



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.5.4>

УДК: 681.518.3

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗИ ТЕПЛОВЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

А.А. Гавриков¹, В.А. Сергеев¹, В.И. Смирнов^{1,2}

¹ Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова Российской академии наук
432071, г. Ульяновск, ул. Гончарова, д. 48/2

² Ульяновский государственный технический университет
432027, г. Ульяновск, ул. Северный венец, д. 32

Статья поступила в редакцию 27 марта 2023 г.

Аннотация. В работе показана возможность и приведены результаты измерения теплового сопротивления переход-плата солнечных элементов (СЭ) из монокристаллического кремния модуляционным методом. Представлены результаты исследования зависимости коэффициента полезного действия (КПД) СЭ от температуры и на небольшой выборке СЭ устлана связь значений теплового сопротивления переход-плата и КПД СЭ. Показана возможность экспресс-диагностики СЭ по результатам измерения теплового сопротивления на входном контроле при производстве солнечных батарей.

Ключевые слова: солнечный элемент, тепловое сопротивление, измерение, модуляционный метод, коэффициент полезного действия.

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания №075-01133-22.

Автор для переписки: Гавриков Андрей Анатольевич, a.gavrikoff@gmail.com

Введение

Как известно, температура оказывает негативное влияние на эффективность преобразования солнечным элементом (СЭ) световой энергии в электрическую [1]. С ростом температуры падение эффективности преобразования по данным производителей составляет 0.3–0.4 %/°C [2] начиная уже с 25 °C. Для поддержания высокой эффективности необходима качественно спроектированная конструкция теплоотвода.

Основным параметром, позволяющим оценить качество теплоотвода конструкции СЭ, является тепловое сопротивление R_{Tjc} переход-плата между активной областью элемента и печатной платой (корпусом), на которой смонтирован элемент. Значение R_{Tjc} определяется приростом температуры ΔT_j p - n перехода при прохождении через элемент электрической мощности известной величины.

$$R_{Tjc} = \frac{T_j - T_c}{P} = \frac{\Delta T_j}{P},$$

где T_j – температура p - n перехода СЭ; T_c – температура платы элемента; P – тепловая мощность, пропускаемая через элемент.

Измерение теплового сопротивления и иных тепловых параметров при производственных испытаниях СЭ и солнечных батарей не проводится [3], однако сильное влияние температуры на эффективность СЭ обуславливает необходимость контроля качества теплоотвода и тепловых характеристик СЭ.

Целью настоящей работы является исследование связи тепловых характеристик и энергетической эффективности СЭ.

1. Измерение теплового сопротивления переход-плата солнечных элементов

Для измерения теплового сопротивления использовался оригинальный модуляционный метод [4], который, в отличие от стандартных методов [5], не требует жесткой стабилизации температуры корпуса исследуемого объекта [6], что является важным преимуществом модуляционного метода, поскольку монтаж СЭ на радиаторы и контроль температуры корпуса достаточно трудоемкий процесс.

В эксперименте использовались СЭ из монокристаллического кремния размером 50×50 мм производства SunYima, смонтированные на печатной плате из стеклотекстолита, покрытые с лицевой стороны прозрачным силиконовым компаундом. Заявленное производителем номинальное напряжение на одном элементе равно 2 В при токе 160 мА. Элементы перед экспериментом были закреплены на алюминиевых радиаторах размером 50x50x20 мм с помощью термокля Алсил-3. На время измерений элементы закрывались светонепроницаемым экраном.



Рис. 1. Внешний вид солнечного элемента (а) и СЭ, смонтированного на радиатор (б)

Целью теплофизического исследования было определение значений теплового сопротивления переход-плата СЭ модуляционным методом, оценка статистического разброса этих значений, и установление связи полученных теплового сопротивления переход-плата СЭ с коэффициентом полезного действия СЭ при различной температуре и освещенности.

Особенностью импульсных (в том числе и модуляционного) методов измерения теплового сопротивления полупроводниковых приборов является необходимость учета длительности переходных электрических процессов при переключении прибора из режима нагрева в измерительный режим [7]. Для определения длительности переходных электрических процессов, протекающих в СЭ после окончания греющего импульса, с целью последующего учета этой длительности при измерении теплового импеданса СЭ осциллографом регистрировалось изменение падения напряжения на СЭ при пропускании через

него импульсов тока силой 1500 мА длительностью 120 мкс и скважностью 2. Из осциллограммы, представленной на рисунке 2, видно, что длительность переходного процесса при выключении импульса тока не превышает 60 мкс.

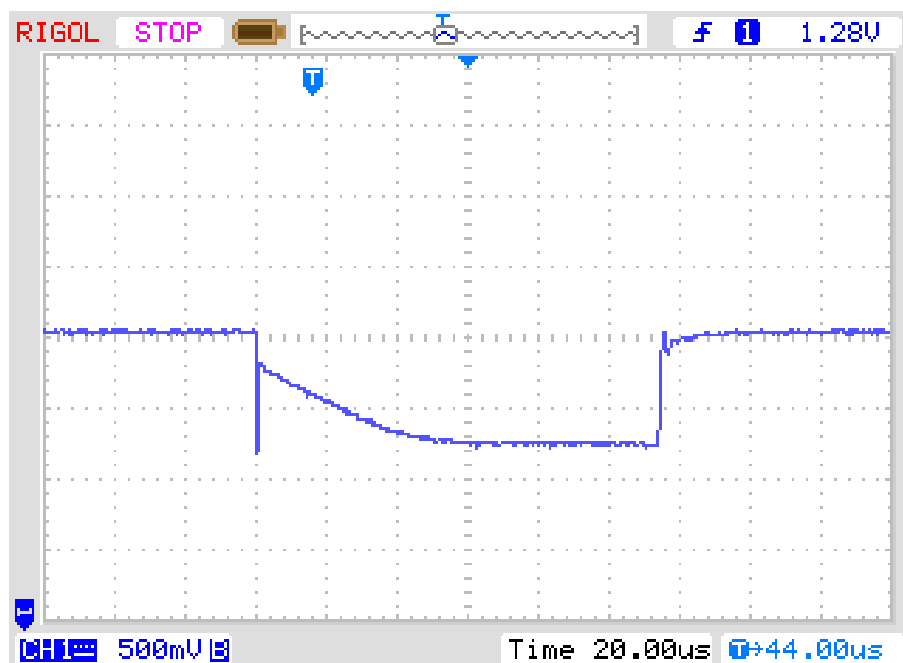


Рис. 2. Осциллограмма переходного электрического процесса в СЭ

Измерения теплового сопротивления проводились с помощью измерителя теплового сопротивления полупроводниковых приборов [5], реализующего модуляционный метод. Суть метода заключается в пропускании через исследуемый объект широтно-импульсно модулированного греющего тока заданной амплитуды $I_{гр}$ с периодом следования $t_{имп}$ и длительностью импульсов $\tau(t)$, изменяющейся по гармоническому закону:

$$\tau(t) = \tau_{cp}(1 + a \cdot \sin 2\pi vt), \quad (1)$$

где: τ_{cp} – средняя длительность импульсов; a – коэффициент модуляции; v – частота модуляции.

Протекание через р-п переход СЭ греющего тока, модулированного по закону (1), вызывает выделение в СЭ импульсной мощности $P(t)$, среднее значение которой изменяется по закону, близкому к гармоническому. Соответственно усредненная за период следования импульсов температура $T_j(t)$ перехода СЭ будет изменяться по гармоническому закону со сдвигом фазы φ относительно переменной составляющей греющей мощности:

$$T_j(t) = T_0 + T_1 \cdot \sin(2\pi\nu t - \phi), \quad (2)$$

где: T_0 – постоянная составляющая температуры перехода; T_1 – амплитуда переменной составляющей температуры перехода на частоте модуляции ν .

Мощность, рассеиваемая СЭ, определяется путем измерения напряжения на СЭ в середине длительности импульса греющего тока заданной амплитуды:

$$P = U \cdot I_{cp}$$

Температура перехода $T_j(t)$ определяется косвенным способом по результатам измерения температурочувствительного параметра (ТЧП), в качестве которого используется прямое падение напряжения на переходе при протекании через него малого измерительного тока. ТЧП измеряется после каждого греющего импульса с небольшой задержкой, процедура определения которой описана выше. Полученная зависимость $T_j(t)$ проходит цифровую фильтрацию, чтобы исключить влияние шумов, после чего вычисляется модуль $Z_T(\nu)$ теплового импеданса на частоте модуляции ν как отношение амплитуды переменной составляющей температуры перехода T_1 к амплитуде первой гармоники греющей мощности P_1 , а по отношению мнимой и вещественной Фурье-трансформант – тангенс фазы $\phi(\nu)$ теплового импеданса.

Для определения значений теплового сопротивления СЭ и их разброса от образца к образцу у пяти СЭ были измерены зависимости модуля $Z_T(\nu)$ теплового импеданса, его вещественной части $\text{Re } Z_T(\nu)$ и фазы $\phi(\nu)$ от частоты ν модуляции греющей мощности.

При измерении объект нагревался последовательностью импульсов греющего тока амплитудой 2000 мА с периодом следования 400 мкс. Длительность модулированных импульсов изменялась в пределах от 100 до 300 мкс, частота модуляции – от 8,41 до 0,251 Гц.

На рисунке 3 приведен снимок экрана управляющей программы измерительного комплекса, на котором отражены параметры и результаты измерения, а также графики зависимости греющей мощности и температуры перехода исследуемого объекта.

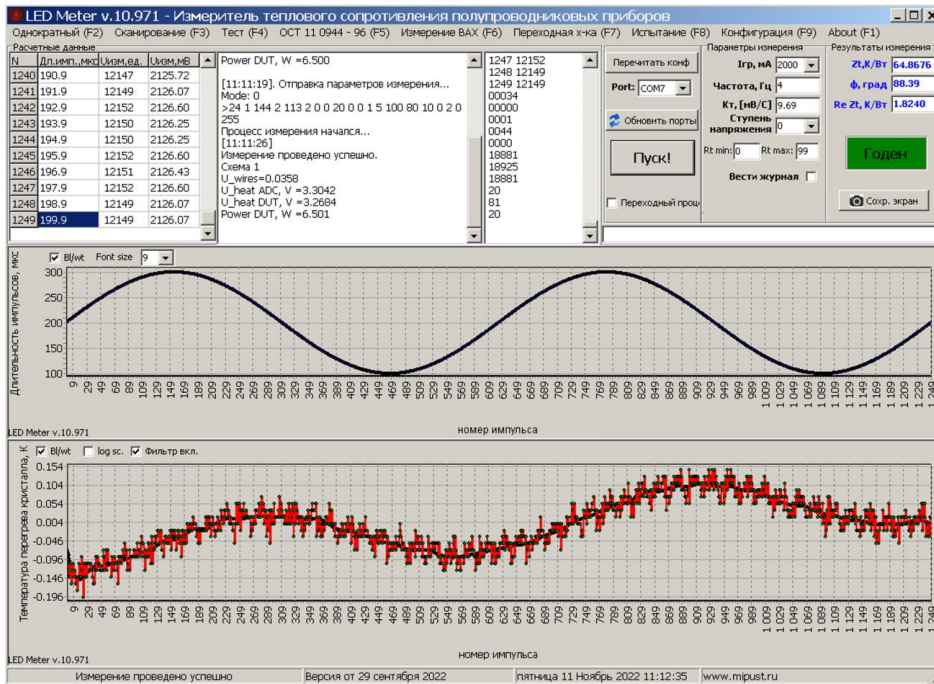


Рис. 3. Снимок экрана управляющей программы измерительного комплекса при работе единичной частоте модуляции греющей мощности

Для определения компонент теплового сопротивления СЭ измерялась зависимость модуля $Z_T(\nu)$, фазы $\varphi(\nu)$ и вещественной части $Re Z_T(\nu)$ теплового импеданса от частоты модуляции ν . График зависимости $Re Z_T(\nu)$ реальной части теплового импеданса от частоты греющей мощности представлен на рисунке 4.

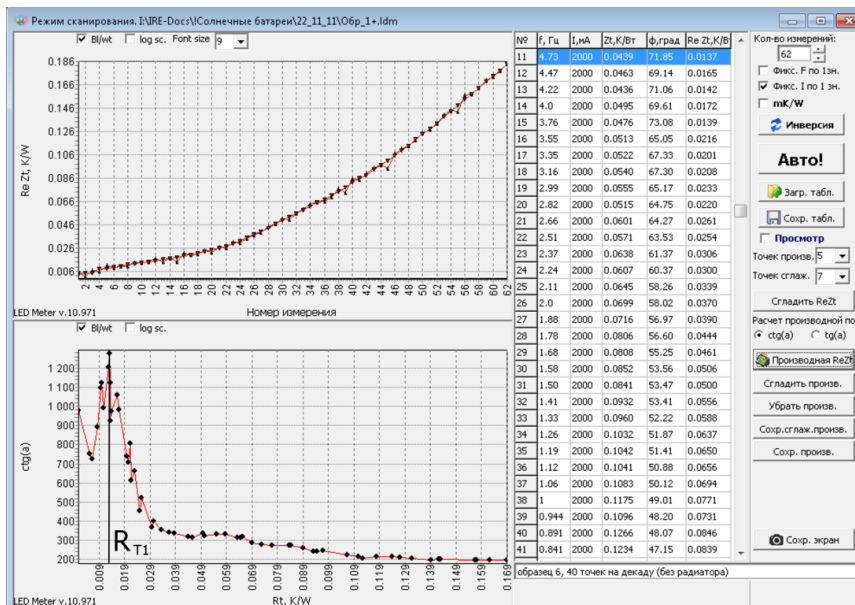


Рис. 4. Частотная зависимость $Re Z_T(\nu)$ (вверху) и результат ее обработки (внизу)

На оси абсцисс откладываются номера измерения, соответствующие частотам, указанным в таблице справа. Зависимость $Re Z_T(\nu)$ обладает

особенностями, выраженными пологими участками и точками перегиба. Эти особенности соответствуют компонентам теплового сопротивления, связанным с элементами конструкции СЭ, по которым тепловой поток распространяется от активной области кристалла к плате, радиатору и в окружающую среду. Выявив эти особенности графика $\text{Re } Z_T(v)$, можно вычислить значения компонент теплового сопротивления.

Обработка экспериментальной зависимости $\text{Re } Z_T(v)$, которая включает в себя процедуру сглаживания зависимости $\text{Re } Z_T(v)$ методом «скользящего среднего», вычисление производной $d\text{Re } Z_T(v)/dv$ и построение зависимости $(d\text{Re } Z_T/dv)^{-1}$ от теплового сопротивления R_T [8]. Компоненты теплового сопротивления определяются по положению максимумов на кривой $(d\text{Re } Z_T/dv)^{-1}$ относительно оси абсцисс.

В качестве контрольного образца использовался еще один СЭ под номером 6, не установленный на радиатор, чтобы проверить возможность измерения компоненты теплового сопротивления переход-плата без фиксации температуры корпуса.

Из графика на рис. 4 следует, что компонента теплового сопротивления «переход-плата» выявляется даже при отсутствии радиатора. Для исследуемого объекта значение R_{T1} , соответствующее компоненте переход-плата, показано на рисунке и равно 0.0137 К/Вт. Это делает возможным проведение экспресс-диагностики СЭ на производстве без предварительного монтажа на радиатор.

Результаты измерения теплового сопротивления R_{Tjc} СЭ приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Значения теплового сопротивления R_{Tjc} исследуемых СЭ

№ образца	R_{Tjc} , К/Вт
1	0.0178
2	0.0295
3	0.0211
4	0.0207
5	0.0216
6	0.0137

Таким образом, в партии выделяется элемент номер 2, у которого значение теплового сопротивления выше остальных. В дальнейшем будет исследовано наличие корреляции между тепловым сопротивлением и электрическими параметрами СЭ. Значение ТС элемента №6 заметно меньше, чем у остальных, что, возможно, вызвано лучшим из выборки клеевым соединением кристалл-плата.

2. Исследование зависимости КПД солнечного элемента от температуры

При проведении эксперимента источник света жестко закреплялся перед СЭ на расстоянии 30см в светонепроницаемом термостате, температура в котором поддерживалась постоянной. Для освещения СЭ использовалась светодиодная матрица номинальной мощностью 10 Вт. Измерения производились при освещенности $E = 503$ лк.

Для каждого элемента, значения температуры и светового потока определялось оптимальное сопротивление нагрузки, при котором мощность, вырабатываемая СЭ, максимальна.

На этих значения сопротивления нагрузки были получены зависимости КПД СЭ при разных значениях температуры окружающей среды. Измерения проводились при фиксированных значениях температуры от 20 до 70 °С с шагом в 10 градусов.

На рисунке 4 представлено отношение выходной мощности солнечного элемента к освещенности. Наглядно показано, что СЭ (Объект 2) с наибольшим тепловым сопротивлением менее эффективен и быстрее теряет КПД с ростом температуры.

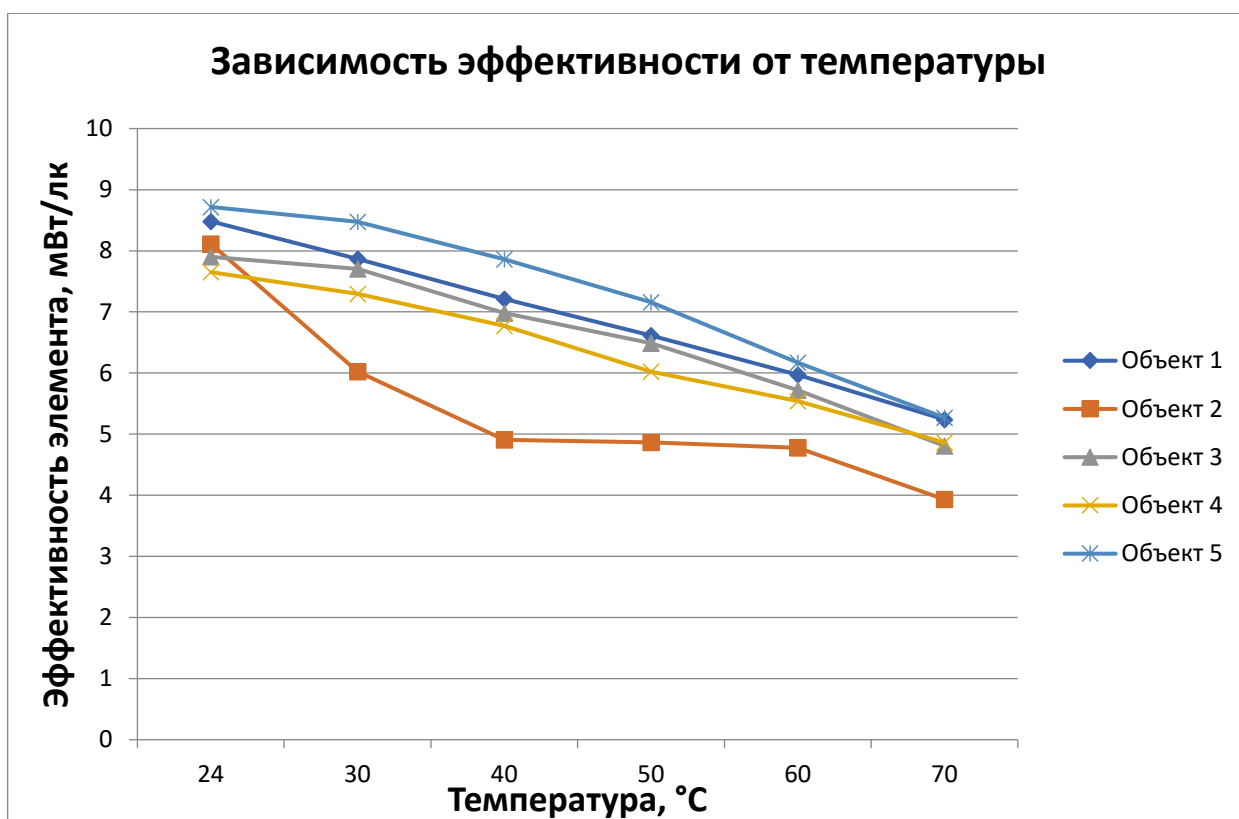


Рис. 4. Зависимость эффективности солнечных элементов от температуры окружающей среды

3. Исследование зависимости КПД солнечного элемента от освещенности

Целью исследования является выявление взаимосвязи между эффективностью СЭ, температурой окружающей среды и освещенности.

Условия эксперимента аналогичны условиям в параграфе 2. Измерения проводились при четырех значениях электрической мощности на светодиодной матрице. Значения напряжения, тока и результирующей освещенности были измерены для СЭ №1 и приведены в таблице 2.

Таблица 2. Параметры освещения солнечных элементов

U, V	I, A	E, лк
10,8	0,20	503
11,0	0,30	735
11,2	0,40	971
11,4	0,50	1210

Для каждого из пяти элементов были получены зависимости эффективности от освещенности при температуре 20 °С и 60 °С. Результаты представлены на рисунках 5 и 6 соответственно.

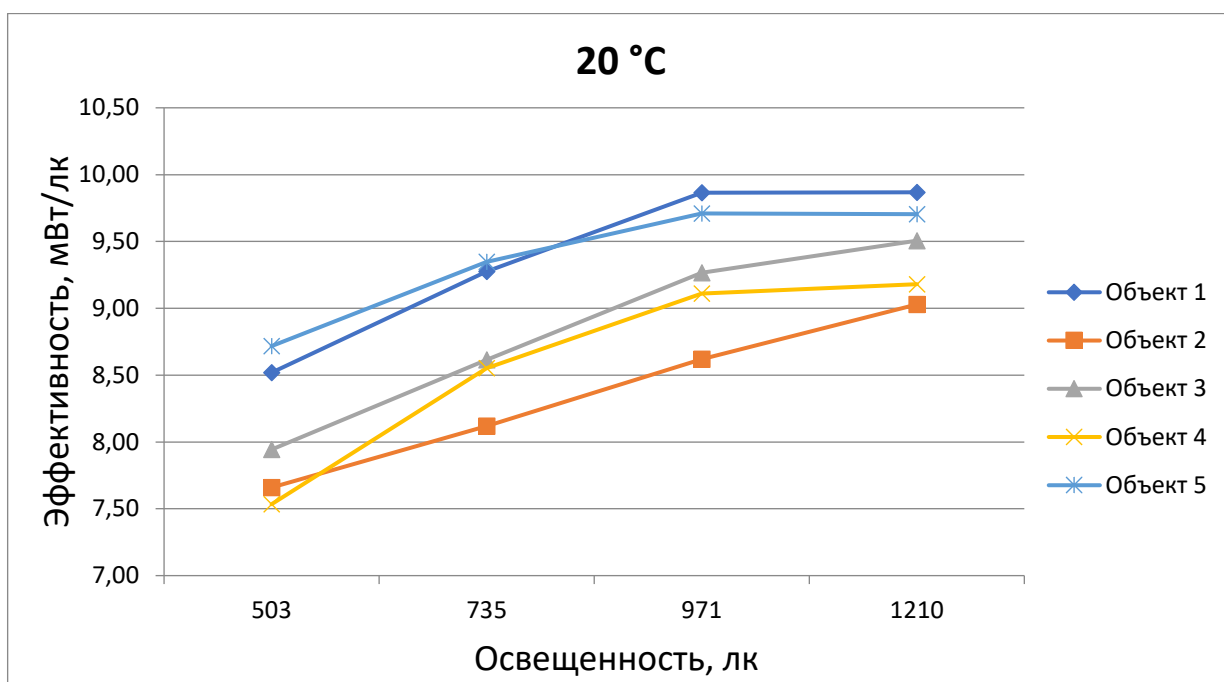


Рис. 5. Зависимость эффективности солнечного элемента от освещенности при комнатной температуре

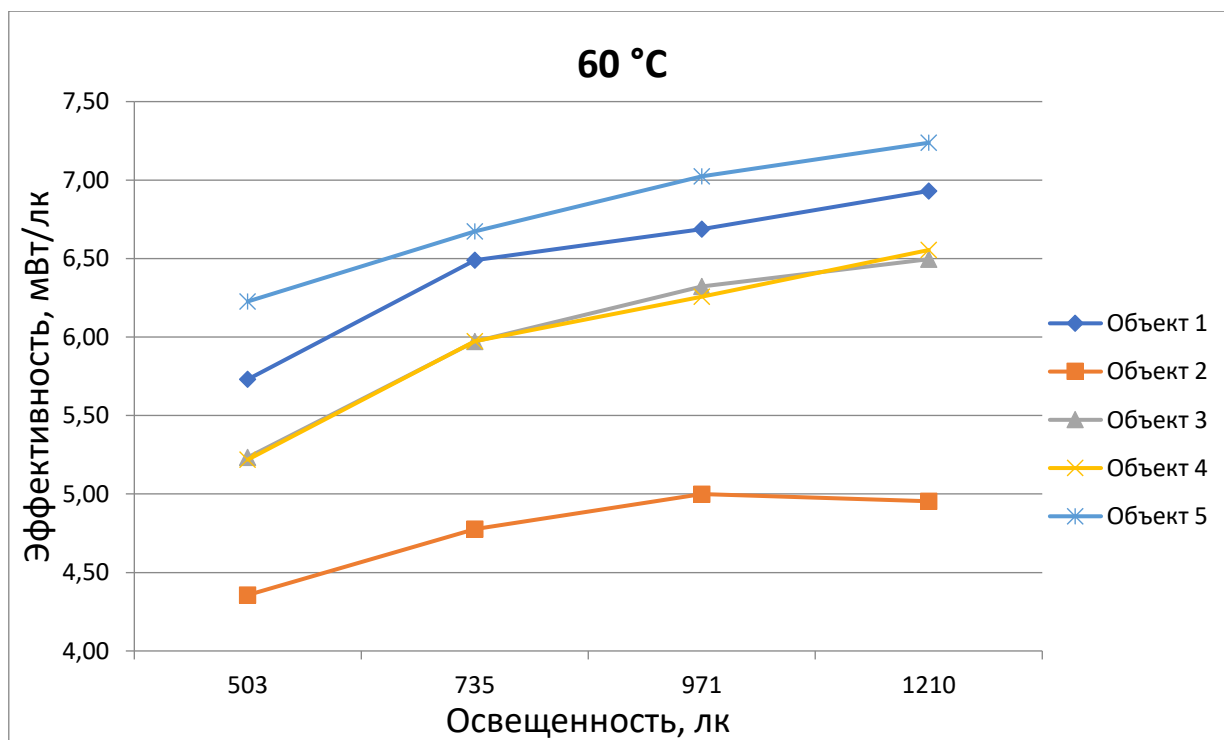


Рис. 6. Зависимость эффективности солнечного элемента от освещенности повышенной температуре

Из графиков следует, что СЭ с большим значением теплового сопротивления значительно теряет в эффективности (до 30%) при повышенной температуре по сравнению с остальными образцами, в то время как при комнатной температуре разница в эффективности не так велика и составляет около 15%. При этом эффективность дефектного элемента, в отличие от остальных, перестает расти уже при значении в 971 лк, а далее даже немного снижается. Причина этого эффекта может заключаться в дополнительном саморазогреве СЭ из-за некачественного клеевого соединения кристалла и печатной платы СЭ, о чем и свидетельствует повышенное значение теплового сопротивления «переход-плата».

Заключение

Показана возможность измерения компонент ТС СЭ модуляционным методом с погрешностью, не превышающей 3 %. Значения теплового сопротивления переход-плата СЭ имеют значительный (порядка 50 %) разброс от образца к образцу. При этом тепловое сопротивление «переход-плата» СЭ связано с его эффективностью при различных температурах. У СЭ с большим значением теплового сопротивления эффективность снижается существенно сильнее (до 30%) при повышении температуры по сравнению с остальными образцами, КПД которых снижается на 15-20 %, то время как при комнатной температуре разница в эффективности не так велика и составляет около 15%.

Таким образом, тепловое сопротивление может быть использовано в качестве диагностического параметра при проведении входного контроля при производстве солнечных батарей. Крепление СЭ на радиаторе при диагностике не обязательно, соответственно диагностика одного СЭ занимает несколько секунд.

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания №075-01133-22.

Литература

1. Sriprapha K., Yunaz I.A., Hiza S., Ahn K.H., Myong S.Y., Yamada A. Temperature Dependence of Silicon-based Thin Film Solar Cells on Their Intrinsic Absorber. *MRS Online Proceedings Library*. 2006. V.989. №2402. <https://doi.org/10.1557/PROC-0989-A24-02>
2. Solar panel comparison table [web]. *Solarquotes*. Дата обращения 23.03.2023. URL: <https://www.solarquotes.com.au/panels/comparison/compare-solar-panels/>
3. ГОСТ Р 56124.7.1-2014. *Возобновляемая энергетика. Гибридные электростанции на основе возобновляемых источников энергии, предназначенные для сельской электрификации. Рекомендации. Часть 7-1. Генераторы. Фотоэлектрические батареи*. Москва, Стандартинформ. 2015. 68 с.
4. Smirnov V.I., Sergeev V.A., Gavrikov A.A. Apparatus for Measurement of Thermal Impedance of High-Power Light-Emitting Diodes and LED Assemblies. *IEEE Transactions on Electron Device*. 2016. V.63. №6. P.2431-2435. <https://doi.org/10.1109/TED.2016.2556583>
5. ОСТ 11 0944-96. *Микросхемы интегральные и приборы полупроводниковые. Методы расчета, измерения и контроля теплового сопротивления*. Москва, ГУП НПП Пульсар. 1997. 110 с.
6. Smirnov V.I., Sergeev V.A., Gavrikov A.A., Shorin A.M. Modulation method for measuring thermal impedance components of semiconductor devices. *Microelectronics Reliability*. 2018. V.80. P.205-212. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2017.11.024>
7. Sergeev V.A., Yudin V.V. Measurement of the thermal parameters of semiconductor products using pulse-amplitude modulation of the heating power. *Measurement Techniques*. 2010. V.53. №6. P.679-685.

Для цитирования:

Гавриков А.А., Сергеев В.А., Смирнов В.И. Исследование связи тепловых и энергетических характеристик монокристаллических солнечных элементов. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2023. №5. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.5.4>