

ИССЛЕДОВАНИЕ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И СОЛНЕЧНЫХ МОДУЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ИНФРАКРАСНЫХ КАМЕР

А. В. Нестерёнок, А. И. Конойко, В. В. Малютина-Бронская, Д. В. Сенькевич

*ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»,
пр. Независимости, 68-1, 220072 Минск, Беларусь,
e-mail: malyutina@oelt.basnet.by*

Представлена бесконтактная методика использования тепловизионной инфракрасной камеры для тестирования солнечных элементов (СЭ) и модулей. Данная методика позволяет оценивать деградацию параметров СЭ по анализу областей локального перегрева в местах дефектов, распределенных по площади. К таким дефектам, трудно определяемыми визуальными и электрическими методами контроля, относятся: расслоение, трещины, деградация пассивации, светоиндуцированная деградация, коррозия припоя, выход из строя контактных площадок или влажностная коррозия.

Ключевые слова: солнечный элемент; солнечный модуль; тепловизионная камера.

INFRARED CAMERAS FOR INVESTIGATION OF SOLAR CELLS AND SOLAR MODULES

A. V. Nesterenok, A. I. Konoiko, V. V. Malyutina-Bronskaya, D. V. Senkevich

*SSPA "Optics, optoelectronics and laser technology",
Nezalezhnosti Ave. 68-1, 220072 Minsk, Belarus
Corresponding author: V. V. Malyutina-Bronskaya (malyutina@oelt.basnet.by)*

A non-contact technique for using the infrared (IR) camera for testing solar cells (SC) and modules is presented. This technique makes it possible to evaluate the degradation of SC parameters by analyzing the areas of local overheating in the places of defects distributed over the area. Such defects (which are difficult to determine by visual and electrical methods of control), include delamination, cracks, passivation degradation, light-induced degradation, solder corrosion, contact pad failure or moisture corrosion.

Key words: solar cell; solar module; IR- camera.

ВВЕДЕНИЕ

Не существует универсального метода, позволяющего тестировать все виды дефектов [1]. Популярны методики, основанные на измерении вольт-амперных характеристик, которые позволяют определить электрические параметры измеряемой ячейки, однако данные методы контактные и не позволяют оценить распределенные по площади дефекты. Некоторые типы дефектов, например, расслоение, трещины, деградация пассивации, светоиндуцированная деградация, коррозия припоя, выход из строя пальцевых контактов или влажностная коррозия; шунты и другие лучше выявляются бесконтактными термографическими методами с использованием инфракрасной камеры [2–5]. Также можно отметить, что в дневное время фотоэнергетические системы (солнечные станции) находятся под напряжением, причем напря-

жение часто может достигать 1000 В. Это представляет большой риск удара током для персонала при визуальном осмотре такой системы. Термография же является очень безопасным методом обследования, так как измерения всегда проводятся с достаточного расстояния от объекта. Это позволяет легко соблюдать требование о безопасном расстоянии. В целом, неполадки в работе фотоэнергетических систем при солнечном излучении от 600 Вт/м^2 можно быстро диагностировать по изменениям тепловых свойств, видимых на экране инфракрасной камеры. Такие изменения в солнечных модулях происходят, например, из-за: дефектов возвратных диодов; повреждений контактов и короткого замыкания в ячейках солнечных батарей; проникновения влаги и грязи; трещин в элементах или стекле модулей; неработающих или неподключённых модулей; так называемого дисбаланса, т.е. падения производительности из-за разницы в мощности модулей; повреждениях проводки и неплотных контактов и других.

В литературе можно выделить следующие виды бесконтактных методов оценки деградации солнечных модулей и элементов [3].

- Световая термография. Измерение проводится при постоянном освещении солнцем. Падающий свет генерирует прямое и косвенное тепло в фотоэлектрическом модуле, которое можно обнаружить с помощью инфракрасной (ИК) камеры. Метод быстрый (анализ в реальном времени) и бесконтактный. Измерения можно проводить при нормальной работе установки при хороших погодных условиях (солнечная радиация не менее 600 Вт/м^2).

- Закрытая термография. Визуализация дефектов должна выполняться в темноте, чтобы устранить помехи, вызванные поступающим излучением или днем при солнечном свете. На модуль подается импульсный ток и делаются синхронизированные ИК-изображения. В отличие от светового метода, обладает более высоким разрешением и, таким образом, позволяет обнаруживать меньшие разности температур. Недостатком является увеличение времени измерения и существенное увеличение стоимости необходимого оборудования.

- Электролюминесцентная термография. Использует тот факт, что фотоэлектрическая ячейка представляет собой $p-n$ -переход, который генерирует электричество при освещении. Во время визуализации этим методом модуль солнечного элемента смещен в обратном направлении и поэтому действует как (очень слабый) светоизлучающий диод. На электролюминесцентном изображении можно различить области ячеек, которые излучают больше, и другие, которые излучают меньше фотонов. Поскольку количество испускаемых фотонов довольно мало, необходимо проводить визуализацию в темноте. Измерение в сумерках (снаружи) или при слабом внешнем освещении (лаборатория) также возможно, если используются оптические фильтры. Данный метод выполняется в режиме тока короткого замыкания ($I_{кз}$), а иногда дополнительно с $1/10 I_{кз}$. $I_{кз}$ достигается при облучении 1000 Вт/м^2 и $1/10 I_{кз}$ при 100 Вт/м^2 .

- Люминесцентная термография. Этот метод визуализации, в условиях дневного света, использует принципы закрытой и электролюминесцентной термографии. Для данного метода требуются оптические фильтры в сочетании с высокочувствительным InGaAs-детектором, что позволяет проводить измерения в условиях дневного света.

- Ультрафиолетовая (УФ) флуоресценция. Данный метод направлен на обнаружение люминофоров, которые образуются, когда герметизирующий материал EVA разлагается под действием УФ-излучения, можно использовать для обнаружения трещин в ячейках и других точек утечки кислорода, поскольку они кажутся более темными на изображении.

- Измерения локального фототока (LBIC-метод). Для этого световой пучок фокусируется в точку и сканируется по испытываемому солнечному элементу, который находится в режиме короткого замыкания. Локально индуцированный ток можно масштабировать до внешней квантовой эффективности с помощью дополнительного измерения спектрального отклика. Используя источники света с различными длинами волн возбуждения можно создавать карты LBIC.

Для электролюминесценции, люминесценции под воздействием ультрафиолетового излучения или дневного освещения достаточно потребительских камер с CCD матрицей, однако эти методы требуют проведения измерений в темноте или в полумраке с использованием оптических фильтров (необходима фильтрация люминесцентного излучения от фонового света до 5 порядков), поскольку люминесцентное излучение солнечных элементов на порядок и более слабее дневного или даже искусственного освещения. В местах нахождения дефектов при протекании темнового тока выделяется значительно большее количество джоулевого тепла по отношению к средней величине на единицу площади и происходит локальный перегрев солнечного элемента, который фиксируют инфракрасной камерой при термографии. Данный метод, достаточно быстрый и позволяющий проводить измерения в реальном времени, можно использовать в помещениях и на открытом воздухе при освещении не менее 600 Вт/м^2 . Точность оценки данного метода определяется разрешающей способностью инфракрасной камеры. Также данный метод можно будет использовать и при изготовлении и проверке солнечных модулей, поскольку в этих случаях так же возникает множество термических процессов.

Таким образом, термография может быть выбрана как наиболее универсальный метод исследования деградации параметров солнечных элементов различного типа. Чтобы добиться максимально возможных и легко определяемых градиентов температур на картинке ИК-камеры, рекомендуется проводить измерения при низких температурах воздуха (утром или вечером). Также следует учитывать эффект охлаждения солнечных модулей ветром. При проведении ИК - съёмки ключевым является расположение ИК-камеры относительно солнечного элемента или модуля солнечной батареи. Данный метод можно использовать не только в помещениях, но и на открытом воздухе при освещении не менее 600 Вт/м^2 , метод достаточно быстрый и позволит проводить анализ в реальном времени.

В работе представлены результаты разработки лабораторной бесконтактной методики оценки деградации солнечных элементов с использованием ИК-камеры.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На базе инфракрасной (тепловизионной) камеры FLIR i40 была разработана лабораторная бесконтактная методика оценки деградации солнечных элементов. Были использованы два подхода для выявления дефектов в солнечных элементах: первый - при воздействии температуры, выше рабочей и второй – при воздействии напряжений, выше рабочих. Блок-схема лабораторной методики оценки деградации солнечных элементов на основе тепловизионной камеры представлена на рис. 1, а. Для отработки ме-

тодики были выбраны кремниевые солнечные элементы размером 4 см^2 . Причем для анализа был выбран СЭ с дефектом пайки шины как видно из рис. 1, б. В качестве источника напряжения/тока использовался измеритель Keithley 2450. Нагрев солнечного элемента до $+80^\circ\text{C}$ проводился с помощью термостолика с электронным управлением. Дефекты на солнечные элементы, такие как скол и царапины, наносились механическим путем. Связь между результатами термографического контроля и некоторыми дефектами была получена при измерении вольт-амперной характеристики (ВАХ) на имитаторе солнечного излучения с определением основных параметров.

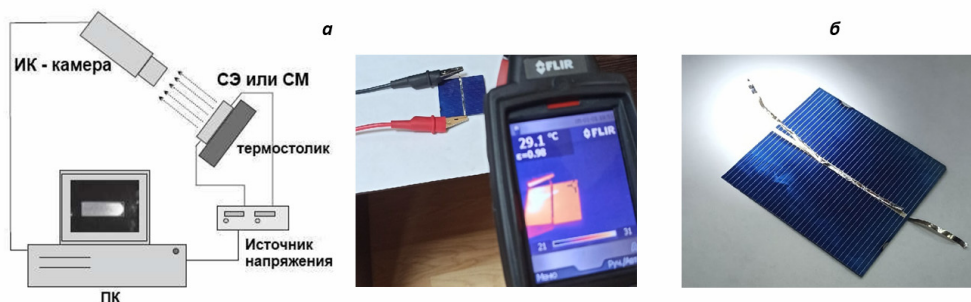


Рисунок 1. Блок-схема лабораторной методики оценки деградации солнечных элементов на основе ИК-камеры и внешний вид изображения на ИК-камере (а) и внешний вид тестируемых солнечных элементов (б)

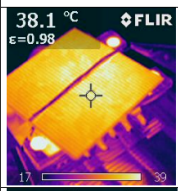
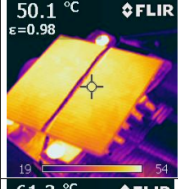
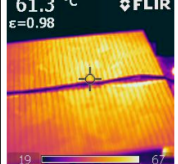
РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для отработки термографии при воздействии температуры, выше рабочей СЭ постепенно нагревались до 80°C и результаты нагрева СЭ фиксировались ИК-камерой. Параллельно с термографией проводились измерения вольт-амперных характеристик на имитаторе солнечного излучения со спектром АМ 1,5 с определением основных параметров: напряжение холостого хода ($U_{\text{ХХ}}$), тока короткого замыкания ($I_{\text{КЗ}}$) и КПД СЭ. Полученные результаты исследования параметров СЭ представлены на рис. 2, а. При температуре термостолика 25°C по ИК-изображению температура СЭ составляла от 28°C до 39°C .

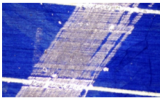
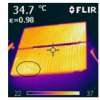

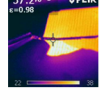
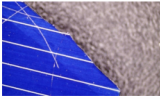
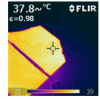
Также на ИК-изображении можно заметить области локального перегрева СЭ ближе к контактной шине. С ростом температуры термостолика, СЭ нагревается, но максимальная температура СЭ ниже температуры термостолика. Это может быть связано с тем, что съемка ИК-камерой производится не дожидаясь режима температурного равновесия СЭ и термостолика. При этом области вокруг шины нагреваются до более высокой температуры, чем остального СЭ. Из рис. 2, а видно, что наличие дефекта пайки шины приводит к локальному перегреву этой области, что в значительной степени отражается на параметрах СЭ.

Можно отметить, что темновая характеристика СЭ экспоненциальна, поэтому при малых смещениях темновой ток пренебрежимо мал, а затем сильно увеличивается с увеличением прямого смещения. Часто предполагается, что темновой ток течет в СЭ однородно, но это, как правило, неверно. Почти все СЭ содержат локальные включения, которые традиционно называют «шунтами». На ИК-изображениях при прямом смещении, на визуально бездефектных СЭ, можно обнаружить яркие пятна – области локаль-

ного перегрева, которые являются типичными шунтами. Эти шунты могут иметь линейную (омическую) или диодную характеристику, но обычно они имеют тенденцию увеличивать темновой прямой ток и, как следствие, ухудшать параметры СЭ.

Снимок ИК-камеры	Температура термостоллика	Параметры СЭ
	25°C	FF = 52,1% U _{xx} = 0,57 V I _{кз} = 1442 mA КПД = 9,98%
	60°C	FF = 48,5% U _{xx} = 0,54 V I _{кз} = 1473 mA КПД = 9,05%
	80°C	FF = 46,1% U _{xx} = 0,51 V I _{кз} = 1488 mA КПД = 8,16%

a

Тип дефекта солнечного элемента	Внешний вид дефекта	Снимок ИК-камеры солнечного элемента с дефектом
Царапины		
Трещина на тыльной стороне		
Слом		

б

Рисунок 2. Результаты исследований ИК-изображений СЭ при нагреве и их выходных параметров при воздействии излучения со спектром АМ 1,5 (а) и различных механических дефектов СЭ при воздействии электрического тока выше рабочего значения (б)

Для отработки термографии при воздействии тока/напряжения, выше рабочего значения, для СЭ были выбраны элементы, которые специально были подвержены механическим дефектам: царапина, трещина на тыльной стороне, слом. Полученные ИК-изображения этих дефектов представлены на рис. 2, б. Данные дефекты проявляются даже под действием приложенного напряжения порядка рабочего значения. Данный метод позволяет увидеть дефекты даже с тыльной стороны СЭ, что важно, при оценке деградации корпусированных солнечных модулей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ ИК –изображений СЭ, полученных при помощи лабораторной бесконтактной методики оценки деградации СЭ, позволил определить одинаковые типы дефектов как под действием температуры выше рабочего значения для СЭ, так и при воздействии электрических полей выше рабочего значения для СЭ.

Полученные данные показали, что ИК-термография является эффективным дополнительным методом для качественной оценки деградации параметров СЭ в лабораторных условиях. С помощью данного метода легко выявить скрытые дефекты в фотоэлектрических элементах как с лицевой, так и с тыльной стороны, а так же обнаружить дефекты в электрических соединениях-контактных площадках.

Данный метод может облегчить тестирование СЭ на различных этапах сборки в солнечные модули и их техническое обслуживание в реальных условиях эксплуатации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Nondestructive testing with thermography /C. Ibarra-Castanedo, J. R.Tarpani, X. Maldague// European Journal of Physics.-2013ю- Vol. 34.- N. 6.- P.s91-s109.
2. Degradation analysis of photovoltaic modules after operating for 22 years. A case study with comparisons/ L. Lillo-Sánchez [et al.] // Solar Energy.-2021.- Vol. 222.- P. 84-94.
3. Scientific and economic comparison of outdoor characterisation methods for photovoltaic power plants/ W. Mühleisen [et al.] // Renewable Energy.-2019.- Vol. 134.- P. 321-329.
4. Carigiet F. Long-term power degradation analysis of crystalline silicon PV modules using indoor and outdoor measurement techniques/ F. Carigiet, Ch. J. Brabec, F. P. Baumgartner// Renewable and Sustainable Energy Reviews.-2021.-Vol. 144.- P. 111005.
5. Low-cost infrared thermography in aid of photovoltaic panels degradation research/ M.A. Dávila [et al.]// Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia.- 2021.- № 101.- P.20-30.

ВЛИЯНИЕ УРОВНЯ ЛЕГИРОВАНИЯ И РЕТИКУЛЯРНОЙ ПЛОТНОСТИ ИСХОДНЫХ КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН НА ИХ ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОСЛЕ БЫСТРОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ

А. А. Омельченко, В. А. Солодуха, В. А. Пилипенко

ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», ул. Казинца, 121А,
220108, Минск, Беларусь
e-mail: anna.omelchenko.13177@mail.ru.

Приведены результаты исследования методом спектральной эллипсометрии влияния быстрой термообработки (БТО) исходных кремниевых пластин (КДБ-12 ориентации $\langle 100 \rangle$, КДБ-10 ориентации $\langle 111 \rangle$ и КДБ-0,005 ориентации $\langle 100 \rangle$) различного уровня легирования и ретикулярной плотности на их оптические характеристики: коэффициенты преломления, поглощения. Подтверждено влияние ретикулярной плотности кремния на его оптические характеристики после БТО. Показано, уменьшение коэффициентов преломления и поглощения в центре зоны Бриллюэна для образцов кремния с высокой концентрацией бора после БТО по сравнению с низколегированным кремнием; в области пика максимума поглощения, соответствующего энергии выхода электрона с поверхности кремния (4.34 эВ) показатель преломления высоколегированного кремния становится выше, чем у низколегированного кремния, что обусловлено высокой концентрацией свободных носителей заряда на поверхности кремния в этом спектральном диапазоне.

Установлено, что спектральная область 3.59–4.67 эВ, определяемая работой выхода электронов с поверхности кремния, более информативно показывает различие оптических параметров кремния различной ориентации, а для оценки влияния уровня легирования кремния на его оптические характеристики наиболее информативен спектральный диапазон 3.32–4.34 эВ.

Ключевые слова: быстрая термическая обработка; коэффициент поглощения; коэффициент преломления.