

УДК 620.1.08

PACS: 07.57.-c, 42.79.Pw,
44.40.+a, 84.60.Jt

Тепловизионный метод контроля локальных дефектов фотоэлектрических преобразователей солнечного излучения

В. Н. Соляков

Представлена методика определения локальных дефектов в фотоэлектрических преобразователях (ФЭП) солнечного излучения путем бесконтактного измерения распределения температуры по площади ФЭП при подаче на него прямого и обратного напряжения смещения. Неоднородность распределения температуры по поверхности ФЭП возникает вследствие неоднородности плотности тока из-за наличия локальных дефектов. Температура определяется по интенсивности теплового излучения в инфракрасном (ИК) диапазоне спектра посредством специальной тепловизионной системы. Для исключения влияния бликов, неоднородности коэффициента излучения поверхности ФЭП, неоднородности чувствительности фотоприемной матрицы определяется разность сигналов фотоприемного устройства при подаче (прямого или обратного) напряжения на ФЭП и в отсутствие приложенного к ФЭП напряжения. Приведена программно-аппаратная реализация методики с использованием матричного фотоприемного устройства инфракрасного диапазона спектра 3–5 мкм формата 320 на 256 элементов.

Ключевые слова: фотоэлектрический преобразователь, солнечный элемент, локальные дефекты, джоулев нагрев, тепловизионное изображение, матричное фотоприёмное устройство, дифференциальный метод.

Ссылка: Соляков В. Н. // Прикладная физика. 2019. № 2. С. 33.

Reference: V. N. Solyakov, Prikl. Fiz., No. 2, 33 (2019).

Введение

В течение последних 15–20 лет в мире происходит практически взрывной рост использования возобновляемых источников энергии. При этом лидирующее положение среди них по темпам роста занимает солнечная энергетика, давая ежегодный прирост на уровне 20–30 %, достигнув суммарной (по миру) мощности более 430 ГВт [1] (для сравнения – сумма всех электрогенерирующих мощ-

ностей России составляет примерно 200 ГВт). Однако сроки службы солнечных электростанций более чем в два раза уступают гидро- и теплоэлектростанциям, что существенно ухудшает экономическую эффективность солнечной энергетике. Увеличение срока службы солнечных фотоэлектрических станций (СФЭС) зависит как от внешних факторов [2], так и от характеристик ФЭП и солнечных модулей в целом, которые, в свою очередь, определяются качеством и устойчивостью технологии их изготовления. Так как фотоэлектрические преобразователи для солнечной энергетике имеют максимально возможную площадь $p-n$ -перехода, то исключение локальных дефектов является одной из важнейших задач технологии. Действительно, при наличии областей с увеличенными токами утечки или увеличенным сопротивлением

Соляков Владимир Николаевич, гл. специалист,
д.т.н.
АО «НПО «Орион».
Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.
E-mail: solyakov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 22 февраля 2019 г.

© Соляков В. Н., 2019

растекания фототока снижается эффективность фотоэлектрического преобразования, а неизбежно сопутствующий при этом перегрев сокращает срок службы не только данного ФЭП, но и модуля в целом, что, в конечном счете, и приводит к сокращению срока службы.

Термографические тепловизионные методы измерения однородности распределения температуры джоулева нагрева по площади кремниевого фотоэлектрического преобразователя используются для определения указанных локальных дефектов [3]. Однако прямые тепловизионные измерения сопряжены с трудностями, обусловленными тем, что поверхность ФЭП имеет высокий коэффициент отражения и, следовательно, низкий коэффициент излучения в ИК-диапазоне спектра, в котором регистрируется тепловое излучение. На результаты измерений при этом оказывают большое влияние различные мешающие факторы. В первую очередь, к таким артефактам следует отнести планковское излучение окружающих объектов, отраженное от поверхности ФЭП (блики) [4], интенсивность которых может даже превосходить интенсивность регистрируемого теплового излучения. При таких условиях для корректности получаемых результатов измерения проводятся в специальных камерах (темных комнатах), исключающих или существенно уменьшающих направленные блики от внешних источников ИК-излучения.

Еще одним мешающим фактором, влияющим на результаты измерений, является неоднородность коэффициента излучения по поверхности ФЭП из-за наличия токосъемной металлической сетки. В принципе эту проблему можно решать с использованием двухспектральных систем [5], однако, подавляющее большинство тепловизионных приборов работают в одном спектральном диапазоне, сложность и стоимость двух- и многоспектральных систем оказывается намного выше.

Регистрация тепловизионного изображения осуществляется с использованием фотоприемных устройств инфракрасного диапазона спектра как одноэлементных, так и многоэлементных (линейных или матричных). В настоящее время предпочтение отдается матричным фотоприемным устройствам (МФПУ) [6], позволяющим применить наибо-

лее простую оптико-механическую схему без сканирования изображения, но имеющим, однако, некоторый разброс по чувствительности элементов (пикселей) матрицы. По этой причине, учитывая низкий коэффициент излучения поверхности ФЭП, требуется повышенная точность коррекции указанной неоднородности выходных сигналов [7].

Для решения вышеперечисленных проблем в настоящей статье представлена методика регистрации локальных перегревов на поверхности ФЭП с использованием матричного фотоприемного устройства, основанная на применении дифференциального метода измерений, при котором определяется разность выходных сигналов для каждого фоточувствительного элемента МФПУ при регистрации излучения от ФЭП в исходном состоянии и при подаче на него напряжения смещения.

Обоснование методики

Большинство дефектов ФЭП представляют собой области с повышенными утечками (т.е. с пониженным сопротивлением утечки R_{sh}) и/или повышенным последовательным сопротивлением R_s (см. эквивалентную схему локального участка ФЭП по постоянному току на рис. 1).

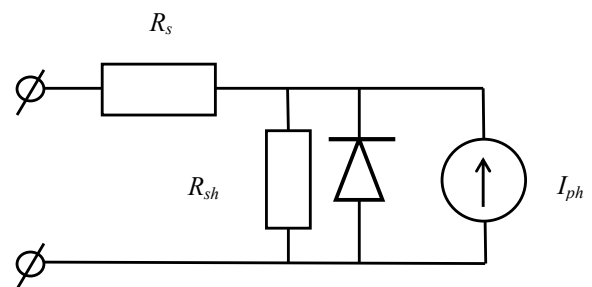


Рис. 1. Эквивалентная схема ФЭП.

Зависимость выходного тока освещаемого идеального ФЭП ($R_s = 0$, $R_{sh} = \infty$) от напряжения на выходе определяется известным выражением (см., например, [8]):

$$I(U) = I_{ph} - I_0 (\exp(qU / nkT) - 1), \quad (1)$$

где I_{ph} – фототок при нулевом напряжении; I_0 – ток насыщения при обратном напряжении; q – заряд электрона; n – фактор неидеально-

сти; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура.

Эта зависимость для типичных значений $I_{ph} = 25 \text{ мА/см}^2$, $I_0 = 10^{-8} \text{ А/см}^2$, $n = 1,7$ представлена на рис. 2. На этом рисунке также показана зависимость мощности, выдаваемой ФЭП в нагрузку, нормированной на величину $I_{ph} \times U_{xx}$, где U_{xx} – напряжение холостого хода; p - n -переход ФЭП отдает максимальную мощность при напряжении на выходе около $0,83 U_{xx}$ и токе $0,75 I_{ph}$.

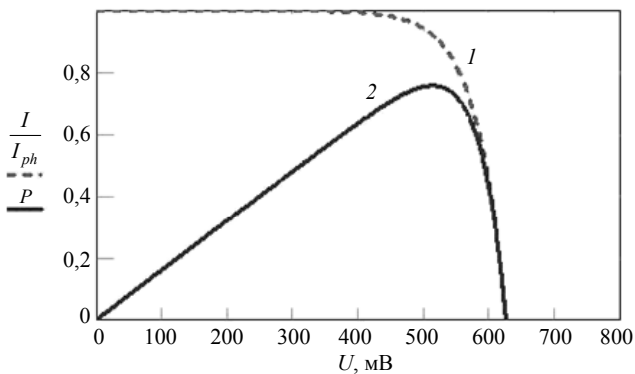


Рис. 2. Зависимость выходного тока (кривая 1) и мощности (кривая 2) идеального ФЭП (в отн. ед.) от напряжения на выходе U .

Как правило, именно в этой области выбирается «рабочая точка» при солнечном освещении реального ФЭП. В этом случае можно оценить мощность, выделяемую на сопротивлении утечки, как $P_1 \approx (0,83 U_{xx})^2 / R_{sh}$; при этом на паразитном последовательном сопротивлении выделяется мощность $P_2 \approx (0,75 I_{ph})^2 \times R_s$. Последнее значение может составлять довольно значительную часть выходной мощности ФЭП. Можно показать [8], что последовательное сопротивление порядка единиц Ом на площади ФЭП в несколько квадратных сантиметров снижает максимальную полезную мощность ФЭП на десятки процентов.

В отсутствие освещения обычного ФЭП и подаче прямого напряжения смещения (относительно p - n -перехода), вызывающего ток $I_{пр}$ через ФЭП, в паразитном последовательном сопротивлении будет выделяться мощность $P_{пр} = I_{пр}^2 \times R_s$. Если $I_{пр}$ равно или превышает I_{ph} , то на p - n -переходе ФЭП будет поддерживаться напряжение, равное или несколько выше U_{xx} . Выделение мощности на

паразитном сопротивлении утечки R_{sh} при этом будет незначительным (ток течет через диод). Однородность распределения мощности (джоулева тепла) по поверхности ФЭП в этом случае будет определяться однородностью распределения R_s , обусловленным сопротивлением растекания локальной области по n^+ -слою p - n -перехода до токосъемной металлической сетки (в большинстве ФЭП базовым является p -слой). При подаче обратного напряжения смещения $U_{обр}$ ток через ФЭП будет равен сумме I_0 и тока через паразитное сопротивление утечки R_{sh} . Так как $R_{sh} \gg R_s$, то падение напряжения и, соответственно, выделение мощности на R_s будут незначительны. Мощность, рассеиваемая на R_{sh} , равна $P_{обр} = U_{обр}^2 / R_{sh}$. Выделением мощности на диоде в этом режиме можно пренебречь вследствие малого значения I_0 .

В общем случае локальное повышение температуры поверхности ФЭП ΔT связано с выделяемой мощностью P соотношением $\Delta T = P \times R_T$, где R_T – эффективное тепловое сопротивление между участком поверхности ФЭП и окружающей средой. Распределение выделяемой по поверхности ФЭП мощности приводит к соответствующему распределению температуры.

Таким образом, наличие областей с повышенным R_s и пониженным R_{sh} можно определять бесконтактно посредством тепловизионной системы по повышенному нагреву при подаче напряжения смещения. При прямом напряжении смещения наибольшему нагреву подвергаются области с повышенным последовательным сопротивлением, а при подаче обратного напряжения смещения – области с пониженным значением сопротивления утечки. Однако на корректность измерений влияют факторы, приведенные во Введении. Ниже представлена методика, позволяющая устранить или существенно уменьшить влияние этих мешающих факторов.

Описание методики

Схема проведения измерений приведена на рис. 3. Тепловое излучение с поверхности ФЭП через ИК-объектив фокусируется на плоскость фоточувствительных элементов

(ФЧЭ) МФПУ. Интенсивность излучения связана с температурой поверхности ФЭП законом Планка с учетом коэффициента излучения. На плоскость ФЧЭ попадает также излучение от посторонних источников, отраженное поверхностью ФЭП. ФЧЭ МФПУ преобразуют интенсивность падающего на них излучения в электрические сигналы, которые усиливаются и мультиплексируются схемой считывания (в англоязычной литературе – ROIC – readout integrated circuit), после чего через модуль сопряжения подаются на модуль цифровой обработки (МЦО), в котором преобразуются в цифровую форму с использованием аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Цифровые сигналы через модуль интерфейсный передаются в персональный компьютер (ПК), где сохраняются в виде файла на жестком диске ПК.

Сигналы от отдельных фоточувствительных элементов содержат шумовую составляющую, определяющую предел чувствительности МФПУ, а также «геометрический шум», возникающий вследствие неоднородности параметров отдельных каналов прохожде-

ния сигналов от ФЧЭ до АЦП. Неоднородность проявляется как в некотором разбросе значений сигнала при однородном облучении ФЧЭ, так и в дифференциальной чувствительности. Для устранения геометрического шума обычно применяют двухточечную коррекцию [7].

Поскольку для определения локальных дефектов ФЭП интерес представляют только области повышенного нагрева при подаче прямого или обратного напряжения на ФЭП, то достаточно определить разность сигналов для каждого ФЧЭ МФПУ между сигналом при напряжении смещения и начальном состоянием без подачи напряжения на ФЭП. При этом исключается необходимость проведения коррекции части «геометрического шума», связанной с разбросом сигналов при однородном облучении. Тем самым снимаются проблемы, связанные с долговременной стабильностью параметров МФПУ [7], так как изменением коэффициентов дифференциальной чувствительности в процессе эксплуатации МФПУ можно пренебречь, а их значение можно определить в процессе начальной калибровки.

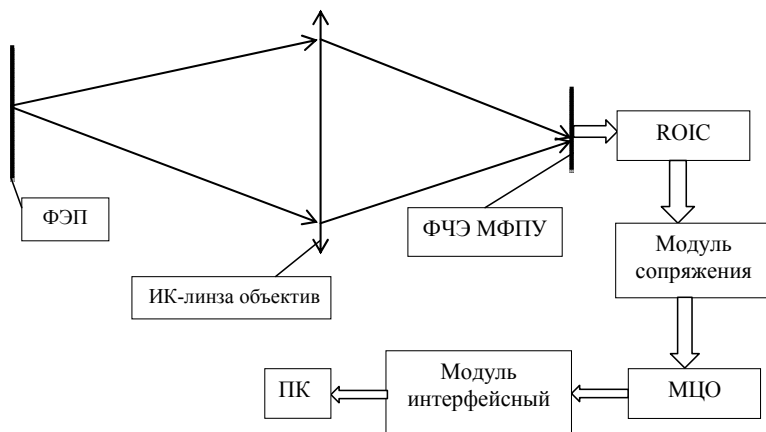


Рис. 3. Схема проведения измерений.

Реализация методики

Для реализации методики использован фотоэлектронный модуль ФЭМ16М формата 320×256 элементов производства АО «НПО «Орион» (г. Москва), который включает в себя матрицу ФЧЭ, ROIC, модуль сопряжения и МЦО. Модуль регистрирует инфракрасное излучение в спектральном диапазоне 3–5 мкм. Предел чувствительности (эквивалентная шуму разность температур) составлял около 20 мК. Модуль интерфейсный для ФЭМ16М выпуска-

ется ФГУП «ОКБ «Омега», (г. Великий Новгород). Он осуществляет связь ПК с ФЭМ16М по интерфейсам RS485 и Gigabit Ethernet и позволяет сформировать файл, содержащие сигналы от каждого ФЧЭ, в том числе – после усреднения заданного числа кадров, что обеспечивает повышение чувствительности измерительной системы. Для проведения обработки результатов разработано программное обеспечение в среде MathCAD, которое обеспечивает обработку результатов измерений, включая вычитание сигналов, и

формирование тепловизионного изображения как в градациях серого, так и псевдоцветах с использованием различных палитр.

Измерения проводились на образцах ФЭП производства ФГБНУ ВИЭСХ (г. Москва). На рис. 4 представлены тепловизионные изображения образца ФЭП планарного типа при прямом и обратном напряжениях смещения. При прямом напряжении смещения наблюдается незначительное повышение температуры (более светлые области) центральной части ФЭП между горизонтальными токоведущими дорожками (рис. 4, а), что указывает на повышенное сопротивление растекания в этом месте. При обратном смещении наблюдается небольшая область повышенного нагрева (светлое пятно на рис. 4, б), что указывает на наличие повышенных токов утечки $p-n$ -перехода в этой области.

На рис. 5 приведены аналогичные изображения высоковольтного ФЭП, содержащего 25 микроэлементов с $p-n$ -переходами, соеди-

ненных последовательно (матричный солнечный элемент [9], в англоязычной литературе Vertical Multijunction Photovoltaic Cell). Сравнение этих изображений позволяет сделать вывод об инверсии температурной картины.

Причины такой инверсии требуют детального исследования микроэлементов до соединения их в матрицу. Однако если предположить, что образец состоит из микроэлементов с $p-n$ -переходами с отличающимися факторами неидеальности в экспоненте диодных характеристик, то соотношение дифференциальных сопротивлений при прямом и обратном смещениях будет инвертированным. Соответственно, и температурная картина будет также инвертирована. Сделанное предположение подтверждается также более контрастным изображением при прямом смещении, поскольку разница в дифференциальном сопротивлении при прямом смещении $p-n$ -переходов (с различными факторами неидеальности) больше, чем при обратном.

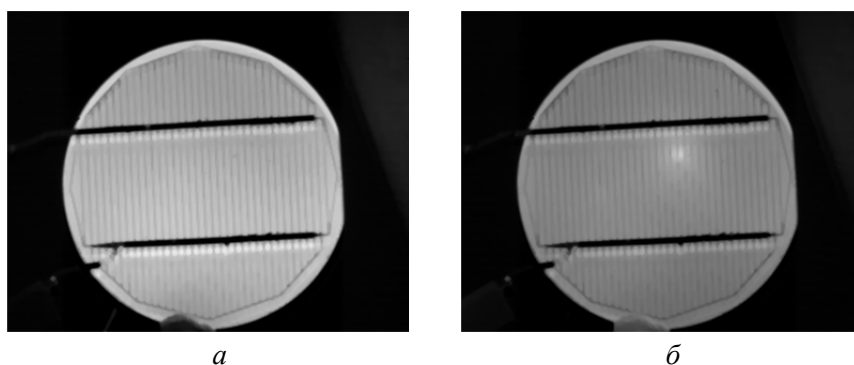


Рис. 4. Тепловизионные изображения ФЭП при прямом (а) и обратном (б) напряжениях смещения.



Рис. 5. Тепловизионные изображения высоковольтного ФЭП при прямом (а) и обратном (б) напряжениях смещения.

Заключение

Разработанная тепловизионная методика бесконтактных измерений позволяет определить и локализовать дефекты фотоэлектрических преобразователей, проявляющиеся в виде областей с повышенными токами утечки и/или повышенным последовательным сопротивлением путем регистрации теплового из-

лучения в инфракрасном диапазоне спектра. Представленная методика имеет явные преимущества, поскольку является односпектральной, не требует специального оборудования тёмных комнат и обязательной калибровки постоянной составляющей геометрического шума МФПУ. Методика может быть применена в технологическом контроле и не требует дорогостоящего импортного оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стребков Д. С. // Технический оппонент. 2018. № 1. С. 14.
2. Kamal Al Khuffash, Lisa Ann Lamont, Lana El Chaar // Applied Solar Energy. 2014. Vol. 50. No. 4. P. 215.
3. Saginov L. D. / Proceedings of ISES Solar World Congress. Daegu, Korea 8–12 November, 2015. P. 332–335. doi:10.18086/swc.2015.05.04
4. Свиридов А. Н. // Прикладная физика. 2002. № 2. С. 109.
5. Горелик Л. И., Дрогайцева Е. В., Полесский А. В., Сидорин А. В., Соляков В. Н., Тренин Д. Ю. // Прикладная физика. 2011. № 2. С. 92.
6. Bovina L. A., Boltar K. O., Burlakov I. D., Klimanov E. A., Patrashin A. I., Saginov L. D., Stafeev V. I., Timofeev A. A. // Journal of Optical Technology. 1996. Vol. 63. No. 6. P. 478.
7. Соляков В. Н., Жегалов С. И., Сагинов Л. Д., Филачев А. М., Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Свиридов А. Н. // Прикладная физика. 2008. № 1. С. 60.
8. Арбузов Ю. Д., Евдокимов В. М. Основы фотоэлектричества. – М.: 2007. ГНУ ВИЭСХ, 1991.
9. Майоров В. А., Сагинов Л. Д., Стребков Д. С. // Альтернативная энергетика и экология. 2015. № 10. С. 27.

PACS: 07.57.-c, 42.79.Pw, 44.40.+a, 84.60.Jt

Thermal imaging method for monitoring local defects of photoelectric solar radiation converters

V. N. Solyakov

Orion R&P Association, JSC
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia

Received February 22, 2019

The article presents a method to determine local defects in solar photovoltaic cells (PVC). It is based on the non-contact measurement of PVC area temperature distribution by a special thermovision system when applying forward and reverse voltage to the cell. Distribution of PVC surface temperature is determined by nonuniformity of a current density (because of local defects) and reveals itself in the intensity of thermal radiation in the infrared (IR) spectrum. The difference between the signal photodetector when applying a forward or reverse voltage to solar cells and in the absence of applied voltage to the PVC is used to eliminate the effect of IR glare, surface irregularities emissivity solar cells, nonuniformity of photoreceiver array sensitivity. The hardware and software implementation techniques using focal plane array of infrared 3–5 micron spectral range and 320×256 elements size are presented.

Keywords: photovoltaic cell, solar cell, local defect, Joule heating, thermovision picture, infrared glare, focal plane array, differential method.

REFERENCES

1. D. S. Strebkov, Tekhnicheskii Oponent, No. 1. 14 (2018).
2. Kamal Al Khuffash, Lisa Ann Lamont, and Lana El Chaar. Applied Solar Energy **50** (4), 215 (2014).
3. L. D. Saginov, in *Proceedings of ISES Solar World Congress* (Daegu, Korea 8–12 November, 2015), pp. 332–335. doi:10.18086/swc.2015.05.04
4. A. N. Sviridov, Prikl. Fiz., No. 2, 109 (2002).
5. L. I. Gorelik, E. V. Dragojtseva, A. V. Polesskij, A. V. Sidorin, V. N. Solyakov, and D. Yu. Trenin, Prikl. Fiz., No. 2, 92 (2011).
6. L. A. Bovina, K. O. Boltar, I. D. Burlakov, E. A. Klimanov, A. I. Patrashin, L. D. Saginov, V. I. Stafeev, and A. A. Timofeev, Journal of Optical Technology **63**, 478 (1996).
7. V. N. Solyakov, S. I. Zhegalov, L. D. Saginov, A. M. Filachev, K. O. Boltar, I. D. Burlakov, and A. N. Sviridov, Prikl. Fiz., No. 1, 60 (2008).
8. Yu. D. Arbuзов and V. M. Evdokimov. *Fundamentals of Photovoltaics*. (GNU VIESH, Moscow, 2008) [in Russian].
9. V. A. Majorov, L. D. Saginov, and D. S. Strebkov, Alternativnaja energetika i ekologija, No. 10, 27 (2015).