительную область ФЭП2 излучения. Расчет проводился для спектров $МС_{1-3}$, определенных для спектральной характеристики ФЭП2 (рис. 1, *d* [3]).

Зависимости $\eta_{1-3}(n_c)$ приведены на рис. 3, *a*, их форма повторяет форму тех же зависимостей для пары концентратор–ФЭП1 (рис. 3, *a* в [3]). Имеются „предпочтительные“ для каждого перехода интервалы значений n_c , обусловленные каскадной структурой ФЭП и дисперсией показателя преломления $СР$. Из-за пропорциональности параметров рассматриваемых пар значения предпочтительных для каждого $p-n$ -перехода интервалов также почти совпа-

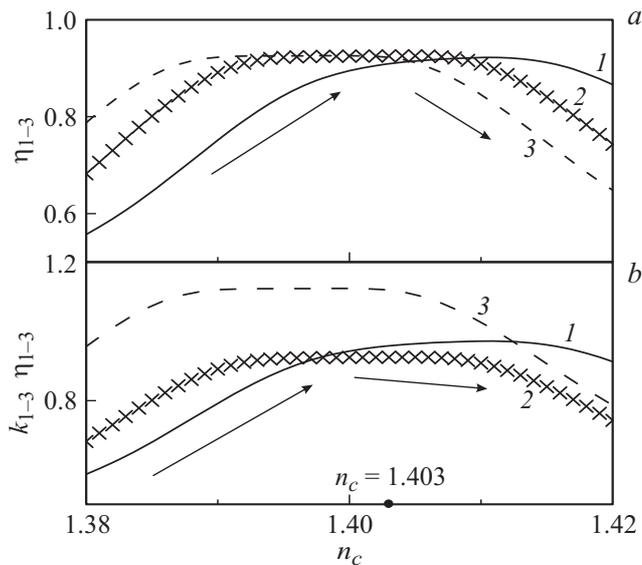


Рис. 3. *a* — число фотонов η_{1-3} , прошедших концентратор и попавших на фоточувствительную область ФЭП2, в долях от падающих на концентратор фотонов из MC_{1-3} в зависимости от параметра расчета концентратора n_c (кривые 1–3 для трех p – n -переходов); *b* — зависимости из части (*a*), умноженные на коэффициенты k_{1-3} : для первого p – n -перехода $k_1 = 1.05$, для второго $k_2 = 1.0$, для третьего $k_3 = 1.21$.

дают. Для первого p – n -перехода оптимальный $n_c = 1.405–1.414$ (1.406–1.412), для второго оптимальный $n_c = 1.393–1.408$ (1.395–1.406), для третьего 1.389–1.404 (1.390–1.402) (в скобках указаны соответствующие данные для пары концентратор–ФЭП1). Небольшое уширение оптимальных интервалов n_c авторы связывают с большим в абсолютных значениях фокусным расстоянием в паре концентратор–ФЭП2.

Влияние формы фоточувствительной поверхности ФЭП лучше оценить, сравнивая зависимости $\eta_1(n_c)$ для световых пятен, относящихся к первым p – n -переходам ФЭП1 и ФЭП2, как самым размытым и имеющим большие оптические потери. В зависимости для первого p – n -перехода ФЭП1 максимальная $\eta_1 = 0.9128$ (рис. 3, *a* [3]), а в зависимости для первого p – n -перехода ФЭП2 максимальная $\eta_1 = 0.9235$ (рис. 3, *a*). Разница в 0.0107 связана только со сменой формы фоточувствительной области ФЭП с круглой на квадратную и увеличением ее площади за счет углов квадрата.

Расчетный показатель преломления n_c для расчета оптимального для ФЭП2 концентратора определялся по графику, на котором зависимости $\eta_{1-3}(n_c)$, приведенные на рис. 3, *a*, умножены на соответствующие коэффициенты k_{1-3} (рис. 3, *b*). Зависимость $\eta_3(n_c)k_3$, так же как и для пар с ФЭП1, показывает самую большую долю поглощенных фотонов в рассматриваемом интервале n_c . На рис. 3, *b* ход зависимости ЭП $\eta(n_c)/100\%$ совпадает с ходом самой низкой кривой по шкале: это участки кривых $\eta_1(n_c)$ (1) и $\eta_2(n_c)$ (2), продублированные стрелками. Зона максимума зависимости ЭП $\eta(n_c)/100\%$

представляет собой широкий пологий участок на интервале $n_c = 1.398–1.408$, что затрудняет выбор оптимального расчетного показателя преломления n_c для концентратора с заданными параметрами F, a, s . Для выбора оптимального n_c предлагается рассмотреть зависимости ЭП η от расфокусировок для разных n_c .

На рис. 4 представлены результаты исследований пар с ФЭП2 и концентраторами, рассчитанными для трех значений $n_c = 1.400, 1.403, 1.406$. Это зависимости ЭП η от температуры концентратора в диапазоне 0–50°C и зависимости ЭП η от сдвига концентратора вдоль оптической оси от –4 до +4 mm. Значение n_c — среднее на пологой части зависимости $\eta_2(n_c)$ (рис. 3, *b*), равное 1.403, ожидаемо оказалось оптимальным, так как для обеих расфокусировок по температуре и расстоянию вдоль оптической оси в указанных диапазонах соответствующая ЭП η оказалась наибольшей.

3. Исследование концентратора для ФЭП2

Рассмотрим влияние расфокусировок на ЭП η концентратор–ФЭП2 с $n_c = 1.403$ (рис. 4, кривые 2). Зависимости $\eta(\Delta)$ представляют собой объединение частей зависимости $\eta_2(\Delta)$ и зависимости $\eta_1(\Delta)$, умноженной на коэффициент $k_1 = 1.05$, где $\eta_2(\Delta)$ — возрастающий участок, плавно переходящий в пологую часть, а $\eta_1(\Delta)k_1$ — убывающая часть, соединенная с пологой не плавно. Аналогично для зависимости $\eta(T)$.

Расположение оптимального $n_c = 1.403$ в середине пологой части зависимости $\eta(n_c)$ на рис. 3, *b* обеспечило наличие пологих частей $\eta(\Delta)$ и $\eta(T)$ в результатах исследования на рис. 4, что положительно отразилось на характеристиках пары концентратор–ФЭП2 при расфокусировках. Действительно, исследуемая пара не чувствительна к неточностям сборки: ЭП η остается больше 90% в интервале отклонений от фокуса Δ от –3.04 до 3.16 mm и опускается ниже 85% при расфокусировке, большей интервала исследования –4.0–4.0 mm. Рассматриваемая пара отличается наличием интервала расстояний между концентратором и ФЭП –1.2–2.0 mm и интервала температур 12.5–32.5°C, в которых ЭП η постоянна при значении выше 92%. При этом зависимость ЭП η от отклонения от расчетной температуры $T_c = 25^\circ\text{C}$ выражена слабо: η остается больше 90% в интервале 5–45°C и опускается ниже 85% при температуре за пределами интервала исследования 0–50°C.

Расчет распределения фотонов из MC_{1-3} в фокусной плоскости для температуры T_c показал следующие результаты: в случае предельно большого ФЭП2 η_{1-3} равны 0.9247/0.9256/0.9261, для настоящего размера ФЭП2 (3 × 3 mm) $\eta_{1-3} = 0.9096/0.9253/0.9215$. Результаты умножения η_{1-3} на коэффициенты k_{1-3} будут относиться между собой как 0.9596/0.9253/1.1187 и тогда ЭП η рассматриваемой пары составляет 92.53%.

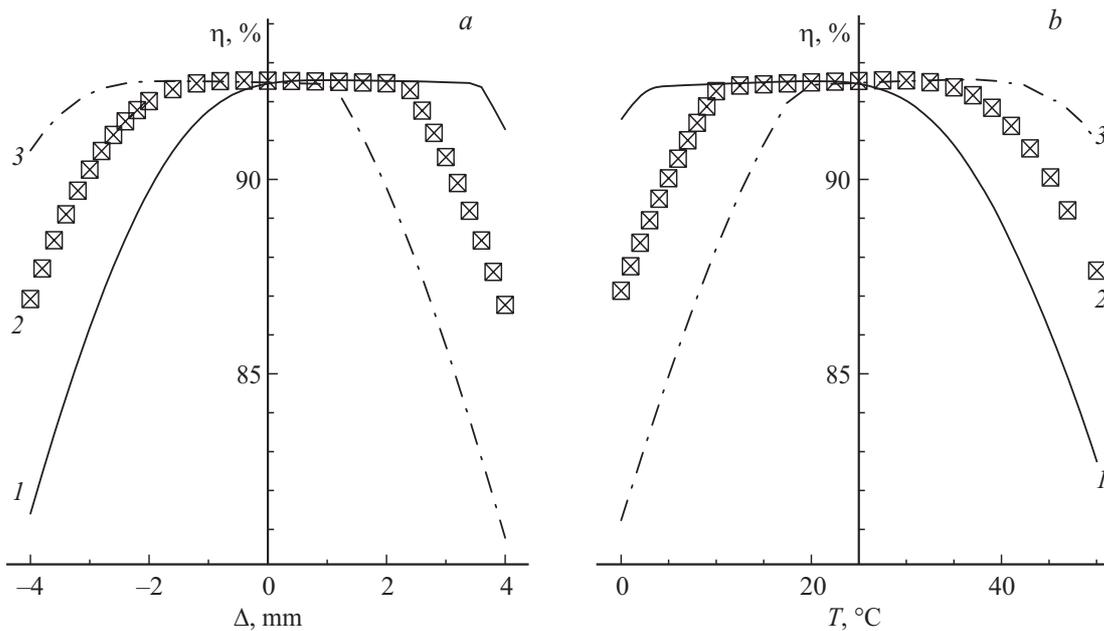


Рис. 4. Зависимость ЭП η пары концентратор–ФЭП2 при расфокусировках из-за отклонения Δ расстояния между концентратором и ФЭП от фокусного (*a*) и из-за изменения температуры концентратора относительно расчетной $T_c = 25^\circ\text{C}$ (*b*) для трех вариантов концентраторов n_c : 1 — 1.400, 2 — 1.403, 3 — 1.406.

На рис. 5 (слева) для трех p – n -переходов представлены распределения ЛК СИ в фокусной плоскости вдоль диагонали ФЭП2 от 0 до 2.12 mm. Максимумы ЛК составили $2451^\times/2800^\times/2431^\times$. Пропорциональное равенство пар с ФЭП1 и ФЭП2 отразилось в том, что максимумы ЛК для первого и второго переходов близки к показанным для пары с ФЭП1 значениям $2634^\times/2508^\times$ [3]. Однако распределение ЛК для третьего p – n -перехода пары с ФЭП2 более „собранное“ и максимум ЛК намного больше максимума ЛК для пары с ФЭП1, составляющего 1276^\times [3]. Это связано с отличиями в зависимостях $\eta_{1-3}(n_c)$: при оптимальном для пары с ФЭП2 $n_c = 1.403\eta_3$ близко максимуму (рис. 3, *b*), а оптимальному для пары с ФЭП1 $n_c = 1.4076$ соответствует низкая η_3 на убывающем участке зависимости $\eta_3(n_c)$ (рис. 3, *b* [3]). Это отличие не имеет практического значения ввиду избытка ГНТ в третьих p – n -переходах.

На рис. 5 также представлены двумерные схемы изменения ЛК в сфокусированном световом пятне отдельно для трех p – n -переходов. Первая смена цвета (концентрация от 1 до 400^\times) обозначает общую форму светового пятна на координатной сетке, следующие смены цвета через 800^\times демонстрируют скорость роста ЛК к центру. Наглядно показано, как из-за дисперсии показателя преломления СР отличаются размеры световых пятен и скорости роста ЛК к центру для трех переходов. При сравнении выступающих за границы ФЭП частей светового пятна на схеме для второго перехода (рис. 5, *b*) и на аналогичной схеме, приведенной в [3], для пары концентратор–ФЭП1, видно преимущество квадратной формы ФЭП над круглой.

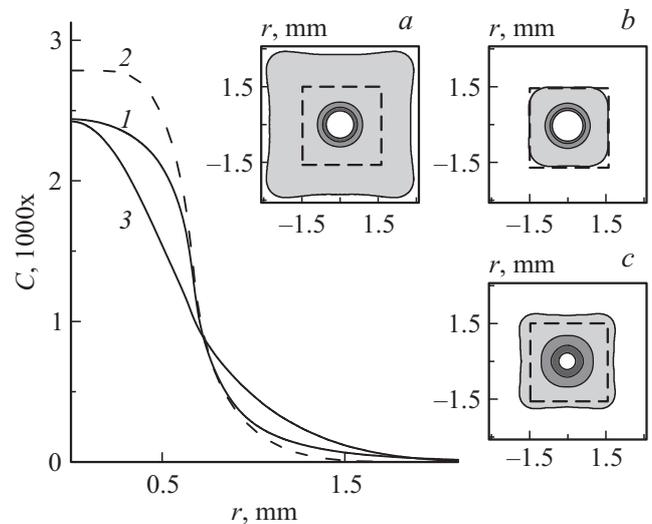


Рис. 5. Зависимости величины локальной концентрации C солнечного излучения от расстояния вдоль диагонали ФЭП2, построенные для трех p – n -переходов (линии 1–3) (слева). Схемы светового пятна для трех p – n -переходов ФЭП2 (*a*–*c*), где первая с краю смена заливки показывает изменение локальной концентрации от 1 до 400^\times , а последующие смены заливки показывают увеличение локальной концентрации на 800^\times ; границы фоточувствительной области ФЭП2 показаны штриховой линией.

Степень тождественности распределений ГНТ в трех p – n -переходах для пар с ФЭП1 и ФЭП2 можно сравнить с помощью рис. 1. Фокусное расстояние в паре концентратор–ФЭП2 больше, а с ростом фокусного

Таблица 2. Свойства пар концентратор–ФЭП2 с разными сочетаниями фокусных расстояний F и размеров концентратора a

F , mm	a , mm	x_c , обратный параметр расхода ФЭП	ЭП, %	ЛК _{max} · 10 ⁻³ , 1/2/3 p - n -переходы	Уменьшение ЭП, %	
					при 15/35°C	при $F - 2/F + 2$ mm
140	70	451	92.53	2.5/2.8/2.5	0.1/0.1	0.4/0.1
	80	589	92.22	3.0/3.5/2.8	0.7/0.8	1.5/2.0
	90	746	91.67	3.5/4.1/2.9	1.6/1.6	2.6/3.8
	100	921	90.74	3.9/4.8/3.1	5.7/4.0	5.0/7.0
	110	1115	88.37	4.6/5.4/2.6	5.2/7.5	8.8/6.0
120	60	331	92.56	2.6/2.8/1.9	0.1/0.0	0.5/0.0
	70	451	92.19	3.1/3.6/2.8	0.1/0.1	0.6/0.1
	80	589	91.64	3.6/4.3/3.1	1.2/1.0	2.3/3.1
	90	746	90.63	4.2/5.0/3.0	3.5/3.3	5.2/5.4
	100	921	88.90	4.7/5.8/3.1	6.2/5.4	7.2/8.0
100	50	230	92.56	2.6/2.8/1.9	0.0/0.0	0.0/0.0
	60	331	92.14	3.3/3.6/2.0	0.1/0.1	1.0/0.0
	70	451	91.41	3.8/4.6/3.1	0.1/0.2	1.4/2.2
	80	589	90.30	4.5/5.5/2.9	2.0/2.1	4.6/4.7
80	40	147	92.57	2.6/2.7/1.7	0.1/0.0	0.0/0.0
	50	230	92.00	3.4/3.8/2.1	0.1/0.0	0.2/0.0
	60	331	91.01	4.3/5.0/2.6	0.1/0.1	1.7/0.2

Примечание. x_c — обратный параметр расхода чипов ФЭП, ЭП η , % — эффективность преобразования излучения, ЛК_{max} — максимальная локальная концентрация для трех p - n -переходов, уменьшение ЭП η , % при температуре концентратора $T_c = 15$ и 35°C , уменьшение ЭП η , % при сближении концентратора и ФЭП2 на 2 mm и их отдалении на 2 mm.

расстояния распределения ГНТ для трех переходов становятся ближе между собой по форме. Поэтому разница между объемами под распределениями и объемом под штрихованной областью у пары концентратор–ФЭП2 явно меньше (рис. 1, b), а значит у этой пары меньшие латеральные токи и резистивные потери.

4. Характеристики ряда концентраторов в паре с ФЭП2

Таким образом, установлено, что ФЭП2 обеспечивает лучшие характеристики соответствующей паре с концентратором. Выше рассматривалась пара с концентратором, имеющим относительно большое фокусное расстояние $F = 140.8$ mm и небольшой размер стороны концентратора $a = F/2$. Практический интерес представляют пары концентратор–ФЭП2 с меньшим фокусным расстоянием, обеспечивающим меньшую строительную высоту фотоэлектрического модуля, и с большим размером стороны концентратора a , что даст меньший расход чипов ФЭП.

С помощью описанного вычислительного алгоритма [3], следуя порядку определения оптимального показателя преломления n_c по максимуму зависимости $\eta(n_c)$ и расфокусировкам — температурной и вдоль оптической оси (рис. 3, 4), — были определены свойства 17 пар концентратор–ФЭП2. Все концентраторы рассчитывались для $T_c = 25^\circ\text{C}$, оптимального n_c , определенного для каждого концентратора, и ширины ступеней преломляющей поверхности $s = 0.25$ mm. Результаты расчета

представлены в табл. 2, в столбцах которой приведены обратный параметр расхода (ОПР) чипов x_c , равный отношению площади концентратора к площади чипа ФЭП2 ($x_c = 0.092a^2$), ЭП η , %, значения максимальной ЛК для трех p - n -переходов. В последних двух столбцах приводятся величины, на которые уменьшилась ЭП η при охлаждении/нагреве концентратора на 10°C и при сближении/отдалении концентратора и ФЭП2 на 2 mm.

Исследовались пары с $F = 140, 120, 100, 80$ mm и набором значений a для каждого фокусного расстояния, начинающимся с величины $F/2$ и продолжающимся с шагом 10 mm, пока значение ЭП η не начнет резко уменьшаться из-за выхода части излучения за пределы ФЭП или из-за того, что угол наклона крайней конической поверхности концентратора превысит угол полного внутреннего отражения.

Материал табл. 2 может прямо использоваться при выборе параметров конструкции фотоэлектрических модулей для ГЭУ, также с его помощью могут быть выявлены связи между параметрами и характеристиками концентраторов. Например, увеличение ОПР x_c сопровождается ухудшением характеристик: уменьшением ЭП η , увеличением максимума ЛК и потерь при расфокусировках. При равном параметре x_c характеристики тем хуже, чем меньше фокусное расстояние. Выбор параметров конструкции фотоэлектрических модулей следует проводить, принимая во внимание способность конкретных ФЭП функционировать в условиях высокой ЛК, условия эксплуатации ГЭУ и требования к ее конструкции.

Пары концентратор–ФЭП2 с сочетаниями размеров F и $a = F/2$, как и в рассмотренном выше случае, показывают максимально возможную при учете отражения света от концентратора ЭП η примерно 92.5%, небольшие пологие максимумы ЛК, около $2500\times$, незначительные отклонения при расфокусировках. Среди этих пар, наибольшим является значение параметра $x_c = 451$ — в паре с фокусом 140 mm.

Для фокусного расстояния 140 mm, но большей стороны концентратора $a = 110$ mm, ОПР x_c возрастает до 1115. В этом случае ЭП η уменьшится до 88.37%, максимум ЛК для второго перехода составит уже $5400\times$, а потери при расфокусировках будут 5–9%.

Наименьший интерес с точки зрения экономии материала ФЭП представляет группа пар с фокусом 80 mm. Но небольшое фокусное расстояние — это малая высота фотоэлектрического модуля, дающая преимущества при конструировании ГЭУ. Возможно, эта особенность в совокупности с высокой ЭП η и отсутствием потерь при расфокусировках будет ценнее, чем экономия материала ФЭП.

Также, удовлетворяя своему набору условий, и любая другая пара концентратор–ФЭП2 из табл. 2 может стать повторяемой ячейкой фотоэлектрического модуля.

Заключение

Оценка пары концентратор–ФЭП как составной единицы реальной ГЭУ проводится при анализе характеристик двух уровней значимости. Характеристики первого уровня — ЭП η , обратный параметр расхода чипов x_c , — напрямую влияют на энерго-экономические свойства ГЭУ, т.е. на генерируемую мощность и стоимость ГЭУ. Характеристики второго уровня значимости — степень тождественности распределений ГНТ в трех переходах, максимумы ЛК, изменение ЭП при расфокусировках, — не должны рассматриваться отдельно от характеристик, полученных экспериментально, от реальных условий функционирования ГЭУ и условий ее выполнения.

В настоящей работе было проведено исследование двух пар концентратор–ФЭП, где у ФЭП1 круглая форма фотоочувствительной области, а у ФЭП2 — квадратная, при этом у концентраторов в парах были выбраны пропорционально соответствующие параметры.

Эффективность пары η концентратор–ФЭП1 составила 90.92%, концентратор–ФЭП2 — 92.53%, в этом случае на фотоочувствительную область попало практически все, прошедшее через концентратор, СИ из МС. Также из-за разницы в формах фотоочувствительных областей ФЭП обратный параметр расхода чипов в паре с ФЭП2 получается больше: 456, против 400 [3] для пары с ФЭП1.

Очевидно, что к квадратному концентратору в большей степени подходит квадратная форма фотоочувствительной области ФЭП. Но так как на область светового пятна, относящуюся к углам концентратора,

приходятся хвосты распределений ЛК, увеличение ЭП в паре концентратор–ФЭП2 по сравнению с парой концентратор–ФЭП1 достаточно незначительное. При этом в общем увеличении ЭП на 1.6% примерно 1.1% составляет вклад смены формы фотоочувствительной области, а остальные 0.5% — влияние исходных свойств этих ФЭП, а именно коэффициентов k_{1-3} .

Основной результат настоящей работы состоит в установлении на примере двух исследованных пар влияния на качество концентрирования свойств ФЭП: плотностей фототоков J_{1-3} p – n -переходов. После деления параметров J на минимальный из них получается набор k_1, k_2, k_3 из двух повышающих коэффициентов и единицы. Коэффициенты для третьего перехода у обоих ФЭП повышающие, они обеспечивают избыточную концентрацию ГНТ в переходе, поэтому в представленных в работе зависимостях ЭП η пропорциональна η_1 или η_2 , как наименьшим.

Повышающие коэффициенты для ФЭП1 и ФЭП2 относятся соответственно ко второму ($k_2 = 1.01$) и первому ($k_1 = 1.05$) p – n -переходам. Как показано на рис. 3, a (стрелки) и на рис. 3, a в [3], зависимости $\eta_{1-3}(n_c)$ для пар с ФЭП1 и ФЭП2 имеют подобный вид, и имеющие наименьшие значения участки зависимостей $\eta_1(n_c)$ и $\eta_2(n_c)$ для обеих пар показывают возрастание, сменяющееся убыванием, без пологой части. Для пары концентратор–ФЭП1 ход зависимости ЭП $\eta(n_c)$, рассчитываемый с учетом повышающих коэффициентов, имеет вид также без пологой части вблизи максимума.

В случае пары концентратор–ФЭП2 участки кривых $k_1\eta_1(n_c)$ и $\eta_2(n_c)$ образуют зависимость ЭП $\eta(n_c)$ с широкой пологой частью вблизи максимума, которая будет находиться на участке кривой $\eta_2(n_c)$.

Аналогично в зависимостях ЭП от температуры концентратора и расфокусировки вдоль оптической оси $\eta(T)$ и $\eta(\Delta)$ в случае пары с ФЭП2 имеется широкая пологая часть вблизи максимума, а в случае пары с ФЭП1 эти зависимости представляют собой возрастание, сменяющееся убыванием, без пологой части. В итоге в паре концентратор–ФЭП2 обеспечивается практически нулевое уменьшение ЭП в широких интервалах температур 12.5–32.5°C и отклонений расстояния между ФЭП2 и концентратором от фокусного (–1.2– + 2.0 mm). В паре с ФЭП1 ЭП η остается больше 90% в узком интервале температур (19.8–26.5°C) и в узком интервале отклонений от фокуса (–0.15– + 0.45 mm).

Кроме того, пара концентратор–ФЭП2 показала меньшие резистивные потери из-за большей тождественности распределений ГНТ для трех p – n -переходов.

Можно заключить, что в наземной концентраторной фотовольтаике следует использовать ФЭП, в котором плотности фототока J_{1-3} для отдельных p – n -переходов относятся так, что повышающий коэффициент соответствует первому p – n -переходу, так как из-за дисперсии показателя преломления материала концентратора

именно на спектральный участок, соответствующий первому $p-n$ -переходу, приходится наибольшее размытие светового пятна.

Теоретическое исследование концентраторов солнечного излучения произведено при поддержке РФФИ (грант № 14-08-00623). Экспериментальные исследования оптических свойств концентраторов солнечного излучения выполнены при поддержке Российского научного фонда (грант № 14-29-00178).

Список литературы

- [1] *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 Intern. Conf. on Solar Concentrators for the Generation of Electricity, Palm Desert, California USA, 2008.
- [2] *Андреев В.М., Давидюк Н.Ю., Ионова Е.А., Покровский П.В., Румянцев В.Д., Садчиков Н.А.* // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 2. С. 118–125.
- [3] *Ионова Е.А., Уланов М.Ю., Давидюк Н.Ю., Садчиков Н.А.* // ЖТФ. 2016. Т. 86. Вып. 12. С. 87–94.