

07.2

Теплоотводящие электроизолирующие платы для фотоэлектрических преобразователей концентрированного солнечного излучения

© Н.Ю. Давидюк, А.В. Андреева, Д.А. Малевский, П.В. Покровский, Н.А. Садчиков, А.В. Чекалин[†], В.М. Андреев

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

[†] E-mail: chekalin@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 10 февраля 2020 г.

В окончательной редакции 10 февраля 2020 г.

Принято к публикации 11 февраля 2020 г.

Представлены результаты исследований характеристик теплоотводящих электроизолирующих плат разной конструкции, изготовленных на основе теплопроводящих керамик AlN и Al₂O₃, а также алюмооксидных плат на базе алюминиевых пластин. Теплофизические параметры теплоотводящих плат оценивались путем измерения температуры *p-n*-переходов фотоэлектрических преобразователей, установленных на платы, при подаче на них тепловой нагрузки. Установлено, что минимальные значения температуры перегрева *p-n*-переходов 45°C при подводимой тепловой мощности, равной 13 W, наблюдались при их монтаже на керамику AlN. Величина перегрева *p-n*-переходов при монтаже на керамику Al₂O₃ составила 49°C, а при монтаже на алюмооксидное основание — порядка 70°C.

Ключевые слова: солнечные элементы, *p-n*-переход, измерение температуры, материал теплоотводов, концентраторные фотоэлектрические преобразователи, тепловые характеристики.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.09.49369.18239

Во многих областях силовой электроники при работе электронных компонентов с высоким уровнем тепловыделения ставится задача эффективного отвода тепла с помощью теплоотводящих электроизолирующих плат [1]. Известно, что эффективность преобразования солнечного излучения в электроэнергию, в том числе в концентраторных фотоэлектрических модулях (КФЭМ), уменьшается с увеличением температуры *p-n*-переходов фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) [2]. В КФЭМ для эффективного отвода тепла от ФЭП и обеспечения электроизоляции при установке нескольких ФЭП на электрогенерирующих панелях модулей могут также эффективно использоваться электроизолирующие теплоотводящие платы.

Выявление тепловых характеристик теплоотводящих плат может осуществляться путем измерения температуры *p-n*-переходов фотоэлектрических преобразователей при подаче на ФЭП определенной тепловой нагрузки. В настоящей работе проведены исследования эффективности отвода тепла от ФЭП при использовании теплоотводящих электроизолирующих плат разной конструкции.

Разработанный для экспериментов КФЭМ включает линзу Френеля размером 12 × 12 см и электрогенерирующую панель, включающую основание из алюминия размером 14 × 14 см с платой, закрепляемой в центре основания с помощью теплопроводящей пасты „Overcool TC-200“ с теплопроводностью 3.8 W/(m · K). На верхнюю поверхность платы в ее центре напаивался ФЭП размером 5.5 × 6 мм.

Были исследованы четыре типа теплоотводящих электроизолирующих плат: два типа плат на основе керамик

AlN и Al₂O₃ и два типа алюмооксидных плат на основе алюминиевых пластин разного размера с диэлектрическими слоями оксида алюминия. На рис. 1 представлены конструкции плат с указанием материалов и толщин слоев плат.

Исследование тепловых характеристик образцов ФЭП на платах в натуральных условиях при облучении концентрированным солнечным излучением затруднено, поскольку условия измерения не являются стабильными вследствие изменений как интенсивности освещения, так и условий теплоотвода, зависящих от направления и скорости ветра [3]. Поэтому исследования теплофизических

| <i>a</i> | <i>b</i> | <i>c</i> |
|-------------------------|---|-----------------|
| Au, 0.1 μm | Au, 0.1 μm | Au, 0.1 μm |
| Cu, 125 μm | Cu, 300 μm | Cu, 70 μm |
| Ceramics AlN, 380 μm | Ceramics Al ₂ O ₃ , 380 μm | Al-oxide, 70 μm |
| Cu, 125 μm | Cu, 300 μm | Al, 1500 μm |
| Au, 0.1 μm | Au, 0.1 μm | Al-oxide, 70 μm |

Рис. 1. Структуры теплоотводящих электроизолирующих плат на основе керамики AlN (*a*) и Al₂O₃ (*b*) и пластин с диэлектрическими слоями оксида алюминия (*c*).

характеристик теплоотводящих плат осуществлялись в помещении в затемненных условиях.

Была использована методика определения величины перегрева $p-n$ -перехода ФЭП относительно комнатной температуры при пропускании прямого тока [4]. При этом индикатором температуры ФЭП служили значения прямого падения напряжения на $p-n$ -переходе [5].

Согласно разработанной методике, исследуемый КФЭМ с установленной теплоотводящей электроизолирующей платой и напаянным фотопреобразователем был помещен в термостат, температура в котором менялась от комнатной до 100°C . При разных фиксированных значениях температуры термостата были измерены вольт-амперные характеристики ФЭП при подаче тока в режиме одиночных импульсов длительностью $200\ \mu\text{s}$, после чего были рассчитаны значения температурного коэффициента β изменения напряжения на $p-n$ -переходе при заданной плотности тока для исследуемых ФЭП.

Затем при комнатной температуре через контакты исследуемого ФЭП пропускаться постоянный ток в прямом направлении. При этом выделяемая в $p-n$ -переходе электрическая мощность приводила к разогреву ФЭП. По истечении времени, необходимого для перехода всей системы в стационарное температурное состояние, производилось размыкание контактов с помощью электронного коммутатора и за время уменьшения тока до нуля осуществлялась регистрация вольт-амперной характеристики ФЭП в разогретом состоянии.

Расчет перегрева (ΔT) $p-n$ -переходов относительно температуры окружающей среды для разных значений плотности тока осуществлялся по формуле

$$\Delta T_{p-n} = \frac{V_{hot} - V_{amb}}{\beta \cdot 10^{-3}},$$

где β [$-\text{mV}/\text{K}$] — температурный коэффициент изменения напряжения на $p-n$ -переходе при заданной плотности тока; V_{hot} [V] и V_{amb} [V] — значения напряжений на $p-n$ -переходе при установившейся температуре в нагретом состоянии и при температуре окружающей среды соответственно.

На рис. 2 приведены температурные характеристики четырех образцов ФЭП, напаянных на теплоотводящие электроизолирующие платы четырех разных конструкций: две платы размером $2.2 \times 2.2\ \text{cm}$ на основе теплопроводящих керамик (зависимости 1 и 2) и две алюмооксидные платы разного размера $3 \times 3\ \text{cm}$ (зависимость 3) и $5 \times 5\ \text{cm}$ (зависимость 4).

Как видно из приведенных на рис. 2 зависимостей, наименьшие температуры перегрева $p-n$ -переходов ФЭП наблюдались при их напайке на теплоотводящие платы на основе керамик AlN и Al_2O_3 . При подводимой электрической мощности $13\ \text{W}$ перегрев ФЭП на этих платах составлял $\Delta T = 43\text{--}49^\circ\text{C}$. Относительно низкая эффективность отвода тепла в алюмооксидных платах ($\Delta T = 68\text{--}71^\circ\text{C}$) может быть объяснена высокой пористостью и низкой теплопроводностью оксидных слоев на верхней и нижней поверхностях алюминиевой пластины.

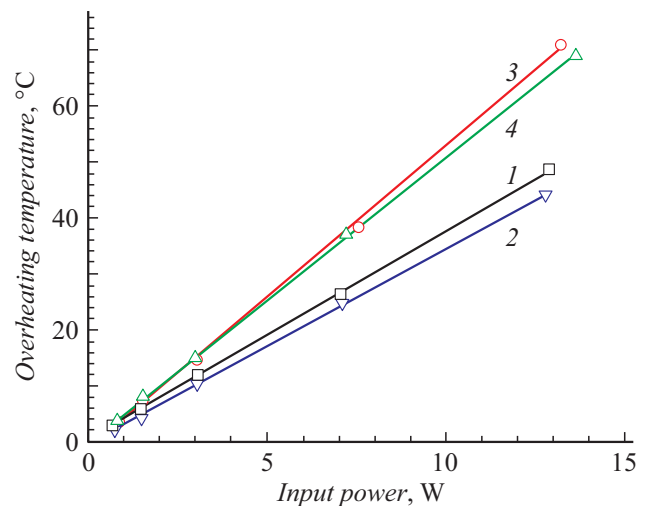


Рис. 2. Зависимость температуры перегрева фотоэлементов от мощности нагрева ФЭП, напаянных на теплоотводящие электроизолирующие платы. 1, 2 — на основе теплопроводящих керамик Al_2O_3 и AlN соответственно, 3, 4 — алюмооксидные платы размером 3×3 и $5 \times 5\ \text{cm}$ соответственно.

При мощности прямого солнечного излучения $850\ \text{W}/\text{m}^2$ линза Френеля с КПД 85% размером $12 \times 12\ \text{cm}$ фокусирует на поверхность ФЭП излучение мощностью $10.4\ \text{W}$. Концентраторный модуль на основе каскадного ФЭП GaInP/GaAs/Ge имеет КПД $\sim 30\%$. При такой эффективности существенная часть (30%) тепловой мощности (P_t) излучения, падающего на поверхность ФЭП, отводится в полезную нагрузку, а остальная часть ($P_t \approx 7\ \text{W}$) превращается в тепло, которое необходимо максимально эффективно отвести от ФЭП. Как видно из рис. 2, перегрев ΔT фотоэлектрических преобразователей при такой тепловой мощности составляет $\Delta T \approx 25^\circ\text{C}$ при использовании теплоотводящих плат на основе керамик Al_2O_3 и AlN и $\Delta T \approx 36^\circ\text{C}$ при использовании алюмооксидных плат.

На рис. 3 представлены расчетные распределения температуры вдоль поверхности электрогенерирующих панелей, включающих ФЭП и плату, размещенную в центре алюминиевого основания: с алюмооксидной теплоотводящей платой (рис. 1, *c* и рис. 3, распределение 1) и с платой на основе керамики Al_2O_3 (рис. 1, *b* и рис. 3, распределение 2). В расчетах были использованы следующие исходные параметры: температура окружающей среды 25°C ; выделяемая в ФЭП тепловая мощность $P_t = 7\ \text{W}$; теплопроводность меди $390\ \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; теплопроводность алюминия $200\ \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; теплопроводность керамики Al_2O_3 $30\ \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$. Температуры крайних точек алюминиевого основания, введенные в расчет, были измерены с помощью терморезисторов.

Типичное значение относительного коэффициента температурного снижения КПД концентраторных фотоэлектрических модулей (с КПД $\sim 30\%$ при 25°C) на основе каскадных ФЭП составляет $K_t \approx -0.074\%/K$ [6]

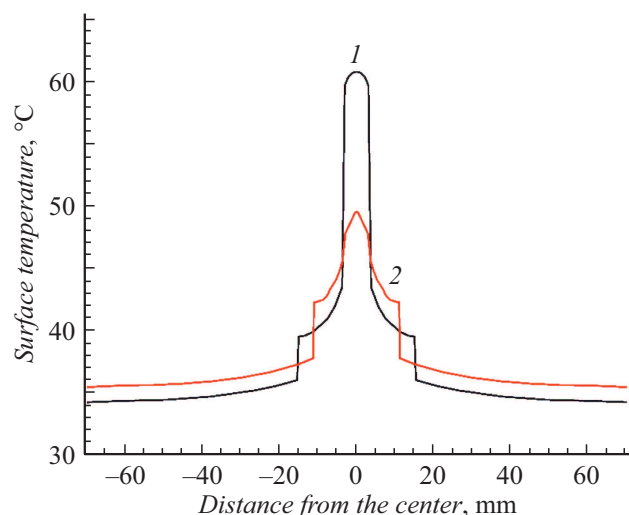


Рис. 3. Расчетные распределения температуры вдоль поверхности двух электрогенерирующих сборок ФЭП + плата + Al-основание размером 12×12 см с теплопроводящими платами двух типов: алюмооксидная плата размером 3×3 см (1) и плата размером 2.2×2.2 см на основе керамики Al_2O_3 (2).

- [5] Kinsey G.S., Hebert P., Barbour K.E., Krut D.D., Cotal H.L., Sherif R.A. // Prog. Photovolt.: Res. Appl. 2008. V. 16. N 6. P. 503–508.
 [6] Siefer G., Bett A.W. // Prog. Photovolt.: Res. Appl. 2014. V. 22. N 5. P. 515–524.

при кратности концентрирования солнечного излучения, равной 500 „солнц“. При величине перегрева $\Delta T = 30\text{--}45^\circ\text{C}$ фотоэлектрического преобразователя в КФЭМ с разработанными теплоотводящими платами снижение КПД фотоэлектрического модуля за счет разогрева составляет величину порядка 1%.

Таким образом, использование в качестве электроизолирующих плат как керамик AlN и Al_2O_3 , так и алюмооксида обеспечивает эффективный отвод тепла, выделяющегося в каскадном ФЭП, расположенном в фокусе линзы Френеля размером 12×12 см.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-79-30035).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Бечтлофф У., Фихлер Р., Шауэр Й., Шмидер К. // Технологии в электронной промышленности. 2005. № 3. С. 22–24.
 [2] Rumyantsev V.D. Terrestrial concentrator PV systems // Concentrator photovoltaics. Springer Ser. in Optical Sciences. 2016. V. 130. P. 151–174.
 [3] Núñez R., Antón I., Askins S., Sala G., Araki K. // AIP Conf. Proc. 2014. V. 1616. P. 144–148.
 [4] Rumyantsev V.D., Davidyuk N.Yu., Chekalin A.V., Malevskiy D.A., Pan'chak A.N., Sadchikov N.A., Andreev V.M., Luque A. // IEEE J. Photovolt. 2015. V. 5. N 6. P. 1715–1721.