

УДК 681.518.3

## ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛООВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ МОДУЛЕЙ МОДУЛЯЦИОННЫМ МЕТОДОМ

В. И. Смирнов<sup>1,2</sup>, В. А. Сергеев<sup>1,2</sup>, А. А. Гавриков<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Ульяновский государственный технический университет  
432027, Ульяновск, ул. Северный венец, 32

Статья поступила в редакцию 9 августа 2018 г.

**Аннотация.** Представлены результаты измерений теплового сопротивления солнечных модулей. Измерения осуществлялись с использованием модуляции греющей мощности по гармоническому закону и измерении отклика на это воздействие – переменной составляющей температуры *p-n*-перехода. Анализ зависимости теплового импеданса от частоты модуляции греющей мощности позволил определить компоненты теплового сопротивления, связанные с особенностями конструкции модуля. Экспериментально установлено, что амплитуда переменной составляющей температуры перехода практически не зависит от величины греющей мощности, что объясняется неоднородным распределением тока через переход и образованием локальных областей разогрева материала полупроводника. Образование локальных областей разогрева подтверждается экспериментально обнаруженной компонентой теплового сопротивления, которая обусловлена разностью температур между локальными областями разогрева и остальной частью полупроводникового материала солнечного модуля. Подтверждением образования областей локального разогрева является также сильное уменьшение теплового сопротивления модуля с увеличением величины греющего тока.

**Ключевые слова:** тепловое сопротивление, измерение, модуляционный метод, солнечный модуль, локализация тока.

**Abstract.** The paper describes the modulation method of measuring the thermal

impedance of solar cells. Subject to measurements was the 50-watt solar module from polycrystalline silica with the surface area  $700 \times 550 \text{ mm}^2$ , of idling 23.6 В and current by operation on loading 2,55 А. The measurements were performed using heating power varying harmonically and measuring a response - variable component of the junction temperature. Feature of the modulation method is the possibility of determination of the components of thermal resistance connected to construction features of the solar module. Determination of components of thermal resistance of the solar module is based on measurement and the subsequent analysis of dependence of thermal impedance on modulation frequency of the heating power. It is experimentally found out that the amplitude of the variable component of the junction temperature mostly does not depend on the value of the heating power. This is explained by «current crowding» – the nonuniform distribution of the current through the junction and the formation of local regions of heating of the semiconductor of solar module. The formation of local regions of heating is confirmed by the experimentally detected thermal resistance component, which is due to the temperature difference between local heated regions and other part of semiconductor of solar cell. Formation of local hot regions was confirmed by a sharp thermal resistance decrease with an increase of the heating current.

**Key words:** thermal resistance, measurement, modulation method, solar module, current localization.

## 1. Введение

Эффективность преобразования энергии солнечных модулей на основе кремния обычно составляет 12 – 20% [1]. Это означает, что более 70% поглощаемой модулем световой энергии преобразуется в тепло. С повышением температуры на 1 °С номинальная мощность солнечных модулей снижается примерно на 0,4%, в результате чего уменьшение мощности модулей может достигать 15 – 25% [2]. При температурах выше 100 – 125 °С они вообще могут временно потерять работоспособность, а ещё больший нагрев грозит их необратимым повреждением. К тому же повышенная температура ускоряет

деградацию солнечных модулей. Это предъявляет высокие требования к качеству из теплоотвода.

Отвод тепла от полупроводникового материала модуля, обычно представляющего собой монокристаллический или поликристаллический кремний, в окружающую среду осуществляется посредством трех механизмов: конвекции, теплового излучения и теплопроводности. Эффективность отвода тепла за счет конвекции зависит от внешних условий, в первую очередь, от температуры окружающей среды и скорости воздушного потока, в котором находится модуль. Мощность теплового излучения определяется температурой объекта излучения, т.е. полупроводниковыми кристаллами модуля. Эффективность отвода тепла за счет теплопроводности определяется конструкцией модуля и технологией его изготовления, в первую очередь, теплопроводностью подложки, на которой крепятся полупроводниковые кристаллы и качеством теплового контакта полупроводника с подложкой. Качество теплового контакта между полупроводником и подложкой характеризуется тепловым сопротивлением  $R_T$  «переход-корпус», определяемым выражением

$$R_T = \frac{T_j - T_c}{P} = \frac{\Delta T_j}{P}, \quad (1)$$

где:  $T_j$  – температура электронно-дырочного перехода;

$T_c$  – фиксированная температура корпуса модуля;

$P$  – мощность, рассеиваемая в модуле.

Чем меньше тепловое сопротивление  $R_T$  между активной областью (*p-n*-переходом) и корпусом модуля (подложкой), тем ниже температура полупроводниковых кристаллов и выше выходная мощность солнечного модуля. Несмотря на важность проведения измерений теплового сопротивления солнечных модулей, стандарты измерения теплового сопротивления солнечных модулей отсутствуют, а количество публикаций на эту тему очень мало.

В первую очередь, следует отметить работу [3], в которой было предложено рассматривать солнечный элемент как совокупность диодов,

соединенных между собой последовательно и параллельно. Это позволяет использовать для измерения теплового сопротивления солнечных модулей стандартные методы измерения [4]. Нагрев объекта в этом случае осуществляется путем пропускания импульсов тока  $I_{гр}$  в прямом направлении. Температуры перехода  $T_j$  определяется на основе измерения термочувствительного параметра (ТЧП) – прямого напряжения на переходе при протекании через него небольшого измерительного тока  $I_{изм}$ , которое связано с температурой перехода линейной зависимостью. При этом воздействие света на объект должно быть сведено к минимуму, иначе из-за генерации электрического тока в модуле могут возникнуть погрешности в результатах измерения теплового сопротивления. При этом греющий ток должен быть достаточно большим, чтобы обеспечить нагрев перехода модуля не менее, чем на  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  [3]. В противном случае точность измерений теплового сопротивления будет недостаточно высока.

В работе [5] объектом исследования были солнечные элементы с площадью поверхности около  $16\text{ см}^2$ . Величина греющего тока  $I_{гр}$  при измерении теплового сопротивления варьировалась в диапазоне от 100 до 700 мА. Было установлено, что с увеличением  $I_{гр}$  тепловое сопротивление  $R_T$  солнечных элементов уменьшается почти на порядок – от 28,5 до 3 К/Вт, причем зависимость  $R_T$  от величины греющего тока  $I_{гр}$  имеет нелинейный характер. Величина  $R_T$  резко уменьшается в диапазоне токов от 100 до 300 мА и практически не изменяется при  $I_{гр} > 300\text{ мА}$ . Объяснения этому в [5] не приведено.

Нелинейный характер зависимости теплового сопротивления  $R_T$  солнечного модуля от величины греющего тока  $I_{гр}$  подтвердили исследования, результаты которых приведены в [6]. Там же было предложено объяснение резкого уменьшения теплового сопротивления солнечных модулей с ростом величины греющего тока. Возможной причиной такой зависимости, по мнению исследователей, являются процессы локализации греющего тока, протекающего через  $p$ - $n$ -переход солнечного элемента.

## 2. Модуляционный метод измерения теплового сопротивления

В работах [5, 6] измерение теплового сопротивления солнечных элементов и солнечных 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  $T_j(t)$  относительно начальной температуры  $T_j(t=0)$ . Данный стандарт, в частности, реализован в измерительном комплексе T3Ster (Thermal Transient Tester) производства Mentor Graphics, Ltd [7]. Поскольку в процессе измерения теплового сопротивления требуется поддерживать температуру корпуса объекта постоянной, то это требует специальных мер, в частности, использования так называемых «холодных» плит. У солнечных модулей мощностью десятки и сотни ватт размеры поверхности заметно превышают размеры «холодных» плит, что делает невозможным фиксацию температуры корпуса таких объектов данным способом.

Для измерения теплового сопротивления мощных солнечных модулей, имеющих большую площадь поверхности, более предпочтительным является модуляционный метод измерения [8]. В отличие от стандарта JESD51 1-14, нагрев объекта производится мощностью, модулированной по гармоническому закону. Для этого через объект пропускают последовательность импульсов греющего тока  $I_{гр}$ , длительность  $\tau(t)$  которых изменяется по гармоническому закону:

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

где:  $\tau_{ср}$  – средняя длительность импульсов;

$a$  – коэффициент модуляции греющей мощности;

$v$  – частота модуляции.

Средняя за период следования импульсов мощность  $P(t)$  также изменяется по гармоническому закону:

$$P(t) = I_{гр} U_{гр} \frac{\tau(t)}{t_{имп}} = I_{гр} U_{гр} \frac{\tau_{ср}}{t_{имп}} (1 + a \cdot \sin 2\pi vt) = P_0 + P_1 \cdot \sin 2\pi vt,$$

где:  $U_{гр}$  – напряжение на вершине греющих импульсов;

$t_{\text{имп}}$  – период следования импульсов;

$P_0$  – постоянная составляющая греющей мощности;

$P_1$  – амплитуда переменной составляющей греющей мощности ( $P_1 < P_0$ ).

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. Измерение ТЧП начинается после непродолжительного предварительного разогрева объекта и вывода его в такой тепловой режим, при котором температура перехода будет пульсировать относительно некоторого квазистационарного значения  $T_j(t)$ , изменяющегося с частотой модуляции греющей мощности:

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

где:  $T_0$  – постоянная составляющая температуры перехода;

$T_1$  – амплитуда переменной составляющей температуры перехода на частоте модуляции;

$\varphi$  – сдвиг фаз между переменными составляющими температуры перехода и греющей мощности.

С помощью дискретного преобразования Фурье производилось вычисление спектра  $T_j(\nu)$ , осуществлялась его цифровая фильтрация и восстановление отфильтрованной зависимости  $T_j(t)$ . Пример такой обработки показан на рис. 2. Отношение амплитуд переменных составляющих температуры перехода  $T_1$  и мощности  $P_1$  определяет модуль  $Z_T(\nu)$  теплового импеданса на частоте модуляции  $\nu$ , а отношение мнимой и вещественной Фурье-трансформант – тангенс фазы  $\varphi(\nu)$  теплового импеданса.

Определение компонент теплового сопротивления в модуляционном методе производится на основе измерения частотных зависимостей модуля  $Z_T(\nu)$ , фазы  $\varphi(\nu)$  и вещественной части  $\text{Re } Z_T(\nu)$  теплового импеданса, которые имеют особенности в виде пологих участков или точек перегиба, связанные с той или иной компонентой теплового сопротивления. Выявление этих особенностей

осуществляется на основе вычисления производных указанных величин по частоте модуляции. Пример результата таких вычислений показан на рис. 3.

### 3. Объект измерения и условия экспериментов

Целью исследований было измерение компонент теплового сопротивления мощного солнечного модуля с большой площадью поверхности и определение степени влияния на результаты измерений величины греющего тока. Объектом исследований являлся солнечный модуль из поликристаллического кремния. Площадь поверхности модуля составляет  $700 \times 550 \text{ мм}^2$ , мощность равна 50 Вт, напряжение холостого хода 23,6 В, ток при работе на нагрузку 2,55 А. Модуль изготовлен по типовой конструкции: пластины поликристаллического кремния закреплены на жестком основании из стеклотекстолита FR4 и защищены со стороны рабочей поверхности прозрачной защитной пленкой, по периметру модуль охвачен металлическим каркасом.

Измерение теплового сопротивления производилось с помощью измерителя [9], в котором реализован модуляционный метод. Период следования греющих импульсов составлял 1000 мкс, длительность греющих импульсов модулировалась в диапазоне от 250 до 750 мкс, амплитуда импульсов греющего тока  $I_{гр}$  устанавливалась в диапазоне от 250 до 2500 мА. В процессе измерений модуль закрывался светонепроницаемым экраном. Специальных мер для поддержания температуры корпуса модуля постоянной не предпринималось, поскольку в модуляционном методе влияние нагрева корпуса объекта на результаты измерения его теплового сопротивления существенно снижено по сравнению со стандартным методом. Это показано на примере мощных MOSFET и IGBT транзисторов в работе [10].

Для определения температурного коэффициента напряжения  $k_T$  производились измерения зависимости прямого напряжения  $U$  на солнечном модуле от его температуры  $T$ . Результаты измерений представлены на рис. 1. Измерения производились при измерительном токе  $I_{изм} = 10 \text{ мА}$ , величина  $k_T$  получилась равной 45,8 мВ/К.

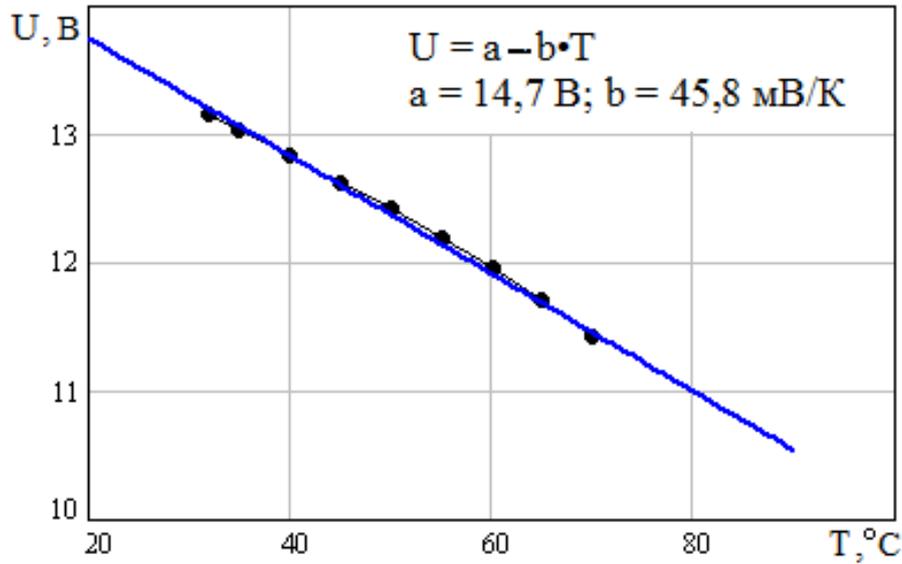


Рис. 1. Зависимость прямого напряжения на солнечном модуле от его температуры при  $I_{\text{изм}} = 10 \text{ мА}$

#### 4. Анализ результатов измерения

Результаты измерений переменной составляющей температуры  $T_j(t)$  активной области кристаллов солнечного модуля (температуры перехода), полученные при различных греющих токах  $I_{\text{гр}}$ , представлены на рис. 2. На рис. 2а показана временная зависимость длительности греющих импульсов  $\tau(t)$ , которая определяет гармоническую модуляцию греющей мощности. Частота модуляции греющей мощности устанавливалась равной 5 Гц. Зависимости  $T_j(t)$  на рис. 2б – 2г получены при амплитуде импульсов  $I_{\text{гр}}$  греющего тока 250, 1000 и 2000 мА. Представлены исходные результаты измерений  $T_j(t)$  и результаты, полученные в результате цифровой фильтрации (показаны жирной сплошной линией). Напряжения  $U_{\text{гр}}$  на вершине греющих импульсов равны, соответственно, 20,3 В; 22,3 В и 23,6 В. Несмотря на то, что рассеиваемые в объекте мощности  $P = I_{\text{гр}} U_{\text{гр}}$  существенно отличаются друг от друга (5,1 Вт; 22,3 Вт и 47,2 Вт) значения переменной составляющей температуры  $T_1$  во всех случаях примерно одинаковы (0,12; 0,15 и 0,15  $^{\circ}\text{C}$ ). Следует также отметить, что качество сигнала, определяющего температуру  $T_j(t)$  перехода, при  $I_{\text{гр}} = 250 \text{ мА}$  существенно выше, чем при более высоких значениях  $I_{\text{гр}}$ .

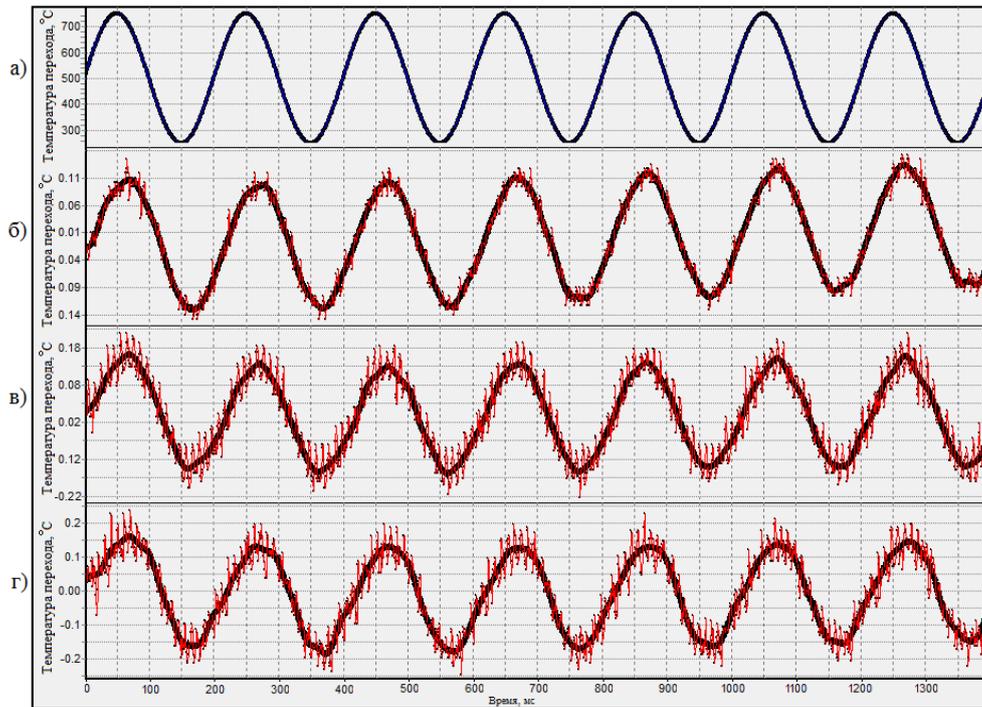


Рис. 2. Временные зависимости длительности греющих импульсов (а) и переменной составляющей температуры перехода при  $I_{гр} = 250$  мА (б),  $I_{гр} = 1000$  мА (в),  $I_{гр} = 2000$  мА (г)

Для определения компонент теплового сопротивления солнечного модуля производились измерения зависимости теплового импеданса  $Z_T(\nu)$  от частоты модуляции греющей мощности  $\nu$ . На рис. 3 в верхнем графическом окне представлена частотная зависимость вещественной части  $\text{Re } Z_T(\nu)$  теплового импеданса. По оси абсцисс откладывается порядковый номер измерения, частота модуляции  $\nu$  в которых уменьшалась равномерно по логарифмической шкале частот (20 точек на декаду). Так частота модуляции для первого измерения составляла 100 Гц для последнего (с номером 91) – 0,0032 Гц.

Для выявления особенностей в зависимости  $\text{Re } Z_T(\nu)$  было произведено ее дифференцирование по частоте  $\nu$  с последующим вычислением функции  $(d\text{Re}Z_T/d\nu)^{-1}$ , зависящей от теплового сопротивления  $R_T$ . Результат вычислений представлен в нижнем графическом окне на рис. 3. Положение пиков относительно оси  $R_T$  определяет компоненты теплового сопротивления. Для исследуемого солнечного модуля отчетливо наблюдаются три пика,

соответствующие трем компонентам:  $R_{T1} = 0,0115 \text{ К/Вт}$ ,  $R_{T2} = 0,055 \text{ К/Вт}$  и  $R_{T3} = 0,121 \text{ К/Вт}$ . Компонента  $R_{T2}$  соответствует тепловому сопротивлению «переход-корпус» солнечного модуля и проявляется на частоте модуляции 0,5 Гц, компонента  $R_{T3}$  – тепловому сопротивлению «переход-каркас» модуля и проявляется на частоте модуляции 0,01 Гц.

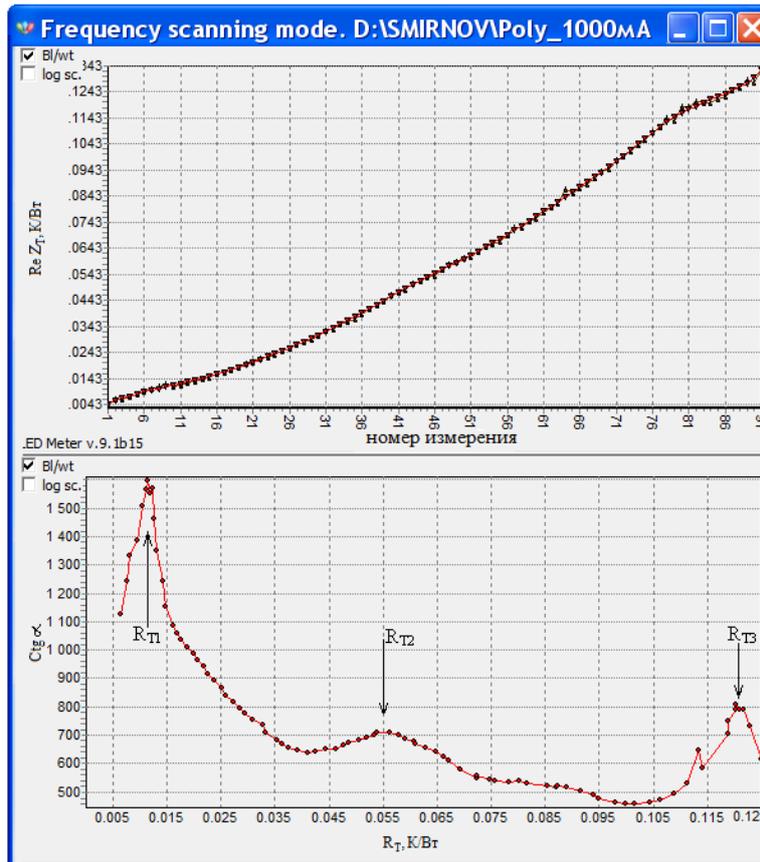


Рис. 3. Результаты измерений компонент теплового сопротивления солнечного модуля при  $I_{гр} = 1000 \text{ мА}$

Компонента  $R_{T1}$  проявляется на частоте модуляции 35 Гц. Причиной появления этой компоненты является неоднородность распределения тока через  $p$ - $n$ -переход. Из-за большой площади  $p$ - $n$ -перехода, составляющей для исследуемого модуля около  $4 \cdot 10^5 \text{ мм}^2$ , плотность тока через переход при  $I_{гр} = 1 \text{ А}$  равна всего  $2,5 \text{ мкА/мм}^2$ , а при  $I_{гр} = 0,25 \text{ А}$  она еще в 4 раза меньше. При таком малом значении плотности тока общий прямой ток через  $p$ - $n$ -

переход состоит из двух составляющих – диффузионной и рекомбинационной. Обе составляющие тока увеличиваются с ростом температуры [11]. Если в каком-то месте  $p$ - $n$ -перехода плотность тока, а вместе с ней и мощность рассеяния  $P$ , возрастает, то это приводит к локальному повышению температуры перехода  $\Delta T_j$ , что вызывает рост плотности тока и дальнейшее локальное повышение температуры. Таким образом, за счет наличия положительной тепловой обратной связи возникают процессы локализации тока и области локального разогрева, что отмечалось в работе [6].

Возникновение локальных неоднородностей тока в солнечном элементе, показанное на рис. 4, вызывает появление локальных областей разогрева  $\Delta T_j$  относительно остальной части полупроводникового материала элемента, что и характеризует компонента теплового сопротивления  $R_{T1}$ .

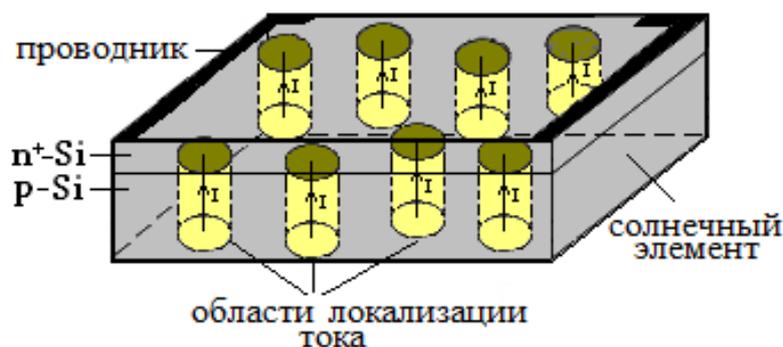


Рис. 4. Упрощенная модель солнечного элемента с неоднородным распределением тока через  $p$ - $n$ -переход

С ростом греющего тока  $I_{гр}$  области локального разогрева увеличиваются в размерах. Увеличение площади поверхности, разделяющей области локального разогрева и остальную часть полупроводникового материала должна приводить к уменьшению теплового сопротивления  $R_{T1}$ . Как следует из результатов, представленных на рис. 2, локальное увеличение температуры  $\Delta T_j$  практически остается неизменным, а рассеиваемая мощность  $P$  увеличивается с ростом  $I_{гр}$ . Следовательно, отношение  $\Delta T_j/P$ , определяющее согласно (1) тепловое сопротивление компоненты  $R_{T1}$ , с ростом  $I_{гр}$  должно уменьшаться.

Для проверки этого предположения были проведены измерения зависимостей теплового импеданса  $Z_T(\nu)$  от частоты модуляции греющей мощности  $\nu$  при разных греющих токах  $I_{гр}$ . Значения греющих токов устанавливались из диапазона 250...2500 мА с шагом 250 мА. Минимальная частота модуляции греющей мощности составляла 0,1 Гц, что позволяло измерять две компоненты теплового сопротивления –  $R_{T1}$  и  $R_{T2}$ . Результаты измерения и обработки спектральных зависимостей вещественной части  $\text{Re } Z_T(\nu)$  теплового импеданса представлены на рис. 5. Для удобства восприятия графиков все они смещены по оси ординат на постоянную величину 500 Вт/К.

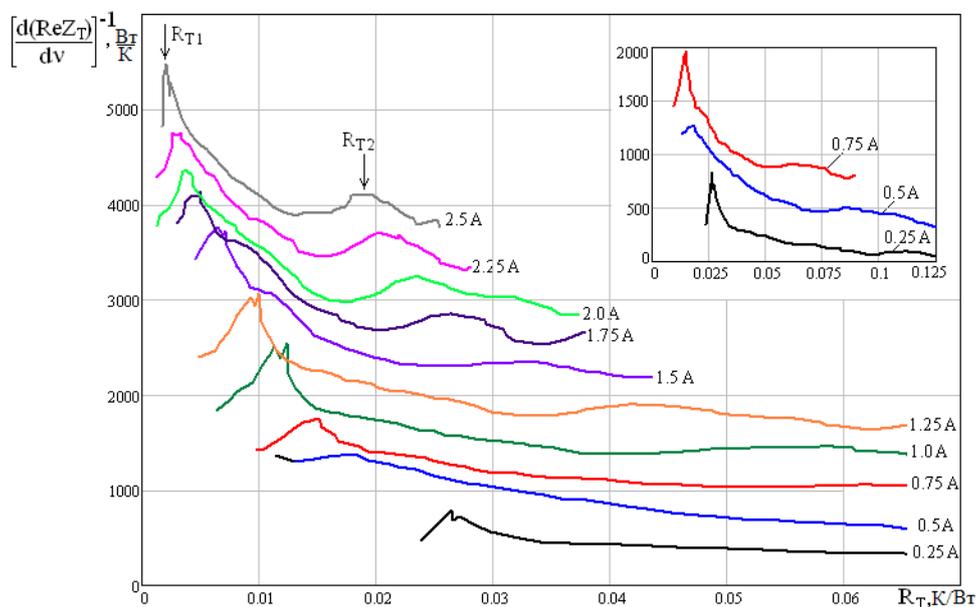


Рис. 5. Результаты измерений компонент теплового сопротивления солнечного модуля при разных значениях греющего тока  $I_{гр}$

При всех значениях греющих токов отчетливо проявляются компонента теплового сопротивления  $R_{T1}$ , значение которой с увеличением греющего тока заметно уменьшается от 0,027 К/Вт при  $I_{гр} = 250$  мА до 0,0021 К/Вт при  $I_{гр} = 2500$  мА. Компонента теплового сопротивления  $R_{T1}$  отчетливо проявляется при  $I_{гр} > 1000$  мА, при малых токах она проявляется слабо. Поэтому на вставке в более крупном масштабе показаны результаты вычислений для трех самых малых токов – 250, 500 и 750 мА.

Зависимость компонент теплового сопротивления  $R_{T1}$  и  $R_{T2}$  от греющего тока представлена на рис. 6. Видно, что для обеих компонент зависимость  $R_T(I_{гр})$  имеет нелинейный характер – резко уменьшается в области малых токов и стремится к постоянному значению при больших токах. Качественно такая закономерность подтверждается результатами, полученными в работах [4, 5]. Следует отметить, что в указанных работах измерялась только компонента теплового сопротивления «переход-корпус». При этом объекты измерения имели относительно небольшую площадь поверхности (16 и 38 см<sup>2</sup>), что существенно меньше площади модуля, исследуемого в данной работе (3800 см<sup>2</sup>). Поэтому достичь значений греющего тока  $I_{гр}$ , при которых тепловое сопротивление  $R_T$  перестает зависеть от  $I_{гр}$ , можно лишь при существенно более высоких греющих токах.

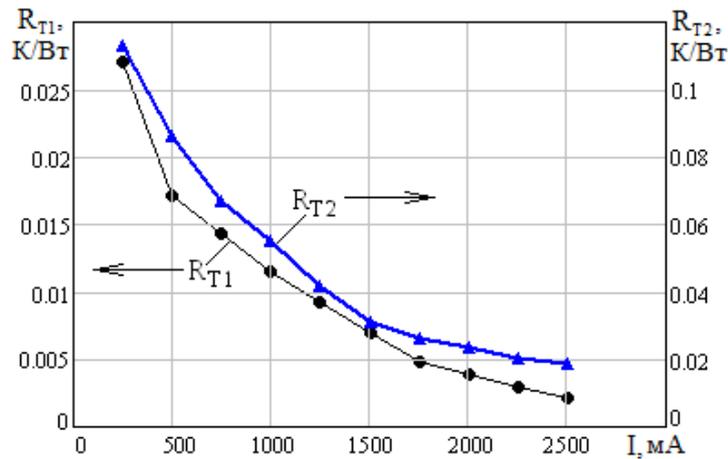


Рис. 6. Зависимость компонент теплового сопротивления  $R_{T1}$  и  $R_{T2}$  от силы греющего тока  $I_{гр}$

## 5. Заключение

Измерения теплового сопротивления солнечных модулей выявило отличительную особенность, связанную с большой площадью  $p$ - $n$ -перехода. В отличие от обычных полупроводниковых приборов типа диодов, транзисторов и тиристоров увеличение греющего тока в модулях не приводит к увеличению температуры  $p$ - $n$ -перехода. Это объясняется неоднородным распределением тока через переход и образованием локальных областей разогрева материала полупроводника. Образование локальных областей разогрева подтверждается

экспериментально обнаруженной компонентой  $R_{T1}$ , которая обусловлена разностью температур между локальными областями разогрева и остальной частью полупроводникового материала. Подтверждением образования локальных областей разогрева является и нелинейный характер зависимости компонент теплового сопротивления от величины греющего тока  $I_{гр}$ . С увеличением  $I_{гр}$  за счет увеличения размеров локального разогрева степень неоднородности распределения тока уменьшается, и тепловое сопротивление перестает зависеть от  $I_{гр}$ .

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ и Правительства Ульяновской области, номер проекта № 18-48-730018\18.

### Литература

1. Войцеховский А.В., Григорьев Д.В., Пчеляков О.П., Никифоров А.И. Эффективность преобразования солнечной энергии солнечным элементом на основе Si с квантовыми точками Ge // Прикладная физика. – 2010. – № 2. – С. 96–102.
2. Бакиров М.Я. Фотоэлектрические и радиационные характеристики кремниевых солнечных элементов при повышенных освещенностях и температурах // Физика и техника полупроводников. – 1997. – №5. – С. 520–522.
3. B. Siegal. Solar Photovoltaic Cell thermal measurement issues // 26th Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (SEMI-THERM). 21-25 Feb. 2010, DOI: 10.1109/STHERM.2010.5444302.
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. J. Zhang, Y. Gao, Y. Lu, L. Zhu, Z. Guo, G. Chen, Z. Chen. Transient Thermal Resistance Test of Single-Crystal-Silicon Solar Cell // IEEE Transactions on Electron Devices, 2012, Vol.59, No. 9, pp. 2345-2349.

6. B. Plesz, S. Ress, P.G. Szabó, G. Hantos and D. Dudola. Issues of Thermal Transient Testing on Photovoltaic Modules // 20th International Workshop on Thermal investigations of IC's and Systems Greenwich, London, 24-26 Sept. 2014, DOI: 10.1109/THERMINIC.2014.6972511.
7. T3Ster - Thermal Transient Tester - Technical information. Mentor Graphics. <https://www.mentor.com/products/mechanical/micred/>.
8. V.I. Smirnov, V.A. Sergeev, A.A. Gavrikov, A.M. Shorin. Modulation method for measuring thermal impedance components of semiconductor devices // Microelectronics Reliability, 2018, Vol.80, pp. 205–212.
9. V.I. Smirnov, V.A. Sergeev, A.A. Gavrikov. Apparatus for Measurement of Thermal Impedance of High-Power Light-Emitting Diodes and LED Assemblies // IEEE Trans. Electron Devices, 2016, Vol.63, No. 6, pp. 2431–2435.
10. Смирнов В.И., Сергеев В.А., Гавриков А.А., Шорин А.М. Измерения теплового импеданса мощных транзисторов // Радиотехника. – 2017. – № 6. – С. 83–90.
11. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Кн.1. – М.: Мир. – 1984. – 456 с.

**Для цитирования:**

В. И. Смирнов, В. А. Сергеев, А. А. Гавриков. Измерение теплового сопротивления солнечных модулей модуляционным методом. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. №8. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/aug18/14/text.pdf>  
DOI 10.30898/1684-1719.2018.8.14