

УДК 62-1/-9

DOI: 10.30987/conferencearticle\_5c19e5fd33eaf8.94643152

А.А. Гавриков, В.И. Смирнов, В.А. Сергеев, А.М. Шорин  
(г. Ульяновск, Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова РАН)

## **ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА**

*Рассмотрены средства измерения теплового сопротивления солнечных элементов, модулей и батарей, основанные на модуляционном методе измерения теплового сопротивления полупроводниковых приборов. Описаны экспериментальная установка и программное обеспечение измерительного комплекса. Проведен анализ полученных зависимостей теплового сопротивления от частоты модуляции греющей мощности, значений компонент теплового сопротивления исследуемого объекта. Метод позволяет значительно снизить влияние нагрева исследуемого объекта в процессе измерения, тем самым повышая точность измерения теплового сопротивления.*

*Modulation method and the device for thermal impedance measuring of solar elements, modules and batteries, based on generic modulation method are described. Shown experimental measuring device and software of the measuring complex. Analysis of the dependence of thermal impedance on modulation frequency allows to determine thermal impedance components corresponding to the structural elements of the object under test. The method allows to significantly reduce the effect of heating the device's case during the measurement, and thereby increase the accuracy of thermal resistance measurement.*

*Ключевые слова: солнечная энергия, солнечные модули, тепловое сопротивление.*

*Keywords: solar power, solar modules, thermal resistance.*

Эффективность преобразования энергии солнечных модулей на основе кремния обычно составляет 12 – 28% [1]. Это означает, что более 70% поглощаемой модулем световой энергии преобразуется в тепло. С повышением температуры на 1°C номинальная мощность солнечных модулей снижается примерно на 0,4%, в результате чего уменьшение мощности модулей может достигать 15 – 25% [2]. Это предъявляет высокие требования к качеству из теплоотвода.

В работах [1, 3] измерение теплового сопротивления солнечных элементов и модулей основывалось на стандарте JESD51 1-14 [4], в котором на объект воздействуют ступенчато изменяющейся греющей мощностью и измеряют отклик на это воздействие – изменение температуры перехода

относительно начальной температуры. Данный стандарт, в частности, реализован в измерительном комплексе T3Ster производства Mentor Graphics, Ltd [5]. Поскольку в процессе измерения теплового сопротивления требуется поддерживать температуру корпуса объекта постоянной, то испытания проводились на двойных холодных пластинах, поддерживая температуру и передней и задней поверхности солнечного элемента равной 25°C. У солнечных модулей мощностью десятки и сотни ватт размеры поверхности заметно превышают размеры «холодных» плит, что делает невозможным фиксацию температуры корпуса таких объектов.

Для измерения теплового сопротивления мощных солнечных модулей, имеющих большую площадь поверхности, использовался модуляционный метод измерения [6]. В отличие от стандарта JESD51 1-14, нагрев объекта производится мощностью, модулированной по гармоническому закону. Для этого через объект пропускают последовательность импульсов греющего тока, длительность которых изменяется по гармоническому закону, так же изменяется и мощность. Температура  $p-n$  перехода после каждого греющего импульса определяется на основе измерений ТЧП в паузах между импульсами, с небольшой относительно среза импульсов временной задержкой, необходимой для завершения переходных электрических процессов.

С помощью преобразования Фурье производится вычисление спектра температуры от частоты, осуществляются его цифровая фильтрация и восстановление отфильтрованной зависимости температуры. Отношение амплитуд переменных составляющих температуры перехода и мощности определяет модуль  $Z_T(\nu)$  теплового импеданса на частоте модуляции  $\nu$ , а отношение мнимой и вещественной Фурье-трансформант – тангенс фазы  $\varphi(\nu)$  теплового импеданса.

Цель исследований - измерение компонент теплового сопротивления мощного солнечного модуля с большой площадью поверхности. Объектом исследований являлся солнечный модуль из поликристаллического кремния, состоящий из 36 поликристаллических солнечных элементов площадью 125×125 мм каждый, площадь поверхности модуля - 700×550мм, суммарная мощность - 50W, напряжение холостого хода 23.6V, ток при работе на нагрузку 2.55 A.

Для определения компонент теплового сопротивления солнечного модуля производились измерения зависимости теплового импеданса  $Z_T(\nu)$  от частоты модуляции греющей мощности  $\nu$ . На рис. 1 в верхнем графическом окне представлена частотная зависимость вещественной части  $Re Z_T(\nu)$  теплового импеданса. По оси абсцисс откладывается порядковый номер измерения, частота модуляции  $\nu$  в которых уменьшалась равномерно по логарифмической шкале частот (20 измерений на декаду).

Зависимость теплового импеданса от частоты представлена на верхнем графике, с помощью его дифференцирования можно выявить компоненты теплового сопротивления элементов конструкции солнечной батареи.

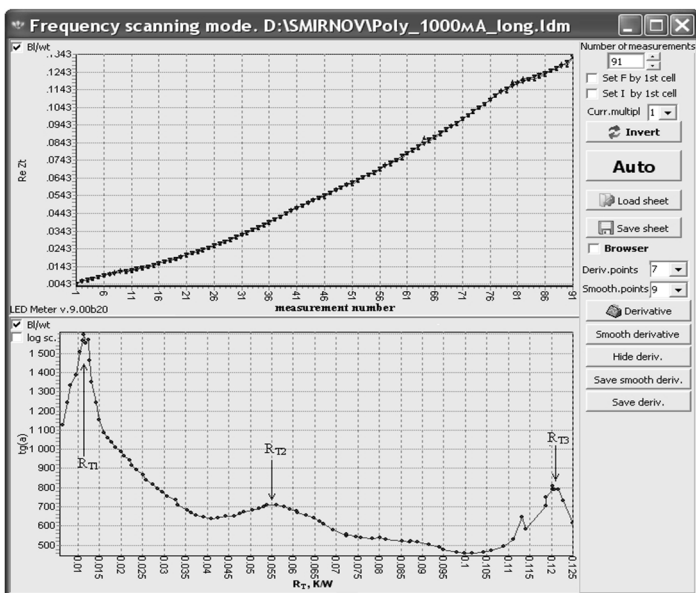


Рис.1. Результаты измерения теплового сопротивления

Для исследуемого солнечного модуля отчетливо наблюдаются три пика, соответствующие трем компонентам:  $R_{T1} = 0.0115 \text{ K/W}$ ,  $R_{T2} = 0.055 \text{ K/W}$  и  $R_{T3} = 0.121 \text{ K/W}$ . Компонента  $R_{T2}$  соответствует тепловому сопротивлению «переход-корпус» солнечного модуля и проявляется на частоте модуляции 0.5 Hz, компонента  $R_{T3}$  – тепловому сопротивлению «переход-каркас».

### Список литературы

1. B. Siegal. Solar Photovoltaic Cell thermal measurement issues // 26th Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (SEMI-THERM). 2010, pp.132-135.
2. O. Dupré, R. Vaillon, M.A. Green. Thermal Behavior of Photovoltaic Devices. Physics and Engineering. 2015.
3. S.H. Jang; M.W. Shin. Thermal Characterization of Junction in Solar Cell Packages // Electron Device Letters, IEEE, 2010, vol.31, no.7, pp.743-745.
4. JEDEC standard JESD51 1-14, „Methodology for the thermal measurement of component packages (single semiconductor device),” JEDEC Solid State Technology Association, 2005-2010.
5. T3Ster - Thermal Transient Tester - Technical information // Mentor Graphics/ <https://www.mentor.com/products/mechanical/micred/> (accessed on 01.07.2018).
6. V. Smirnov, V. Sergeev, A. Gavrikov. Apparatus for Measurement of Thermal Impedance of High-Power Light-Emitting Diodes and LED Assemblies // IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, VOL. 63, NO. 6, JUNE 2016.

Материал поступил в редколлегию 20.09.18.