

DOI 10.30898/1684-1719.2020.5.11

УДК 681.518.3

## ОСОБЕННОСТИ ТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ТЕПЛОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В ДИОДНОМ РЕЖИМЕ

В. И. Смирнов<sup>1,2</sup>, В. А. Сергеев<sup>1,2</sup>, А. А. Гавриков<sup>1</sup>, А. А. Куликов<sup>1,2</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 13 мая 2020 г.

**Аннотация.** Представлены результаты исследований и анализа особенностей токораспределения по площади солнечных элементов (СЭ) при измерении их теплового сопротивления в диодном режиме. Объектом исследований являлся СЭ из монокристаллического кремния размерами  $52 \times 52$  мм<sup>2</sup>. Измерение теплового сопротивления СЭ, закрепленного с помощью термопасты на массивном алюминиевом радиаторе, осуществлялось модуляционным методом с использованием широтно-импульсной модуляции греющей мощности. Метод позволяет по зависимости теплового импеданса от частоты модуляции греющей мощности определять компоненты теплового сопротивления, связанные с особенностями конструкции и распространения теплового потока в контролируемом объекте. Экспериментально обнаружена дополнительная компонента теплового сопротивления, обусловленная тепловым потоком между более нагретыми локальными областями и остальной менее разогретой частью структуры СЭ. Косвенным подтверждением образования областей локального разогрева является сильное уменьшение теплового сопротивления элемента с ростом амплитуды греющего тока. Неоднородность распределения температуры по поверхности солнечного элемента подтверждена измерениями теплового излучения объекта с помощью ИК-микроскопа.

**Ключевые слова:** солнечный элемент, тепловое сопротивление, измерение, модуляционный метод, токораспределение, локальный разогрев.

**Abstract.** Results of investigations and analysis of features of current distribution over area of solar cells (SC) when measuring their thermal resistance in diode mode are presented. The object of the research was SC from monocrystal silicon with dimensions of  $52 \times 52 \text{ mm}^2$ . Measurement of thermal resistance of SE fixed by means of thermopaste on massive aluminum radiator was carried out by modulation method using pulse-width modulation of heating power. The method makes it possible to determine components of thermal resistance related to features of design and propagation of heat flux in the controlled object by dependence of thermal impedance on frequency of heating power modulation. An additional component of thermal resistance was experimentally detected due to the thermal flux between the more heated local regions and the rest of the less heated part of the SC structure. Indirect confirmation of formation of local heating areas is a strong decrease of element thermal resistance with increase of heating current amplitude. Non-uniformity of temperature distribution on the surface of the SC is confirmed by measurements of thermal radiation of the object using an IR microscope.

**Key words:** solar cell, thermal resistance, measurement, modulation method, current distribution, local heating.

## **Введение**

В солнечных батареях (СБ) большая часть поглощенной световой энергии преобразуется в тепло, что может вызвать повышение температуры их активной области относительно окружающей среды на несколько десятков градусов. Как следствие, это приводит к снижению эффективности преобразования световой энергии в электрическую. С повышением температуры на  $1^\circ\text{C}$  номинальная мощность СБ снижается примерно на  $0,4\%$ , и общее уменьшение мощности может достигать  $15 - 25\%$  [1]. Кроме этого, повышение температуры ускоряет процессы деградации СБ и снижает их срок службы. Эти обстоятельства повышают требования к отводу тепла от активной области СБ в окружающую среду. Качество теплоотвода любого полупроводникового прибора, включая

солнечные элементы (СЭ) и СБ, характеризуется тепловым сопротивлением  $R_{Tjc}$  «переход-корпус», определяемым выражением:

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

где  $T_j$  – температура  $p$ - $n$  перехода объекта измерения;  $T_c$  – фиксированная температура корпуса объекта;  $P$  – мощность, рассеиваемая в объекте.

Несмотря на важность контроля теплового сопротивления таких объектов, как СЭ и СБ, стандарты измерения их теплового сопротивления отсутствуют, а количество публикаций на эту тему очень мало [1–5]. В работе [1] предложено рассматривать СЭ как совокупность последовательно и параллельно соединенных диодов. Это позволяет использовать для измерения теплового сопротивления существующие стандарты [6, 7], основанные на пропускании через диоды импульсов прямого тока и измерении изменений температуры  $p$ - $n$ -перехода  $\Delta T_j$ , вызванных рассеиванием в нем греющей мощности  $P$ . Температура  $p$ - $n$ -перехода определяется косвенным способом путем измерения температурочувствительного параметра (ТЧП), линейно зависящего от температуры. В качестве ТЧП обычно используют падение напряжения на  $p$ - $n$ -переходе при протекании через него постоянного измерительного тока. Для исключения влияния на результаты измерения фототока, возникающего при облучении СЭ светом, требуется полностью экранировать поверхность СЭ. Согласно стандартам, при измерения теплового сопротивления необходимо поддерживать температуру корпуса объекта постоянной. Обычно для этого используют так называемые «холодные» плиты, выполненные из меди с проточным жидким охлаждением [8]. Для СБ большой мощности это представляет проблему, поскольку размеры большинства СБ существенно превышают размеры «холодных» плит.

Решить эту проблему позволяет модуляционный метод измерения теплового сопротивления [9], основанный на пропускании через объект импульсов греющего тока, длительность которых изменяется по гармоническому закону (ШИМ-модуляция), что вызывает модуляцию рассеиваемой в объекте

мощности. В результате температура  $p$ - $n$ -перехода объекта также будет изменяться по гармоническому закону, но со сдвигом фазы относительно мощности. Измерив амплитуды переменных составляющих греющей мощности и температуры  $p$ - $n$ -перехода, можно определить вещественную и мнимую составляющие теплового импеданса контролируемого объекта измерения.

Наличие большой площади поверхности СБ и СЭ создает еще одну проблему, которая не проявляется для обычных полупроводниковых приборов с небольшой площадью кристалла. В отличие от полупроводниковых диодов и транзисторов, тепловое сопротивление СЭ сильно зависит от силы греющего тока  $I_{гр}$ . Авторы работы [2] показали, что с увеличением  $I_{гр}$  тепловое сопротивление  $R_T$  СЭ уменьшается в несколько раз, причем значение  $R_T$  сильно уменьшается в диапазоне токов от 100 до 300 мА и практически не изменяется при  $I_{гр} > 300$  мА. Объяснения этого эффекта в [2] не приведено.

Аналогичные результаты были получены авторами работы [3], которые объясняют уменьшение теплового сопротивления СЭ с ростом силы греющего тока в диапазоне малых токов локализацией тока в отдельных областях структуры СЭ. При малых значениях прямого тока, протекающего через  $p$ - $n$ -переход СЭ, плотность этого тока из-за электрофизических неоднородностей структуры СЭ распределяется по поверхности СЭ неоднородно, вызывая нагрев только в некоторых локальных областях структуры СЭ. При увеличении тока все больше областей  $p$ - $n$ -перехода СЭ достигают напряжения прямого открытия и начинают рассеивать мощность; площадь этих областей нагрева увеличивается суперлинейно с увеличением тока, что приводит к уменьшению теплового сопротивления. Экспериментальное подтверждение этому было получено также в исследованиях теплофизических свойств 50-ваттных СБ [5].

Задачей исследований, результаты которых представлены в настоящей работе, было экспериментальное подтверждение и оценка эффекта локализации прямого тока  $p$ - $n$ -перехода СЭ и неоднородного распределения температуры по поверхности СЭ при измерении теплового сопротивления в диодном режиме.

## 1. Аппаратно-программный комплекс для измерения теплового сопротивления

Измерения теплового сопротивления СЭ производились с помощью аппаратно-программного комплекса, описанного в [10]. Функциональная схема комплекса представлена на рис. 1. В состав комплекса входит измеритель теплового сопротивления, компьютер и программное обеспечение.

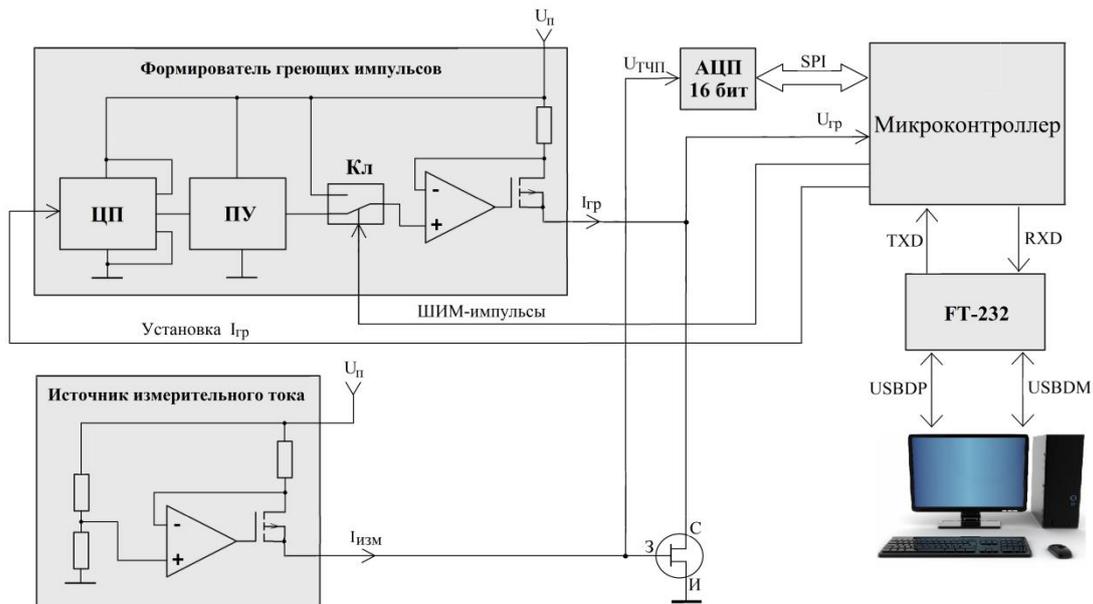


Рис. 1. Функциональная схема аппаратно-программного комплекса: ЦП – цифровой потенциометр, ПУ – преобразователь уровней, КЛ – переключатель, FT-232 – конвертор интерфейса RS-232 в USB.

Работой измерителя теплового сопротивления управляет микроконтроллер (МК), который решает следующие задачи:

- формирует ШИМ-импульсы гребящего тока;
- измеряет напряжение на объекте во время прохождения импульсов для определения величины рассеиваемой в объекте мощности;
- измеряет напряжение на объекте в паузах между импульсами для определения температуры  $p-n$ -перехода;
- принимает из компьютера данные о параметрах измерения и передает в компьютер результаты измерений;
- контролирует возникновение нештатных ситуаций и передает в компьютер коды для их идентификации.

Формирователь импульсов греющего тока  $I_{cp}$  реализован по известной схеме на основе операционного усилителя, в обратную цепь которого включен полевой транзистор [11]. С помощью электронного переключателя Кл реализуется ШИМ-модуляция греющего тока  $I_{cp}$ . Амплитуда импульсов устанавливается с помощью цифрового потенциометра ЦП, управляемого МК, и преобразователя уровней ПУ. По аналогичной схеме реализован и источник измерительного тока  $I_{изм}$ , но значение  $I_{изм}$  фиксировано.

Преобразование измеряемого напряжения в цифровой код, поступающий в МК, осуществляет 16-разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Передача цифрового кода с выхода АЦП в МК производится с помощью скоростного последовательного интерфейса SPI. Все результаты измерений записываются в оперативную память МК и по окончании измерения пересылаются в компьютер для последующей обработки. Взаимодействие МК с компьютером осуществляется посредством USB-интерфейса, для реализации которого используется конвертор «RS-USB» на основе микросхемы FT-232.

Комплекс реализует модуляционный метод измерения теплового сопротивления. Через СЭ пропускают импульсы греющего тока, амплитуда  $I_{cp}$  и период следования  $T_p$  которых постоянны, а длительность  $\tau_p$  изменяется по гармоническому закону:

$$\tau_p = \tau_{p\_cp} (1 + a \cdot \sin 2\pi vt),$$

где  $\tau_{p\_cp}$  – средняя длительность импульсов греющего тока;  $a$ ,  $v$  – коэффициент модуляции и частота модуляции греющей мощности, соответственно;  $t$  – время.

Среднее за период значение греющей мощности  $\bar{P}(t)$  будет изменяться, также как длительность импульсов греющего тока, по гармоническому закону:

$$\bar{P}(t) = I_{cp} U_{cp} \frac{\tau_p}{T_p} = P_{cp} (1 + a \cdot \sin 2\pi vt) = P_{cp} + P_1 \cdot \sin 2\pi vt,$$

где  $P_{cp} = I_{cp} \cdot U_{cp} \frac{\tau_{p\_cp}}{T_p}$  – среднее значение греющей мощности;  $U_{cp}$  – напряжение на СЭ во время прохождения импульса греющего тока;  $P_1 = a \cdot P_{cp}$  – амплитуда переменной составляющей греющей мощности.

Модуляция греющей мощности вызывает соответствующее изменение температуры  $T_j$   $p$ - $n$  перехода СЭ, но со сдвигом фазы относительно мощности. Температура  $T_j$  определяется в паузах между греющими импульсами на основе измерения  $U_{TЧП}$  – напряжения на  $p$ - $n$ -переходе при малом измерительном токе. Путем быстрого преобразования Фурье вычисляется спектр температуры перехода  $T_j(\nu)$ , осуществляется его цифровая фильтрация и восстановление отфильтрованной зависимости  $T_j(t)$ . Фильтрация осуществлялась в частной области с помощью низкочастотного фильтра, верхняя граница которого определялась частотой основной гармоники. Отношение амплитуд переменных составляющих температуры  $T_{j1}$  перехода и греющей мощности  $P_1$  определяет модуль теплового импеданса  $Z_T$ , а отношение мнимой  $Im T_{j1}$  и вещественной  $Re T_{j1}$  Фурье-трансформант переменной составляющей температуры  $T_j(t)$  на частоте модуляции  $\nu$  определяет тангенс фазы  $\varphi$  теплового импеданса:

$$Z_T(\nu) = \frac{T_{j1}}{P_1}, \quad \varphi(\nu) = \arctg \frac{Im T_{j1}}{Re T_{j1}}.$$

Программное обеспечение, разработанное для аппаратно-программного комплекса, решает следующие задачи:

- формирование и передачу в измеритель информационного пакета данных с параметрами измерения (амплитуда и период следования импульсов греющего тока, частота модуляции и ряд других параметров, определяющих режимы измерения);

- вычисление модуля и фазы теплового импеданса и их зависимостей от частоты модуляции греющей мощности, что позволяет определять компоненты теплового сопротивления;

- отображение результатов измерения и их обработки в текстовом и графическом виде, навигацию по базе данных и ряд других сервисных функций.

## 2. Результаты измерения теплового сопротивления

Объектами исследований являлись СЭ из монокристаллического кремния с площадью поверхности  $52 \times 52 \text{ мм}^2$ , закрепленные с помощью термопасты на алюминиевом радиаторе. Амплитуда импульсов греющего тока  $I_{gp}$  выбиралась в диапазоне от 0,125 до 2,0 А, период следования импульсов составлял 400 мкс,

частота модуляции изменялась в диапазоне от 0.01 до 700 Гц. Экспериментально определенное значение температурного коэффициента напряжения на  $p-n$ -переходе при  $I_{изм} = 5$  мА составляло 2,57 мВ/К. В процессе измерений СЭ закрывался светонепроницаемым экраном.

На рис. 2 представлены осциллограммы температуры перехода СЭ, измеренные на частоте модуляции греющей мощности 10 Гц при различной амплитуде импульсов греющего тока  $I_{гр}$ . Жирными линиями на рисунке показаны осциллограммы, полученные в результате цифровой фильтрации. Напряжения на объекте  $U_{гр}$  во время протекания через него импульсов тока амплитудой 0,5 и 1,0 А равны соответственно 0,63 и 0,68 В. Несмотря на то, что рассеиваемые в объекте мощности  $P = I_{гр} \cdot U_{гр}$  при греющих токах 0,5 и 1,0 А различаются более чем в два раза (0,32 и 0,68 Вт), значения амплитуды переменной составляющей температуры различаются существенно меньше: 0,49 и 0,66 °С. Это указывает на нелинейный характер зависимости теплового сопротивления от амплитуды импульсов греющего тока.

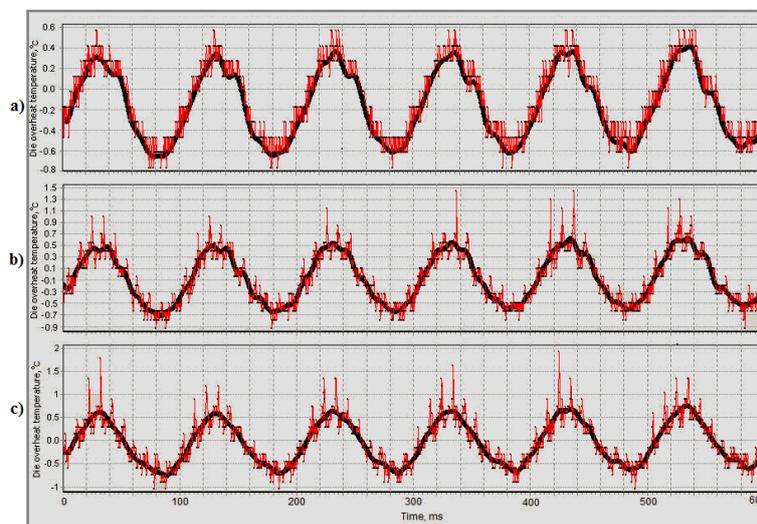


Рис. 2. Осциллограммы температуры перехода СЭ при различной амплитуде импульсов греющего тока: а)  $I_{гр} = 0,5$  А; б)  $I_{гр} = 0,75$  А; в)  $I_{гр} = 1,0$  А.

Модуляционный метод позволяет определять компоненты теплового сопротивления, связанные с особенностями конструкции объекта измерения, по которым распространяется тепловой поток. Это осуществляется на основе анализа частотных зависимостей теплового импеданса  $Z_T(\nu)$ , которые имеют особенности

в виде пологих участков или точек перегиба, связанные с той или иной компонентой теплового сопротивления. Методика такого анализа подробно описана в работе [9]. Она включает процедуры сглаживания зависимости вещественной части теплового импеданса  $Re Z_T(\nu)$  методом «скользящего среднего», вычисления производной  $dRe Z_T/d\nu$  и построения зависимости  $(dRe Z_T/d\nu)^{-1}$  от теплового сопротивления  $R_T$ . Результат такого анализа представлен на рис. 3. В верхнем окне показана частотная зависимость  $Re Z_T(\nu)$ . По оси абсцисс откладывается порядковый номер измерений, частота модуляции  $\nu$  в которых уменьшалась равномерно по логарифмической шкале частот (20 измерений на декаду). Справа от графиков в таблице приведены значения частоты  $\nu$  модуляции для каждого номера измерений.

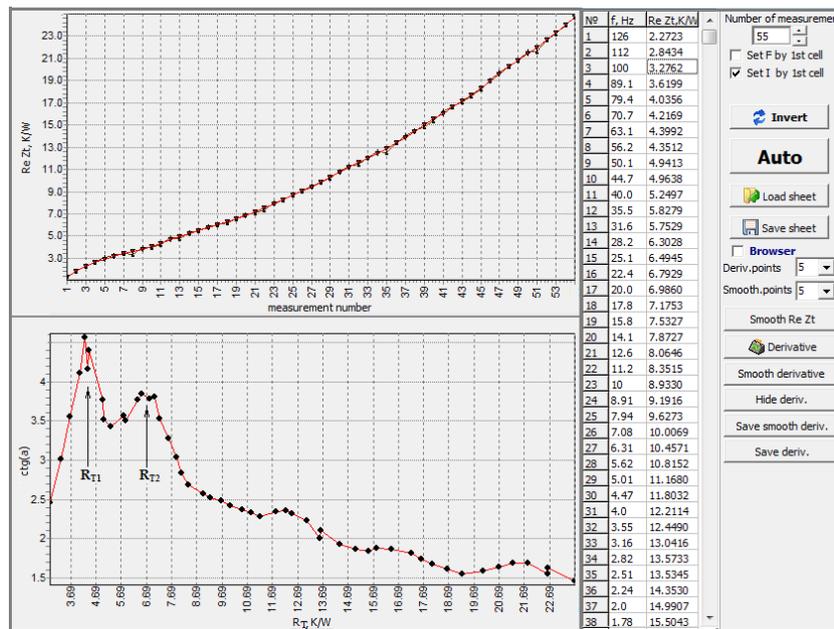


Рис. 3. Результаты измерения компонент теплового сопротивления СЭ при  $I_{cp} = 300$  мА.

В нижнем окне показан результат обработки зависимости  $Re Z_T(\nu)$ . Компоненты теплового сопротивления проявляются в виде максимумов, положение которых на оси абсцисс определяется значением компонент теплового сопротивления. Для исследуемого СЭ на графике четко проявляется две компоненты  $R_{T1} = 9,7$  К/Вт и  $R_{T2} = 14,1$  К/Вт. Компонента  $R_{T2}$  представляет собой тепловое сопротивление «переход-радиатор».

Компонента теплового сопротивления  $R_{T1}$  связана с локализацией тока и образованием в СЭ областей локального перегрева. Плотность прямого тока, протекающего через СЭ, из-за большой площади  $p-n$ -перехода мала и может достигать значений менее  $100 \text{ мкА/мм}^2$ . Неоднородность структуры или дефект в области перехода, например дислокация, приводит к локальному повышению плотности тока, что вызывает локальное повышение температуры. Локальное повышение температуры, в свою очередь, вызывает увеличение тока через эту область, таким образом, положительная тепловая обратная связь приводит к увеличению неоднородности токораспределения по площади  $p-n$ -перехода СЭ. При этом области локализации тока имеют существенно более высокую температуру, чем средняя температура структуры СЭ. Между локально разогретой областью и остальной частью структуры СЭ возникают латеральные потоки тепла. Граница между локально разогретой областью и остальной частью структуры СЭ и характеризуется компонентой  $R_{T1}$  теплового сопротивления СЭ. Наличие такой компоненты подтверждают результаты, полученные при исследованиях 50-ваттных СБ [5].

Косвенным подтверждением процесса локализации тока в СЭ является уменьшение теплового сопротивления  $R_T$  с увеличением амплитуды греющего тока  $I_{гр}$ . Результаты измерения токовой зависимости компонент теплового сопротивления  $R_{T1}$  и  $R_{T2}$  от  $I_{гр}$  представлены на рис. 4.

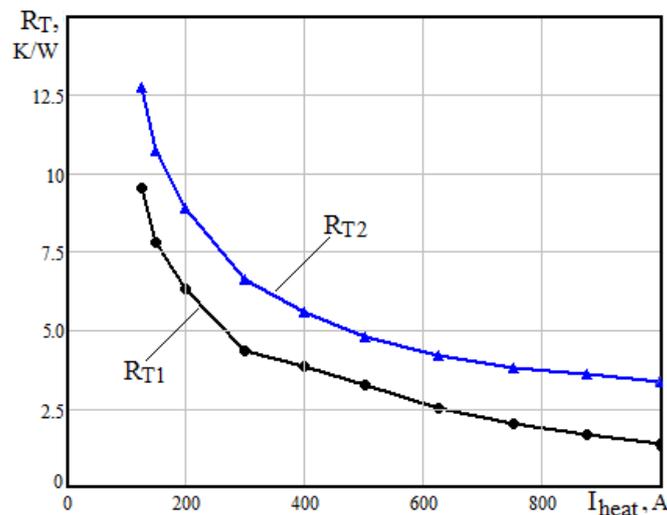


Рис. 4. Зависимость компонент теплового сопротивления  $R_{T1}$  и  $R_{T2}$  от амплитуды греющего тока  $I_{гр}$ .

При малых значениях греющего тока ( $I_{гр} < 300$  мА) значения  $R_T$  круто уменьшаются, при  $I_{гр} > 300$  мА зависимость  $R_T$  от  $I_{гр}$  становится более пологой. Это подтверждают и результаты исследований, представленных в [3, 5].

### 3. Измерение температурных полей с использованием ИК-микроскопа

Для исследования процесса локализации тока и неоднородного распределения температуры по поверхности СЭ были проведены измерения их температурных полей с помощью тепловизионной камеры Optotherm InfraSight MI320. Нагрев СЭ производился постоянным прямым током силой 0,5; 1,0; 1,5 и 2,0 А. При каждом значении греющего тока производилась видеосъемка температурных полей поверхности СЭ от начала процесса нагрева до достижения квазистационарного состояния. На рис. 5 представлены результаты измерения через 3 с, 6 с, 9 с и 12 с после начала нагрева током 2,0 А.

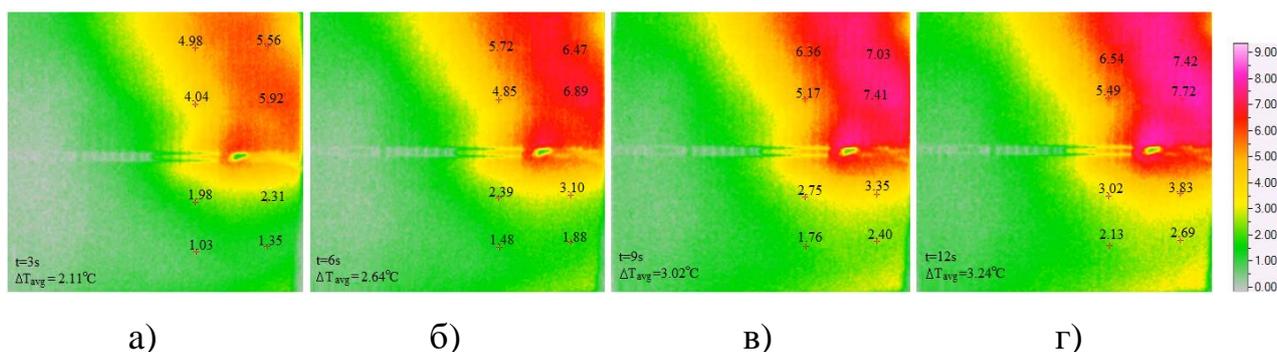


Рис. 5. Температурные поля поверхности СЭ при  $I_{гр} = 2,0$  А в различные моменты времени:  
а) через 3 с; б) через 6 с; в) через 9 с; г) через 12 с.

В нескольких наиболее сильно нагретых точках поверхности приведены значения температуры перегрева, в левом нижнем углу – значение температуры перегрева, усредненное по всей поверхности СЭ. Видно, что поверхность нагрета существенно неоднородно, различие в температуре наиболее нагретых участков и остальной частью поверхности СЭ превышает 5 °С. При этом характер распределения температуры по поверхности СЭ в процессе нагрева сохраняется.

На рис. 6 представлены временные зависимости температуры перегрева  $\Delta T_{cp}(t)$ , усредненной по поверхности СЭ, при разных амплитудах греющего тока.

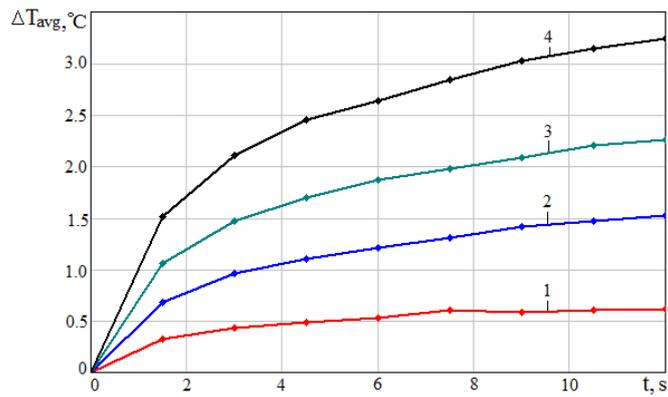


Рис. 6. Временные зависимости средней температуры  $\Delta T_{cp}(t)$  перегрева поверхности СЭ:

1)  $I_{cp} = 0,5$  А; 2)  $I_{cp} = 1,0$  А; 3)  $I_{cp} = 1,5$  А; 4)  $I_{cp} = 2,0$  А.

Характер зависимости  $\Delta T_{cp}(t)$  указывает на наличие квазистационарного теплового состояния СЭ с медленным ростом  $\Delta T_{cp}(t)$ , при достижении которого неоднородность распределения температуры по поверхности СЭ сохраняется.

### Заключение

Проведенные исследования показали, что при измерении теплового сопротивления СЭ в диодном режиме наблюдается эффект локализации греющего тока, протекающего через  $p$ - $n$ -переход СЭ. На это указывает появление дополнительной компоненты теплового сопротивления между локально разогретой областью и остальной частью структуры СЭ. Этот эффект подтверждается также уменьшением компонент теплового сопротивления СЭ с увеличением амплитуды импульсов греющего тока. Неоднородное распределение температуры по поверхности СЭ наблюдалось при прямых измерениях температурных полей, проведенных тепловизионной камерой Optotherm InfraSight MI320. При этом неоднородность распределения температуры возникает на начальной стадии нагрева и сохраняется при достижении стационарного теплового состояния СЭ.

Работа выполнена в рамках государственного задания при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Ульяновской области (проект № 18-48-730018).

## Литература

1. Siegal B. Solar Photovoltaic Cell thermal measurement issues // 26th Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (SEMI-THERM). – 2010. – P. 132–135. DOI: [10.1109/STHERM.2010.5444302](https://doi.org/10.1109/STHERM.2010.5444302)
2. Zhang J. et al. Transient Thermal Resistance Test of Single-Crystal-Silicon Solar Cell // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2012. – № 9. – pp. 2345–2349.
3. Plesz B., Ress S., Szabó P.G., Hantos G., Dudola D. Issues of Thermal Transient Testing on Photovoltaic Modules // 20th International Workshop Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC). – 2014.
4. Górecki K., Krac E. Measurements of thermal parameters of solar modules // Journal of Physics: Conf. Ser. – 2016. Vol. 709. P. 012007.
5. Smirnov V., Sergeev V., Gavrikov A. Specificity of measuring thermal resistance in solar cells // IEEE Journal of Photovoltaics. – 2019 – № 3 – P. 775–779.
6. Methodology for the Thermal Measurement of Component Packages (Single Semiconductor Device), JEDEC Standard JESD51 1-14, JEDEC Solid State Technology Association, 2005-2010.
7. Test Methods for Semiconductor Devices. MIL–STD–750–3, Department of Defense, USA. January 2012 [online]. Available at [https://www.navsea.navy.mil/Portals/103/Documents/NSWC\\_Crane/SD-18/Test%20Methods/MILSTD750.pdf](https://www.navsea.navy.mil/Portals/103/Documents/NSWC_Crane/SD-18/Test%20Methods/MILSTD750.pdf)
8. Cold Plates. Lytron Total Thermal Solutions, 2018. Accessed: Jan. 4, 2018. [online]. Available: <http://www.lytron.com/Cold-Plates>.
9. Smirnov V., Sergeev V., Gavrikov A., Shorin A. Modulation method for measuring thermal impedance components of semiconductor devices // Microelectronics Reliability. – 2018. – Vol. 80. – P. 205–212.
10. Smirnov V., Sergeev V., Gavrikov A. Apparatus for measurement of thermal impedance of high-power light-emitting diodes and LED assemblies // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2016. – Vol. 63. – № 6. – P. 2431–2435.
11. Horowitz P., Hill W. The Art of Electronics // Cambridge University Press, 2015.

**Для цитирования:**

Смирнов В.И., Сергеев В.А., Гавриков А.А., Куликов АА. Особенности токораспределения в солнечных элементах при измерении. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №5. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/may20/11/text.pdf>. DOI 10.30898/1684-1719.2020.5.11