

06

Исследование фокусирующих свойств концентратора фотоэлектрического модуля в расширенном температурном диапазоне

© Е.А. Ионова, Н.Ю. Давидюк

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

Поступило в Редакцию 16 июня 2022 г.
В окончательной редакции 12 октября 2022 г.
Принято к публикации 14 октября 2022 г.

Исследованы характеристики концентратора солнечного излучения в виде линзы Френеля, выполненной из силикона марки Elastosil RT604 (Wacker). Определена зависимость фокусного расстояния концентратора от его температуры. Определено влияние температурных изменений фокусирующих характеристик концентратора на ток короткого замыкания фотоэлектрического субмодуля методом прямых измерений на имитаторе солнечного излучения. С помощью формализованной модели на основе данного концентратора и солнечных элементов с тремя и шестью $p-n$ -переходами были рассчитаны размеры световых пятен с длинами волн, относящимся к областям поглощения отдельных $p-n$ -переходов, при температурах концентратора 10–60°С. Определено, что в случае трех $p-n$ -переходов минимальный размер фокусного пятна составляет 4.7 мм при расстоянии в паре концентратор–солнечный элемент 106.25 мм, а в случае шести $p-n$ -переходов минимальный размер фокусного пятна составляет 4.8 мм при расстоянии в паре концентратор–солнечный элемент 106.5 мм.

Ключевые слова: силиконовая линза, Wacker RT604, концентраторный фотоэлектрический модуль, многопереходные солнечные элементы.

DOI: 10.21883/JTF.2023.01.54071.160-22

Введение

В настоящее время из-за прогнозируемого увеличения мирового электропотребления все более значимую роль приобретают возобновляемые источники энергии и, в первую очередь, энергия Солнца. Для выработки электроэнергии в солнечной энергетике наибольшее распространение получили солнечные батареи на основе поликристаллического кремния с КПД $\sim 18\%$. Рекордное значение эффективности преобразования солнечной энергии в электричество, составляющее 26.7%, принадлежит ячейке кристаллического кремния [1], но перспективы дальнейшего увеличения эффективности в кремниевых батареях весьма ограничены. Более высокие значения эффективности преобразования солнечного излучения имеют многопереходные солнечные элементы (СЭ). Наибольшее значение эффективности преобразования — 47.1% получено в настоящее время в шестипереходных СЭ [2]. КПД преобразования солнечного излучения трехпереходных СЭ, изготавливаемых в промышленных масштабах, составляют 42–43% при кратности концентрирования солнечного излучения больше 100^{\times} [1,3]. Преимуществом многопереходных солнечных элементов также является сохранение высоких значений эффективности при плотности преобразуемого излучения, превышающего максимальные значения плотности солнечного излучения на поверхности Земли в сотни раз. Учитывая технологические сложности при

изготовлении высокоэффективных многопереходных СЭ по сравнению с СЭ на основе кремния, их „наземное“ применение экономически оправдано только вместе с концентраторами солнечного излучения. Рекорд эффективности концентраторного модуля, полученный в лабораторных условиях, равен 36.7% [4], однако КПД полноразмерных концентраторных модулей в натуральных условиях составляет около 32% [5]. Исследование характеристик концентрирующих систем, влияния условий внешней среды на фокусирующие свойства концентраторов позволит увеличить эффективность преобразования солнечного излучения концентраторных фотоэлектрических модулей.

Широкое распространение получила концепция гелиоэнергетической установки, обеспечивающей двухосевое слежение за положением Солнца, на которой размещены фотоэлектрические модули с панелью концентраторов излучения и панелью с СЭ, расположенными в фокусах концентраторов, например [5,6]. Панель концентраторов представляет собой стеклянную пластину, к которой присоединена сборка расположенных вплотную квадратных концентраторов, выполненных из оптически прозрачного силикона. Прозрачность силикона в широком спектральном диапазоне не уступает прозрачности стекла, а качество фокусировки соответствует аналогичным стеклянным преломляющим концентраторам [7]. Однако, в отличие от стекла, силикон за счет своей ре-

зиноподобной структуры характеризуется значительным температурным изменением плотности, что приводит к заметным изменениям его показателей преломления во всем спектральном диапазоне. Дополнительно, из-за разницы коэффициентов линейного расширения стекла и силикона, при изменениях температуры происходят изменения формы преломляющих поверхностей профиля линзы Френеля. В настоящей работе исследуется влияние изменения температуры концентратора на его фокусирующие свойства вычислительным методом и методом прямых измерений выходных параметров пары концентратор–СЭ при обеспечении постоянной температуры СЭ.

1. Температурная зависимость дисперсии показателя преломления силикона Elastosil RT604

С помощью рефрактометра ИРФ-22 была определена зависимость показателя преломления n_D силиконовой резины марки Elastosil RT604 (Wacker) от температуры T на длине волны 589 nm. Исследование резиноподобного вещества потребовало внесения изменений в стандартную методику измерений ИРФ-22. На измерительную призму, предварительно обработанную адгезивным составом на основе силана, нанесли силиконовую резину в жидком состоянии, в центре расположили измерительный контакт термопары и прижали слой осветительной призмой, создав между призмами пленку силикона. После перехода силикона в резиноподобное состояние производился нагрев призм до 100°C струей горячего воздуха. Одновременные значения n_D и T были получены при естественном остывании. При температуре в диапазоне 0–100°C

$$n_D(T) = (1.4147 \cdot 10^{-4} - 3.7781 \cdot 10^{-4}) \cdot T. \quad (1)$$

Дисперсия показателя преломления силиконовой резины представлена в работе [8]. Было допущено приближение, состоящее в том, что при изменении температуры происходит только сдвиг дисперсионной кривой вдоль ординаты, но не изменение ее формы. Тогда зависимость показателя преломления силикона Elastosil RT604 от длины волны λ и температуры T приняла вид

$$n(\lambda, T) = a_0 + a_1 \cdot \exp(-\lambda/k_1) + a_2 \cdot \exp(-\lambda/k_2) - a_3 \cdot T, \quad (2)$$

где $a_0, a_1, a_2, a_3, k_1, k_2$ равны соответственно 1.4015, 0.716, 0.039, $3.7781 \cdot 10^{-4}$, 93.55, 489.8.

Профиль Френеля концентратора образован концентрическими фасетами с радиальной симметрией и прямой образующей преломляющих поверхностей. За счет малой ширины преломляющих поверхностей (0.2–0.5 mm) профиль Френеля реализует аналог асферической плоско-выпуклой линзы. Профиль Френеля концентратора стандартно рассчитывался при выполнении условия попадания луча с длиной волны λ_c ,

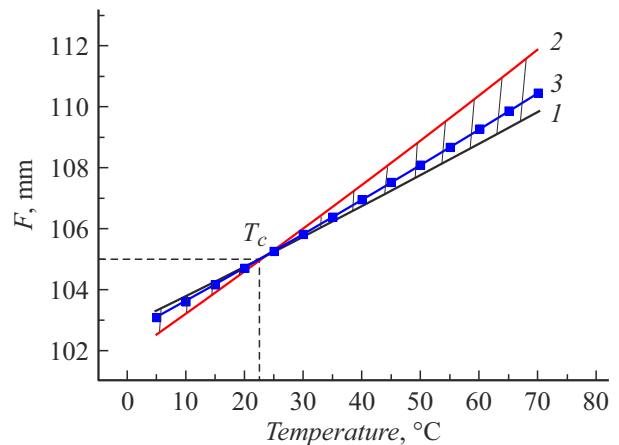


Рис. 1. Фокусное расстояние преломляющих поверхностей линзы Френеля для луча λ_c в зависимости от температуры: 1 — центральная фасета, 2 — крайняя фасета, штриховка — остальные фасеты линзы Френеля, 3 — фокусное расстояние линзы для луча λ_c .

прошедшего через среднюю точку преломляющей поверхности, в центр фотоприемной поверхности СЭ. Формула расчета профиля Френеля включает координаты преломляющей поверхности, номинальное фокусное расстояние, и расчетный показатель преломления n_c , соответствующий расчетной длине волны λ_c из спектральной характеристики (2) при температуре T_c . При температуре, отличной от T_c , согласно (2), расчетной длине волны λ_c будет соответствовать другой показатель преломления, и у данной линзы изменится фокусное расстояние (ФР).

В настоящей работе исследуется линза Френеля размером 60 × 60 mm с шагом профиля 0.25 mm и номинальным фокусным расстоянием 105 mm при температуре 23°C, выполненная из силиконовой резины марки Elastosil RT604 (Wacker) на стеклянной пластине толщиной 4 mm. С помощью формулы расчета профиля этой линзы для луча с длиной волны λ_c , преломляющегося в центре фасеты, проведено вычисление ФР при варьировании температуры концентратора с учетом соответствующего (2) изменения показателя преломления (рис. 1).

При увеличении температуры концентратора ФР фасет линейно растет, причем чем дальше фасета от центра, тем в большей степени увеличивается ее ФР. По мере отклонения температуры от расчетной ($T_c = 23^\circ\text{C}$) увеличивается разница между ФР центральной и крайней фасет (рис. 1, линии 1, 2). Температурная зависимость ФР концентратора получена усреднением данных для отдельных фасет с учетом их площадей (рис. 1, линия 3). Из-за малой доли площади, занимаемой крайними фасетами концентратора, усредненная линия 3 ближе к линии 1 зависимости, построенной для центральной фасеты. Таким образом, разница в зависимости ФР от температуры между центральной и крайней фасетами

линзы имеется, но ее вклад в размытие фокусного пятна незначителен, если концентратор имеет квадратную апертуру.

Линейное температурное изменение ФР концентратора относительно номинального приводит к соответствующему увеличению размера фокусного пятна. Поэтому для того, чтобы в фотоэлектрическом модуле можно было использовать СЭ наименьшего размера, расчетная температура T_c в формуле расчета профиля Френеля должна стоять в середине интервала температур, при которых планируется эксплуатировать фотоэлектрический модуль.

2. Методы определения температурных характеристик концентратора

При проектировании фотоэлектрического модуля с линзой Френеля из силиконовой резины при известных пределах температур эксплуатации важно знать, как зависимость фокусного расстояния концентратора от его температуры определит предельные размеры фокусного пятна, чтобы проектная площадь СЭ была достаточной для преобразования всего сфокусированного солнечного излучения. Размер фокусного пятна можно определить методом компьютерного эксперимента (КЭ) с формализованной моделью фотоэлектрического модуля и методом прямых измерений прототипа модуля на имитаторе солнечного излучения. Метод КЭ более предпочтителен и при проектировании фотоэлектрического модуля и при анализе работы прототипа в условиях, создать которые в измерительном эксперименте проблематично.

Размер и энергетическая структура пятна излучения, перенаправленного исследуемым концентратором, зависит от расстояния между концентратором и приемником, от ширины апертуры концентратора, от спектрального интервала и степени крутизны зависимости показателя преломления материала концентратора на этом спектральном интервале, от ширины преломляющей фасеты. Все эти факторы включены в формализованную модель фотоэлектрического модуля, используемую в КЭ. В КЭ рассчитывается фокусировка излучения концентраторами разной температуры; изменения их оптических свойств описаны дисперсионной зависимостью (2). Измерение на имитаторе солнечного излучения дает возможность определить выходные параметры прототипа, обусловленные, кроме перечисленных факторов, еще и особенностями реального концентратора.

В настоящей работе был использован модифицированный импульсный имитатор излучения на основе ксеноновой лампы-вспышки, формирующий световой поток с плотностью 920 W/m^2 (спектр AM1.5D) и угловой расходимостью $32'$, идентичной расходимости светового потока, идущего от солнечного диска [9]. Имитатор содержал систему позиционирования

оптических элементов в световом потоке, обеспечивающую их крепление и взаимное перемещение по трем координатам, и систему регистрации, позволяющую производить запись вольт-амперных характеристик (ВАХ) и расчет оптико-электрических параметров пары концентратор–СЭ за время одного светового импульса лампы-вспышки. В процессе исследования линза Френеля устанавливалась в специальной камере, закрепленной в имитаторе на держателе для линзы. В камере за счет разогрева внутреннего объема воздуха электроспиралями производился нагрев и поддержание заданной температуры линзы в цикле измерений. Заданная температура линзы Френеля могла поддерживаться в интервале от комнатной до 60°C . Контроль температуры производился с помощью двух датчиков, размещенных на периферии линзы. Температура СЭ при проведении измерений при повышенной температуре линзы поддерживалась системой термостабилизации на уровне $23 \pm 1^\circ\text{C}$.

В процессе измерительных исследований с помощью тепловизора Testo 875-2i проводилась оценка разброса температуры по поверхности линзы при разных уровнях разогрева. При лабораторной температуре разница температур отдельных участков линзы была в пределах $\pm 0.1^\circ\text{C}$, при средней температуре линзы 40°C эта разница достигала $\pm 1.7^\circ\text{C}$ и при средней температуре линзы 60°C разброс температуры по поверхности возрастал до $\pm 3.8^\circ\text{C}$.

3. Температурная зависимость фокусного расстояния концентратора

Серией измерений выходных параметров прототипа модуля и соответствующими КЭ с его формализованной моделью проведено исследование температурной зависимости фокусного расстояния концентратора. При исследовании фокусировки концентратором излучения широкого спектра, в котором имеется участок с крутым ходом зависимости показателя преломления материала концентратора от длины волны (для Elastosil RT604 это спектральный диапазон менее 550 nm), определение ФР концентратора неоднозначно. Определение ФР как расстояния между концентратором и СЭ, при котором все сфокусированное излучение занимает наименьшую площадь, не отражает действительного распределения в фокусном пятне излучения широкого спектра, так как имеется широкая, но содержащая малое число фотонов, периферийная область фокусного пятна, образованная излучением с длиной волны менее 550 nm , преломленным крайними фасетами концентратора.

В настоящей работе представлены четыре температурных зависимости ФР концентратора с указанными выше параметрами, в которых ФР определялось четырьмя разными способами.

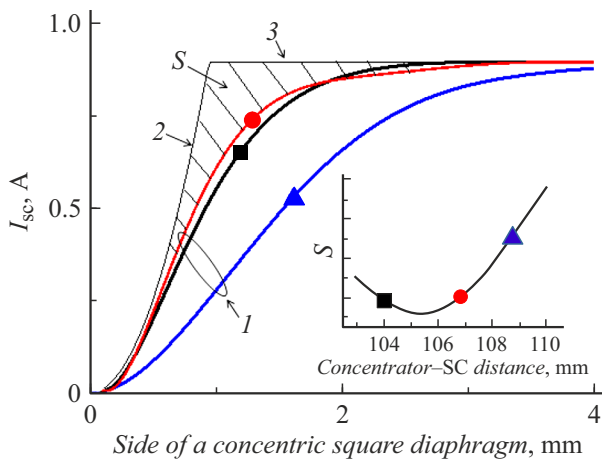


Рис. 2. Зависимости тока короткого замыкания I_{sc} , генерируемого в областях СЭ, ограниченных концентрическими квадратными диафрагмами, в зависимости от размера стороны квадратной диафрагмы b ; серия графиков построена для разных расстояний D между концентратором и СЭ (группа линий I). Квадратичная зависимость распределения прироста носителей тока (линия 2), уровень максимума тока (линия 3), S — площадь заштрихованной области — параметр S . Во вставке — зависимость параметра S от расстояния D между концентратором и СЭ.

В первом способе исследовалась фокусировка концентратором излучения лампы-вспышки имитатора солнечного излучения на фотоприемную поверхность СЭ на основе структуры GaAs с одним p - n -переходом со спектральной чувствительностью в интервале 400–900 nm размером 4×4 mm. СЭ на основе GaAs характеризовался тем, что при измерениях на имитаторе с варьированием расстояния между концентратором и СЭ наблюдался явный минимум фактора заполнения ВАХ, означающий наибольшие потери на внутреннем сопротивлении, вызванные наибольшей локальной плотностью сгенерированных носителей тока. Поэтому ФР концентратора определяли соответствующим такому расстоянию между концентратором и СЭ, при котором фактор заполнения минимален.

Во втором способе при проведении КЭ ФР концентратора определялось как расстояние между концентратором и СЭ, при котором фокусное пятно, содержащее в себе 95% сгенерированных носителей тока, имеет наименьший размер.

В третьем способе определения ФР результат КЭ представлялся в виде зависимостей $I_{sc}(b)$, построенных для разных расстояний D между концентратором и СЭ (рис. 2, группа линий I), где $I_{sc}[A]$ — ток короткого замыкания генерируемой электроэнергии при преобразовании излучения, прошедшего через квадратные отверстия с размером стороны $b[mm]$ из набора условных концентрических квадратных диафрагм, центрированных на СЭ. Зависимость $I_{sc}(b)$ характеризует прирост числа сгенерированных носителей тока от центра к краю фо-

кусного пятна. Если бы сгенерированные в СЭ носители тока были равномерно распределены по фотоприемной поверхности СЭ, то прирост носителей по мере увеличения размера b условных квадратных центрированных диафрагм описывался бы квадратичной зависимостью. Но в фокусном пятне концентрация носителей тока от центра к краю пятна всегда уменьшается. Для определения ФР был вычислен параметр $S[A \cdot mm]$ как площадь фигуры, ограниченной кривой квадратичного прироста носителей b^2 (рис. 2, линия 2), прямой на уровне максимума тока (рис. 2, линия 3) и одной из кривых $I_{sc}(b)$ (рис. 2, одна из линий группы I). Вычисления S проводились при варьировании расстояния D между концентратором и СЭ. Зависимость $S(D)$ (вставка в рис. 2) имеет выраженный минимум, соответствующий наибольшему приближению зависимости $I_{sc}(b)$ к квадратичному распределению. ФР концентратора определяли равным расстоянию D , при котором параметр S имеет минимальное значение.

В четвертом способе исследовалась фокусировка концентратором излучения имитатора на фотоприемную поверхность СЭ на основе структуры InGaP/GaInAs/Ge с тремя p - n -переходами размером 3×3 mm, который используется в фотоэлектрических модулях. ФР концентратора определялось равным расстоянию между концентратором и СЭ, при котором наблюдался максимум тока короткого замыкания I_{sc} в ВАХ пары. В случае многопереходного СЭ максимум I_{sc} соответствовал наибольшей собранности сгенерированных носителей, вносящих вклад в фототок СЭ, вокруг оптической оси, так как при размере СЭ 3×3 mm отклонение расстояния между концентратором и СЭ относительно ФР сопряжено с выходом излучения за пределы СЭ.

Температурные зависимости ФР, определяемого первым и четвертым способом, получены с помощью имитатора солнечного излучения при нагреве концентратора (рис. 3, линии $1, 4$). Температурные зависимости ФР, определяемого вторым и третьим способами, получены методом КЭ для формализованной модели пары концентратора и СЭ на основе GaAs, используемой при определении ФР первым способом на имитаторе солнечного излучения. Эти температурные зависимости ФР являются практически прямыми линиями и совпадают (рис. 3, линии $2, 3$), что показывает тождественность соответствующих двух методов определения фокусного расстояния концентратора.

Линейный ход температурной зависимости ФР концентратора (рис. 3, линии $2, 3$), хорошо согласуется с температурной зависимостью ФР для луча с длиной волны λ_c , преломляющегося на середине фасеты (рис. 1). Это означает, что для данного концентратора температурное изменение оптических свойств силиконовой резины является приоритетным фактором, определяющим размытость фокусного пятна в паре концентратор–СЭ.

Измеренная температурная зависимость ФР концентратора в паре с СЭ на основе GaAs (рис. 3, линия 1) совпадает с вычисленными в интервале температур

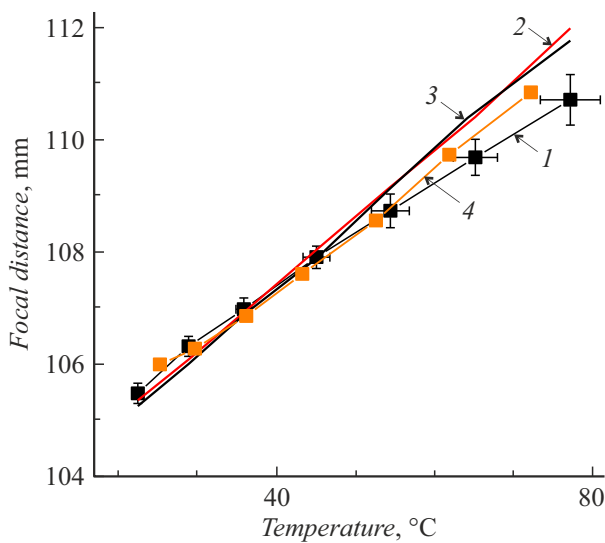


Рис. 3. Зависимости фокусного расстояния концентратора от температуры, измеренные на имитаторе солнечного излучения с солнечным элементом GaAs, определенные при условии минимума фил-фактора (линия 1), вычисленные в компьютерном эксперименте по минимальному значению параметра S (линия 2) и по минимальному размеру фокусного пятна, содержащего 95% сгенерированных носителей (линия 3) и измеренные на имитаторе с солнечным элементом InGaP/GaInAs/Ge, определенные при условии максимума значения тока короткого замыкания (линия 4).

22–45°C, а при больших значениях температур показывает сниженную скорость роста ФР относительно расчетной. Эти отличия могут быть связаны с возрастающей погрешностью измерений при повышении температуры концентратора и, возможно, с вкладом температурного изменения формы преломляющих поверхностей фасет. Совпадение измеренной и вычисленных зависимостей в интервале температур 22–45°C показывает объективность моделирования процесса фокусировки на основе (2).

Температурная зависимость ФР концентратора, измеренная с трехпереходным СЭ размером 3×3 mm, (рис. 3, линия 4) практически совпадает с зависимостями, рассмотренными выше. Данную зависимость можно использовать для первичной корректировки расстояния между концентратором и СЭ в фотоэлектрических модулях, если солнечная энергоустановка будет работать при средних температурах, отличных от той, для которой был рассчитан профиль линз Френеля.

Таким образом, по результатам расчетов с формализованной моделью концентратор–СЭ и по измерениям на имитаторе выходных параметров прототипа модуля можно сделать вывод о том, что нагрев или охлаждение концентратора в виде линзы Френеля из силикона Elastosil RT604 (Wacker) на стекле на 10°C приводит к увеличению/уменьшению его фокусного расстояния на 1.1–1.2 mm.

4. Исследование параметров прототипа фотоэлектрического модуля в расширенном температурном диапазоне

Пара концентратор–СЭ является повторяемой единицей фотоэлектрического модуля, и температурные свойства ее выходных параметров в полной мере соответствуют температурным свойствам фотоэлектрического модуля. На имитаторе солнечного излучения были проведены две серии измерений выходных характеристик пары исследуемого концентратора и СЭ на основе InGaP/InGaAs/Ge размером 3×3 mm при лабораторной температуре (26°C) и с нагревом концентратора по описанной выше методике до 49°C.

Для исследования выбран параметр ВАХ — ток короткого замыкания I_{sc} . В паре с данным трехпереходным СЭ при преобразовании излучения имитатора широкого спектрального состава I_{sc} определяется числом сгенерированных носителей тока в том p – n -переходе, в котором их генерируется меньше. Снижение I_{sc} при изменении расстояния между концентратором и СЭ данного размера или при изменении температуры концентратора связано с выходом части излучения сфокусированного пятна, относящегося к ограничивающему p – n -переходу, за пределы фотоактивной области СЭ.

На графике (рис. 4, а) показаны значения I_{sc} исследуемой пары при температурах концентратора 26 и 49°C. Выявлено, что I_{sc} при температурах концентратора 26 и 49°C достигает максимума при расстояниях между концентратором и СЭ, отличающихся на ~ 2 mm. В случае установки номинального расстояния в паре концентратор–СЭ (105 mm) нагрев концентратора от 26 до 49°C приводит к снижению I_{sc} на 10%.

Дополнительно была проведена серия экспериментов по сравнению размеров световых пятен в фокусе концентратора при температурах концентратора 26 и 49°C и нескольких разных расстояниях в паре концентратор–СЭ. СЭ на основе InGaP/InGaAs/Ge размером 3×3 mm перемещали с шагом 0.1 mm вдоль светового пятна в фокусе концентратора и определяли значения I_{sc} ВАХ при преобразовании излучения лампы-вспышки имитатора. Если световое пятно меньше СЭ, то по величине перемещения СЭ вдоль светового пятна, в позициях которого значение I_{sc} будет примерно постоянным, можно определить размер светового пятна.

Из-за упомянутой выше широкой, но содержащей малое число фотонов, периферийной области фокусного пятна, при определении границ светового пятна необходимо было условиться об их оценке.

Для обеспечения сравнения световых пятен, сфокусированных концентратором при разных измерительных параметрах, границы светового пятна оценивались по значению $I_{sc} = 0.425$ А, которое выбрано по данным графика (рис. 4, а) как значение I_{sc} , достигаемое при всех вариантах эксперимента. Случай, когда значения I_{sc}

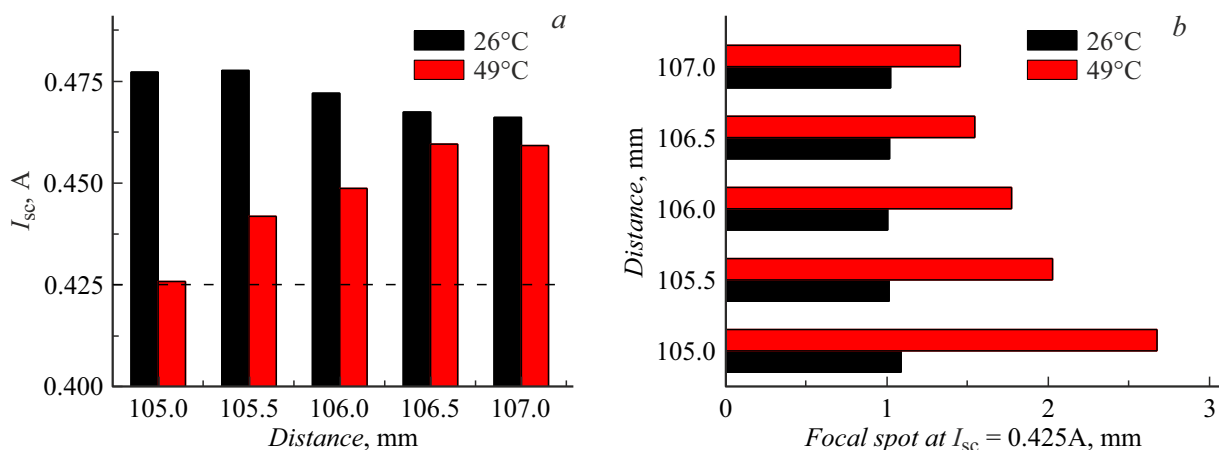


Рис. 4. *a* — значения тока короткого замыкания при преобразовании излучения пары концентратор–СЭ на основе InGaP/InGaAs/Ge; *b* — ширина фокусного пятна, обеспечивающего значение I_{sc} на уровне 0.425 А, при температурах 26 и 49°C.

меньше 0.425 А в центральном положении, показывал бы, что световое пятно больше размера фотоактивной области СЭ, и его размер не определяем.

В результате выбора граничного значения $I_{sc} = 0.425$ А выявить зависимость размера светового пятна от расстояния между концентратором и СЭ при температуре концентратора 26°C не удалось (рис. 4, *b*). Но наблюдается разница между размерами световых пятен с одинаковым энергетическим вкладом при температуре концентратора 26 и 49°C. Кроме того, наглядно показано (рис. 4, *b*) уменьшение светового пятна, сфокусированного нагретым концентратором, по мере приближения расстояния между концентратором и СЭ к действительному фокусному расстоянию для температуры 49°C. Определено, что при номинальном расстоянии между концентратором и СЭ (105 mm) световое пятно, обеспечивающее I_{sc} , равный 0.425 А, при температурах концентратора 26 и 49°C составляет 1.1 и 2.7 mm.

5. Определение размеров световых пятен методом компьютерного эксперимента

В проектировании фотоэлектрического модуля при выборе размеров концентратора и СЭ важно знать величину светового пятна, сфокусированного концентратором в диапазоне температур эксплуатации энергоустановки для учета запаса фотоактивной площади СЭ при погрешностях монтажа СЭ и разориентации следящей системы.

При исследовании прототипа измеряемый размер светового пятна в большой степени отражает свойства падающего излучения. Анализ спектральной характеристики СЭ на основе InGaP/InGaAs/Ge [3] показывает, что при преобразовании сфокусированного излучения имитатора (AM1.5) ограничение по току происходит в

среднем *p-n*-переходе, но генерация тока в верхнем *p-n*-переходе лишь немного выше. По мере изменения спектра солнечного излучения соответствующим образом меняется концентрация сгенерированных носителей тока во всех *p-n*-переходах СЭ. При преобразовании спектров с атмосферной массой 2.1 и более, ограничение по току происходит в верхнем *p-n*-переходе данного СЭ из-за преимущественного атмосферного поглощения солнечного излучения в спектральном интервале, относящемся к преобразованию в верхнем *p-n*-переходе. В шестипереходных СЭ [2] по мере изменения спектра солнечного излучения ограничивающим током может быть ток одного из трех или более *p-n*-переходов. Поскольку границы распределения вдоль светопринимающей поверхности СЭ сгенерированных носителей тока в каждом *p-n*-переходе разные, при переходе ограничивающей роли к другому *p-n*-переходу будут меняться эффективные размеры светового пятна.

Одним из условий проектного задания при разработке наземных солнечных энергосистем должно быть их эффективное функционирование с солнечным излучением разного спектрального состава при разной высоте солнечного диска над горизонтом. Наиболее подходящим методом определения предельного размера светового пятна является метод КЭ, в котором размеры световых пятен будут определяться для излучения в областях поглощения всех *p-n*-переходов СЭ.

Методом КЭ для пары концентратора и СЭ на основе InGaP/InGaAs/Ge размером 3×3 mm произведен расчет величины световых пятен в зависимости от расстояния D между концентратором и СЭ. На графике (рис. 5) приведены зависимости размеров световых пятен, относящихся к трем активным *p-n*-переходам, от расстояния между концентратором и СЭ, вычисленные для разной температуры концентратора.

Ход приведенных зависимостей в совокупности показывает, что имеется одно оптимальное значение расстояния между концентратором и СЭ, при котором

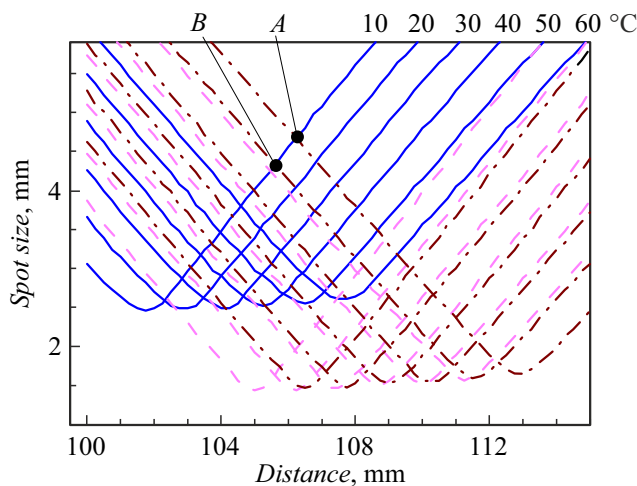


Рис. 5. Зависимости размеров световых пятен излучения, преобразуемого первым, вторым и третьим $p-n$ -переходами, от расстояния между концентратором и солнечным элементом. Линии в группах последовательно слева направо относятся к температурам 10, 20, 30, 40, 50, 60 °С. Сплошные линии — первый $p-n$ -переход, штриховые линии — второй $p-n$ -переход, штрихпунктирные линии — третий $p-n$ -переход. Смысл точек А и В пояснен в тексте.

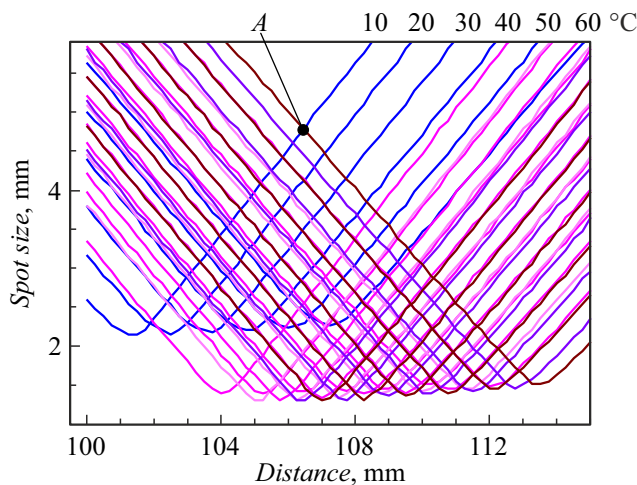


Рис. 6. Зависимости размеров световых пятен излучения, преобразуемого первым—шестым $p-n$ -переходами, от расстояния между концентратором и солнечным элементом. Линии в группах последовательно слева направо относятся к температурам 10, 20, 30, 40, 50, 60 °С. Смысл точки А пояснен в тексте.

в заданном температурном диапазоне размер светового пятна будет наименьшим. Оно составит 4.7 mm при расстоянии между концентратором и СЭ 106.25 (точка А, рис. 5). Отличие оптимального расстояния $D = 106.25$ mm от расчетного фокусного расстояния концентратора (105 mm при лабораторной температуре 23 °С) связано с расположением значения температуры 23 °С ближе к левому краю исследуемого температурного интервала 10–60 °С.

Дополнительно был произведен аналогичный КЭ по исследованию работы концентратора с известными параметрами и перспективного СЭ с шестью $p-n$ -переходами [2], который в настоящее время находится в стадии разработки (рис. 6). Как и в случае трехпереходного СЭ, в диапазоне температур 10–60 °С имеется одно расстояние между концентратором и СЭ, равное 106.5 mm, при котором будет наименьший размер светового пятна, равный 4.8 mm (точка А, рис. 6).

При определении наиболее подходящего для исследуемого концентратора размера СЭ, анализируя данные (рис. 5, 6), можно учесть, что в трехпереходном СЭ третий $p-n$ -переход выдает избыточную генерацию носителей при всех спектрах солнечного излучения. Поэтому если минимальный размер пятна определить по пересечению линии, относящейся к первому $p-n$ -переходу при 10 °С, и линии, относящейся к третьему $p-n$ -переходу при 50 °С, т.е. равным 4.33 mm при $D = 105.6$ mm (точка В, рис. 5), то это не приведет к энергетическим потерям в диапазоне температур 10–60 °С. В шестипереходном СЭ избыточной генерации нет ни в одном $p-n$ -переходе, поэтому следует ориентироваться на вычисленную точку минимума (А, рис. 6).

Заключение

В работе проведено исследование фокусного расстояния концентратора солнечного излучения в фотоэлектрическом модуле с многопереходными солнечными элементами при разных температурах концентратора.

Установлено, что в интервале температур 20–70 °С нагрев концентратора на каждые 10 °С приводит к увеличению фокусного расстояния на 1.2 mm, т.е. на 1.1% от номинального фокусного расстояния концентратора.

По результатам лабораторного эксперимента размер световых пятен, обеспечивающих одинаковый энергетический вклад, увеличивался в 1.5–2.5 раза при изменении температуры концентратора от 26 до 49 °С.

Для определения размера светового пятна в случае широкого интервала рабочих температур концентратора подходит метод компьютерного эксперимента с формализованной моделью фотоэлектрического модуля.

Результаты компьютерного эксперимента продемонстрировали, что имеется одно оптимальное расстояние между концентратором и СЭ, при котором в данном температурном диапазоне размер светового пятна будет наименьшим. Для фотоэлектрического модуля с трехпереходным солнечным элементом вычислено, что при изменении температур концентратора 10–60 °С наименьшее фокусное пятно составляет 4.7 mm при расстоянии между концентратором и солнечным элементом 106.25 mm. Аналогичные вычисления, проведенные для модуля с шестипереходным солнечным элементом, показали, что наименьшее фокусное пятно имеет ширину 4.8 mm при расстоянии внутри пары 106.5 mm.

Из полученных результатов можно сделать вывод о том, что для увеличения удельного энергопотребления в фотоэлектрическом модуле, работающим длительное время в интервале изменения температур 10–60°C, целесообразно использовать солнечные элементы размером 5 × 5 mm.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда в соответствии с соглашением № 22-29-20190 от 23.03.2022, а также за счет гранта Санкт-Петербургского научного фонда в соответствии с соглашением № 30/2022 от 14.04.2022.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M. Green, E. Dunlop, J. Hohl-Ebinger, M. Yoshita, N. Kopidakis, X. Hao. *Prog. Photovolt.: Res. Appl.*, **29**, 3 (2021).
- [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] Azur Space. PV Solar Cells. [Online] 10 01, 2020. <http://www.azurspace.com/index.php/en/products/products-cpv/cpv-solar-cells>
- [4] M. Steiner, A. Bösch, A. Dilger, F. Dimroth, T. Dörsam, M. Müller, T. Hornung, G. Siefert, M. Wiesenfarth, A. Bett. *Prog. Photovolt.: Res. Appl.*, **23**, 1323 (2015).
- [5] E. Gerster, T. Gerstmaier, A. Gombert, R. Krause, S. Riesena, S. Wanka, T. Zech. *AIP Conf. Proceedings*, **1679**, 040006 (2015). DOI: 10.1063/1.4931517
- [6] 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
- [7] V. Romyantsev. *Optics Express*, **18** (S1), A17 (2010). DOI: 10.1364/OE.18.000A17
- [8] 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. *Photovolt. Specialists Conf. 2008, 33rd IEEE. 2008. P. 403 (on CD)*
- [9] Н.С. Потапович, Н.Ю. Давидюк, В.Р. Ларионов, В.П. Хвостиков. *ЖТФ*, **12** (90), 2116 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2020.12.50129.88-20