

УДК 621.382.017

В.И. Смирнов, В.А. Сергеев, А.А. Гавриков

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛООВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ¹

Смирнов Виталий Иванович, доктор технических наук, профессор, окончил Горьковский государственный университет им. Н.И. Лобачевского по специальности «Физика». Профессор кафедры «Проектирование и технология электронных средств» Ульяновского государственного технического университета. Имеет статьи, монографии, изобретения в области автоматизации средств измерений. [e-mail: smirnov-vi@mail.ru].

Сергеев Вячеслав Андреевич, доктор технических наук, профессор, окончил физический факультет Горьковского государственного университета им. Н.И. Лобачевского. Директор Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, заведующий базовой кафедрой «Радиотехника, опто- и наноэлектроника» УлГТУ. Имеет монографии, статьи и изобретения в области исследования характеристик полупроводниковых приборов и интегральных схем, измерения их тепловых параметров. [e-mail: sva@ulstu.ru].

Гавриков Андрей Анатольевич, кандидат технических наук, окончил УлГТУ по специальности «Проектирование и технология электронных средств». Старший научный сотрудник Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН. Имеет статьи, изобретения в области измерений теплофизических параметров полупроводниковых приборов. [e-mail: a.gavrikoff@gmail.com].

Аннотация

Приведено описание аппаратно-программного комплекса для измерения теплового сопротивления солнечных батарей. В основу работы комплекса положен модуляционный метод измерения, использующий модуляцию греющей мощности по гармоническому закону. Данный метод позволяет определять компоненты теплового сопротивления, связанные с особенностями конструкции объекта измерения. Для решения этой задачи разработана методика обработки экспериментальной зависимости теплового импеданса от частоты модуляции греющей мощности.

Комплекс обеспечивает диапазон измерения теплового сопротивления от 0,01 до 100 К/Вт, погрешность измерения составляет 5 %, диапазон греющих токов – от 0,25 до 4 А, диапазон частоты модуляции греющей мощности – от 0,01 до 1000 Гц.

Исследования теплофизических процессов солнечных батарей, проведенные с помощью комплекса, показали, что тепловое сопротивление таких объектов нелинейно зависит от величины греющего тока. Это объясняется процессами локализации тока в области-перехода солнечной батареи, обусловленными наличием положительной тепловой обратной связи.

Ключевые слова: тепловое сопротивление, модуляционный метод, солнечная батарея, локализация тока.

APPARATUS FOR MEASUREMENT OF THERMAL IMPEDANCE OF SOLAR BATTERIES

Vitalii Ivanovich Smirnov, Doctor of Science in Engineering, Professor; graduated from Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod with the specialty in Physics; Professor of the Department of Design and Technology of Electronic Instrumentation at Ulyanovsk State Technical University; an author of articles, monographs, inventions in the field of measurement instrument automation. e-mail: smirnov-vi@mail.ru.

Viacheslav Andreevich Sergeev, Doctor of Science in Engineering, Professor; graduated from the Faculty of Physics of Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod; Director of the Ulyanovsk Branch of the Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences; Head of the Basic Department of

¹ Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ и Правительства Ульяновской области, проект № 18-48-730018.

Radioengineering, Opto- and Nanoelectronics of Ulyanovsk State Technical University; an author of monographs, papers, and inventions in the field of the modeling and researching semiconductor devices and integrated circuits parameters and the measurements of its thermal characteristics. e-mail: e-mail: sva@ulstu.ru.

Andrei Anatolievich Gavrikov, Candidate of Science in Engineering; graduated from Ulyanovsk State Technical University with the specialty in Design and Technology of Electronic Instrumentation; Senior Staff Scientist at the Ulyanovsk Branch of the Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences; an author of articles and inventions in the field of measurement of thermal and physical parameters of semiconductor devices. e-mail: a.gavrikoff@gmail.com.

Abstract

This paper describes apparatus for measuring the thermal impedance of solar batteries. A modulation method that uses the harmonic heating power modulation is a base of the apparatus operation. This method allows to determine the thermal resistance components corresponding to the structural elements of a solar battery. To solve the problem, the post processing method for thermal impedance dependence on modulation frequency was developed.

Apparatus provides a measurement range of thermal resistance from 0.01 to 100 K/W, the measurement error is 5%, the range of heating currents is from 0.25 up to 4 A, the range of heating power modulation frequency is 0.01 up to 1000 Hz. Research of thermal physical processes in solar batteries performed by the apparatus shows that thermal resistance dependence on heating current is non-linear. This is explained by the non-uniform current distribution through the junction due to the presence of positive thermal feedback.

Key words: thermal resistance, thermal impedance, modulation method, solar battery, current localization.

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность преобразования энергии солнечных батарей на основе кремния обычно составляет 15–25 % [1]. Это означает, что более 70 % солнечной энергии, поглощаемой батареями, преобразуется в тепло. Известно, что с повышением температуры на 1 °С, номинальная мощность солнечных батарей снижается примерно на 0,4 % [2]. При достижении температур порядка 100–125 °С они вообще могут временно потерять работоспособность, а ещё больший нагрев приводит к необратимым последствиям. Важно и то, что повышенная температура ускоряет процессы деградации солнечных батарей. Все эти обстоятельства повышают требования к эффективному отводу тепла от активной области солнечной батареи (*p-n*-перехода) в окружающую среду. Качество теплоотвода любого полупроводникового прибора, включая и солнечные батареи, характеризуется тепловым сопротивлением R_T «переход-корпус», определяемым выражением:

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

где T_j – температура электронно-дырочного перехода объекта измерения; T_c – фиксированная температура корпуса объекта; P – мощность, рассеиваемая в объекте.

Практически во всех стандартах измерения теплового сопротивления полупроводниковых приборов используется разогрев объекта с помощью пропускания через *p-n*-переход импульсов греющего тока [3] или ступенчато изменяющегося тока [4]. Стандарты измерения теплового сопротивления солнечных батарей на дан-

ный момент не разработаны. В работе [5] предложено рассматривать солнечные батареи как совокупность диодов, соединенных между собой определенным образом. Это позволяет использовать для измерения теплового сопротивления солнечных батарей стандарты для обычных полупроводниковых приборов.

При таком подходе необходимо учитывать несколько обстоятельств. Во-первых, измерение теплового сопротивления необходимо проводить при полном экранировании поверхности батареи от попадания на нее света, иначе в батарее может возникнуть генерация электрического тока, что приведет к большим погрешностям в результатах измерения теплового сопротивления. При этом величина греющего тока должна быть достаточно большой, чтобы обеспечить нагрев батареи не менее чем на 20 °С [5]. В противном случае точность измерений теплового сопротивления будет недостаточно высока.

Во-вторых, измерение изменений температуры перехода после каждого импульса греющего тока необходимо проводить с некоторой временной задержкой относительно окончания импульса. За это время должны завершиться переходные электрические процессы в *p-n*-переходе, связанные с его переключением из режима нагрева большим током в режим измерения температурочувствительного параметра (ТЧП) малым током. Продолжительность этих переходных процессов сильно зависит от емкости *p-n*-перехода солнечной батареи, которая, в свою очередь, определяется площадью батареи. Площадь батареи может варьироваться в широких пределах, поэтому и время задержки практически для каждого объекта измерений должно быть свое.

В-третьих, во всех стандартных методах требуется, чтобы в процессе измерения теплового сопротивления

температура корпуса объекта оставалась постоянной. Обычно для этого используют так называемые «холодные» плиты, выполненные из меди с проточным жидким охлаждением. Однако размеры «холодных» плит меньше, чем размеры большинства мощных солнечных батарей [6]. Поэтому их использование для фиксации температуры корпуса во многих случаях невозможно.

МОДУЛЯЦИОННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Снизить влияние времени задержки и температурного тренда корпуса объекта измерения позволяет метод, использующий модуляцию греющей мощности по гармоническому закону. Суть метода заключается в следующем [7]. Через p - n -переход объекта измерения пропускают импульсы греющего тока, длительность $\tau(t)$ которых модулируется по гармоническому закону:

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

где τ_{cp} – средняя длительность импульсов;

a – коэффициент модуляции;

v – частота модуляции.

Амплитуда импульсов тока I_{cp} и период следования $t_{умн}$ поддерживаются постоянными. Протекание импульсов тока через p - n -переход вызывает рассеяние в нем тепловой мощности, причем среднее значение мощности $P(t)$ за период следования будет также изменяться по гармоническому закону:

$$\begin{aligned} P(t) &= I_{cp} U_{cp} \frac{\tau(t)}{t_{умн}} = \\ &= I_{cp} U_{cp} \frac{\tau_{cp}}{t_{умн}} (1 + a \cdot \sin 2\pi vt) = \\ &= P_0 + P_1 \cdot \sin 2\pi vt, \end{aligned}$$

где U_{cp} – напряжение на вершине греющих импульсов;

P_0 – постоянная составляющая греющей мощности;

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

Изменение по гармоническому закону рассеиваемой мощности вызывает изменения температуры p - n -перехода $T_j(t)$, которая так же, как и мощность $P(t)$, изменяется по гармоническому закону, но со сдвигом фазы:

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

где T_0 – постоянная составляющая температуры перехода;

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

φ – сдвиг фаз между переменными составляющими температуры перехода и греющей мощности.

Температура p - n -перехода после каждого греющего импульса определяется косвенным способом на основе измерений ТЧП, в качестве которого обычно использу-

ют прямое падение напряжения на переходе при протекании через него малого измерительного тока. Измерение ТЧП происходит в паузах между импульсами, с небольшой относительно среза импульсов временной задержкой, необходимой для завершения переходных электрических процессов. Следует отметить, что влияние величины временной задержки на результаты измерения теплового сопротивления в модуляционном методе существенно ниже, чем в других стандартных методах, основанных на измерении разности температур до и после греющего импульса.

Для мощных объектов измерения или объектов с большой теплоемкостью, каковыми являются солнечные батареи, изменение температуры перехода может составлять величину на уровне 0,1 °С. При таком слабом отклике на тепловое воздействие требуется фильтрация сигнала $T_j(t)$. Для этого с помощью быстрого Фурье-преобразования вычисляются Фурье-трансформанты $T_j(v)$, после чего они умножаются на функцию цифрового фильтра, ширина которого определяется частотой модуляции греющей мощности. Затем с помощью обратного Фурье-преобразования восстанавливается отфильтрованная зависимость $T_j(t)$. Отношение амплитуды переменной составляющей температуры перехода T_1 к амплитуде тепловой мощности P_1 определяет модуль $Z_T(v)$ теплового импеданса на частоте модуляции v , а отношение мнимой и вещественной Фурье-трансформант – тангенс фазы $\varphi(v)$ теплового импеданса.

Модуляционный метод позволяет определять компоненты теплового сопротивления, связанные с особенностями конструкции объекта измерения. Для решения этой задачи разработана методика обработки экспериментальной зависимости $Z_T(v)$, которая включает в себя процедуру сглаживания зависимости $Z_T(v)$ методом «скользящего среднего», вычисление производной $dZ_T(v)/dv$ и построение зависимости $(dZ_T/dv)^{-1}$ от теплового сопротивления R_T [8]. Компоненты теплового сопротивления определяются по положению максимумов на кривой $(dZ_T/dv)^{-1}$ относительно оси абсцисс.

ИЗМЕРИТЕЛЬ ТЕПЛОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

В состав аппаратно-программного комплекса входят измеритель теплового сопротивления, компьютер и программное обеспечение. Функциональная схема измерителя теплового сопротивления, в котором реализован модуляционный метод измерения, представлена на рисунке 1. Функционирование измерителя осуществляется следующим образом. Через объект измерения пропускают импульсы тока I_{cp} , генерируемые формирователем импульсов греющего тока. Амплитуду импульсов тока определяют цифровой потенциометр (ЦП) и преобразователь уровня (ПУ). Период следования импульсов и частоту широтно-импульсной модуляции

(ШИМ) определяет электронный ключ Кл, управляемый микроконтроллером ATmega128. В паузах между греющими импульсами через объект протекает измерительный ток $I_{изм}$. Падение напряжения $U_{ТЧП}$ на $p-n$ -переходе в паузе является ТЧП, значение которого однозначно связано с температурой $p-n$ -перехода объекта.

Величина $U_{ТЧП}$ для солнечных батарей в зависимости от их мощности может составлять несколько десятков вольт, что существенно выше максимального напряжения, которое может оцифровать аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Поэтому из сигнала $U_{ТЧП}$ предварительно с помощью дифференциального усилителя (ДУ) вычитается постоянное напряжение U_0 , после чего результат делится на фиксированный коэффициент делителем напряжения (ДН). Взаимодействие внешнего АЦП с микроконтроллером осуществляется с помощью высокоскоростного последовательного интерфейса SPI. Все результаты измерений записываются в оперативную память микроконтроллера и по окончании измерения пересылаются в компьютер для последующей обработки. Взаимодействие микроконтроллера с компьютером осуществляется посредством USB-интерфейса, для реализации которого используется конвертер «RS-USB» на основе микросхемы FT-232.

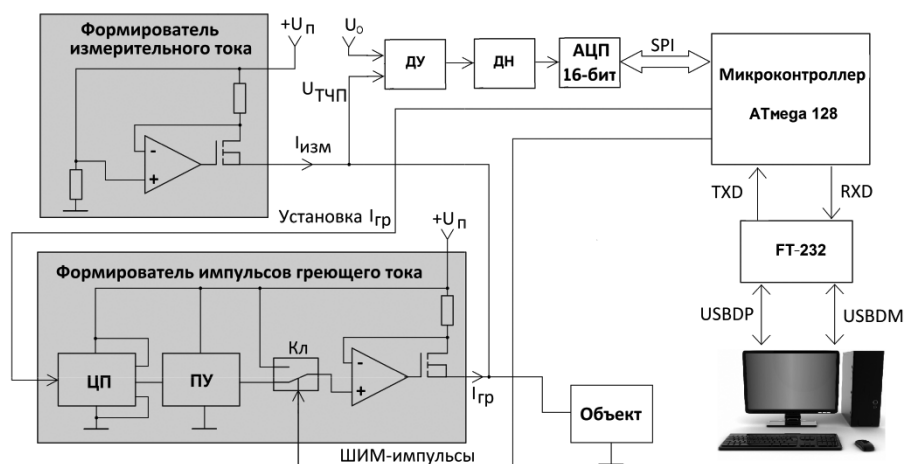


Рис. 1. Функциональная схема измерителя теплового сопротивления солнечных батарей

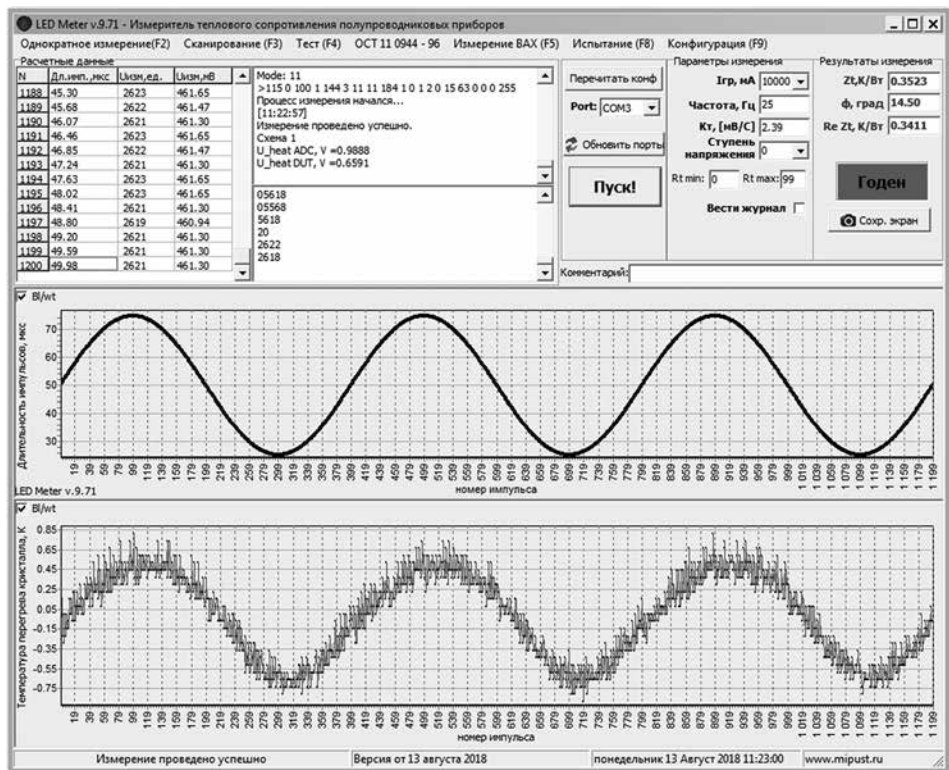


Рис. 2. Главное окно программы LED_Meter (режим однократного измерения)

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА

Программное обеспечение включает в себя управляющую программу для микроконтроллера и программу **LED_Meter** для компьютера. Управляющая программа для микроконтроллера обеспечивает прием из компьютера информационного пакета, в котором задаются рабочие параметры и режимы измерения, формирование ШИМ-импульсов греющего тока или последовательности импульсов тока определенной длительности и амплитуды, измерения $U_{ТЧП}$ в паузах между греющими

импульсами, передачу в компьютер результатов измерения. Кроме этого, управляющая программа осуществляет контроль функционирования измерителя и в случае возникновения нештатных ситуаций передает коды ошибок в компьютер для их распознавания.

Управление процессом измерения и компьютерную обработку результатов измерений осуществляет программа **LED_Meter**, главное окно которой представлено на рисунке 2. В строке меню можно установить нужный режим работы: режим однократного измерения, режим сканирования, тестовый режим, режим ОСТ 110944-96, режим измерения ВАХ. Имеется также режим «Испытание», предназначенный для проведения

серии измерений теплового сопротивления с последующим усреднением. Имеется пункт меню «Конфигурация», позволяющий оперативно изменить содержимое конфигурационного файла, в котором установлены рабочие параметры, выполняемые «по умолчанию».

Основными режимами работы являются режим однократного измерения, режим сканирования по частоте модуляции и режим ОСТ 110944-96. Первый режим предназначен для измерения теплового импеданса при заданной частоте модуляции греющей мощности и величине греющего тока (рис. 2). Как правило, он используется для предварительных измерений теплового сопротивления и определения оптимальных рабочих параметров измерения.

В верхнее графическое окно на рисунке 2 выводится временная зависимость длительности греющих импульсов, определяющая характер модуляции греющей мощности; в нижнее окно – временная зависимость температуры $p-n$ -перехода. В текстовые окна выводятся устанавливаемые параметры измерений, результаты измерений теплового импеданса, а также информация, позволяющая контролировать ход процесса измерения. Можно установить диапазон допустимых значений теплового сопротивления объекта измерений и отбраковать объекты, тепловое сопротивление которых выходит за рамки установленного диапазона. Все результаты измерений теплового сопротивления вместе с соответствующими рабочими параметрами измерений можно сохранить в журнале.

Режим сканирования предназначен для измерения зависимости теплового импеданса $Z_T(\nu)$ от частоты модуляции греющей мощности. Анализ зависимости $Z_T(\nu)$ позволяет определить компоненты теплового сопротивления. Тестовый режим позволяет сформировать однократный импульс греющего тока заданной дли-

тельности. Этот режим используется при калибровке или поверке прибора. В режиме ОСТ 110944-96 тепловое сопротивление измеряется на основе стандарта [3], предусматривающего разогрев объекта серией импульсов греющего тока с заданными значениями амплитуды, длительности и скважности.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЯХ

Целью исследований было измерение компонент теплового сопротивления солнечных элементов и батарей с большой площадью поверхности при различной величине греющего тока. Объектами исследований являлись элементы из монокристаллического кремния с площадью поверхности $52 \times 52 \text{ мм}^2$, закрепленные с помощью термопасты на алюминиевом радиаторе, и батареи из поликристаллического кремния, состоящие из 36 элементов, соединенных между собой последовательно и параллельно. Площадь поверхности батарей составляла $700 \times 550 \text{ мм}^2$, мощность 50 Вт, напряжение холостого хода 23,6 В, ток при работе на нагрузку 2,55 А. Все элементы батареи закреплены на жестком основании из стеклотекстолита FR4 и защищены со стороны рабочей поверхности прозрачной защитной пленкой, по периметру модуль охвачен металлическим каркасом.

Амплитуда импульсов греющего тока I_{gp} при исследовании солнечных элементов устанавливалась в диапазоне от 0,125 до 2,0 А, при исследовании батарей – в диапазоне от 0,25 до 2,5 А. Период следования греющих импульсов для солнечных элементов составлял 400 мкс, для батарей – 1000 мкс, частота модуляции для обоих объектов варьировалась в диапазоне от 0,01 до 700 Гц. Экспериментально определенные значения температурного коэффициента напряжения, связываю-

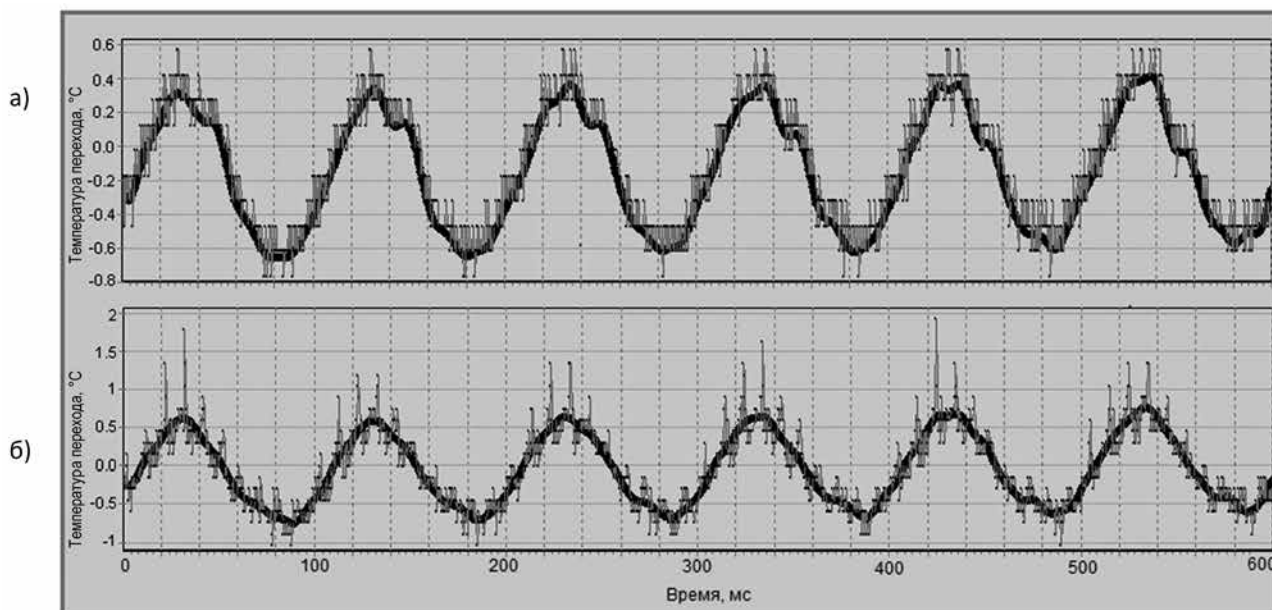


Рис. 3. Осциллограммы температуры перехода солнечного элемента при различной амплитуде импульсов греющего тока: а) $I_{gp} = 0,5 \text{ А}$; б) $I_{gp} = 1,0 \text{ А}$

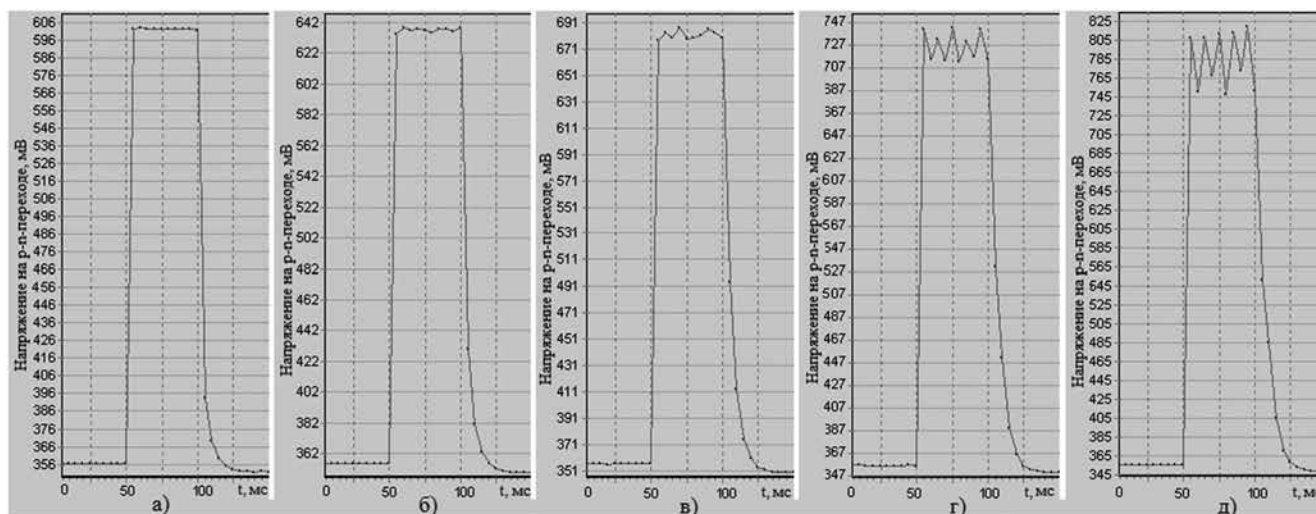


Рис. 4. Временные зависимости напряжения на *p-n*-переходе солнечного элемента при различной амплитуде I_{cp} импульсов греющего тока: $I_{cp} = 0,25$ А (а), $I_{cp} = 0,5$ А (б), $I_{cp} = 1,0$ А (в), $I_{cp} = 1,5$ А (г), $I_{cp} = 2,0$ А (д)

щие напряжения на *p-n*-переходе с температурой перехода, составляли для солнечного элемента 2,57 мВ/К, для батареи – 45,8 мВ/К.

В процессе измерений объекты закрывались светонепроницаемым экраном. Специальных мер для поддержания температуры корпуса батареи постоянной не предпринималось, поскольку в модуляционном методе влияние нагрева корпуса объекта на результаты измерения его теплового сопротивления существенно снижено по сравнению со стандартными методами [4]. Это экспериментально доказано на примере мощных MOSFET- и IGBT-транзисторов в работе [9].

На рисунке 3 представлены осциллограммы температуры перехода солнечного элемента, измеренные при различной амплитуде импульсов греющего тока I_{cp} . Частота модуляции греющей мощности устанавливалась равной 10 Гц. Жирными линиями на рисунке показаны осциллограммы, полученные в результате цифровой фильтрации. Напряжения на объекте U_{cp} 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 $P = I_{cp} \cdot U_{cp}$ отличаются друг от друга более, чем в два раза (0,32 и 0,68 Вт), значения амплитуды переменной составляющей температуры отличаются между собой существенно меньше (0,49 и 0,66 °С). Это указывает на нелинейный характер зависимости теплового сопротивления от амплитуды импульсов греющего тока.

Аналогичные результаты были получены и для другого объекта исследований – солнечной батареи мощностью 50 Вт. При величине рассеиваемой мощности 5,1; 22,3 и 47,2 Вт амплитуда переменной составляющей температуры во всех случаях примерно одинакова (0,12; 0,15 и 0,15 °С соответственно). Это указывает на то, что нелинейный характер зависимости теплового сопротивления от величины греющего тока проявляется как для солнечных элементов, так и для мощных сол-

нечных батарей.

Другой особенностью результатов, представленных на рисунке 3, является наличие на осциллограммах температуры перехода резких всплесков. Как показали исследования солнечных элементов, данные всплески наблюдаются при амплитуде греющих токов, превышающей 1000 мА. Для установления причины появления таких всплесков были проведены измерения напряжения на *p-n*-переходе солнечного элемента в момент протекания через него однократных импульсов греющего тока длительностью 50 мс (на вершине греющих импульсов). Результаты измерений представлены на рисунке 4. Резкие всплески напряжения на вершине греющих импульсов при $I_{cp} \geq 1000$ мА указывают на наличие в области *p-n*-перехода процессов, связанных с неустойчивостью тока.

Модуляционный метод позволяет определять компоненты теплового сопротивления объекта измерения. Это осуществляется на основе анализа зависимости теплового импеданса от частоты модуляции греющей мощности. Результат такого анализа представлен на рисунке 5. Компоненты теплового сопротивления проявляются на графиках в виде максимумов, положение которых на оси абсцисс определяется значением компонент теплового сопротивления.

На рисунке 5а приведены результаты измерений для солнечного элемента, конструкция которого представляет собой монокристаллическую пластину кремния, закрепленную с помощью термопасты на радиаторе. Для такой конструкции должна проявляться лишь одна компонента теплового сопротивления «переход-радиатор». Тем не менее, на графике четко проявляются две компоненты R_{T1} и R_{T2} . Значения компонент равны $R_{T1} = 9,7$ К/Вт и $R_{T2} = 14,1$ К/Вт. Результаты измерения компонент теплового сопротивления солнечной батареи представлены на рисунке 5б. На графиках четко проявляются три компоненты, значения тепло-

вых сопротивлений которых равны $R_{T1} = 0,0115$ К/Вт, $R_{T2} = 0,055$ К/Вт и $R_{T3} = 0,121$ К/Вт.

Результаты измерения осциллограмм температуры $p-n$ -перехода при различной величине греющего тока I_{zp} показали, что амплитуда переменной составляющей температуры зависит от I_{zp} . На рисунке 6 представлены результаты измерений зависимости компонент теплового сопротивления от величины греющего тока I_{zp} для солнечного элемента (рис. 6а) и для солнечной батареи (рис. 6б). Видно, что для обоих объектов измерения зависимости имеют нелинейный характер – резко уменьшаются в области малых токов и стремятся к постоянному значению при больших токах.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Нелинейный характер зависимости теплового сопротивления от величины греющего тока подтверждают исследования, результаты которых представлены в работах [10, 11]. Объектами исследования в работе [10] были солнечные элементы с площадью поверхности 16 см², величина греющего тока I_{zp} варьировалась в диапазоне от 100 до 700 мА. Было обнаружено, что с увеличением I_{zp} тепловое сопротивление R_T солнечных элементов уменьшается почти на порядок – от 28,5 до 3 К/Вт, причем величина R_T резко уменьшается в диапазоне токов от 100 до 300 мА и практически не изменяется при $I_{zp} > 300$ мА. Объяснения этому в работе [10] не приведено.

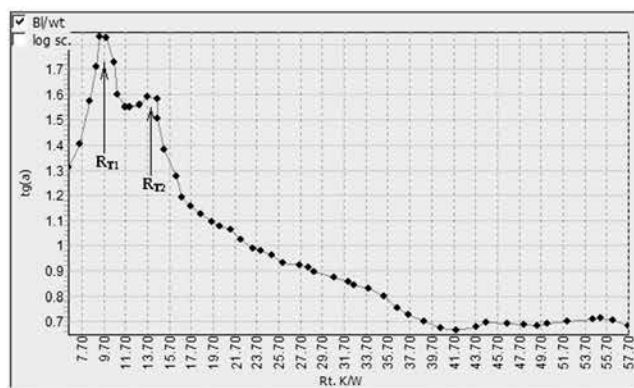
Качественно нелинейный характер зависимости $R_T(I_{zp})$ подтвердили исследования теплофизических процессов солнечных элементов, результаты которых представлены в работе [11]. Аналогичные исследования были проведены для мощных солнечных батарей [12]. Авторами работы [11] была предложена модель, объясняющая эту зависимость. Причиной, по их мнению, являются процессы локализации греющего тока через $p-n$ -переход солнечного элемента. Из-за большой площади $p-n$ -перехода плотность тока, протекающего че-

рез него, очень мала и может достигать значений менее 100 мкА/мм². Неоднородность структуры или дефект в области перехода, например, дислокация, приводит к локальному повышению тока, что вызывает локальное повышение температуры. Локальное повышение температуры, в свою очередь, вызывает увеличение тока через эту область. Таким образом, из-за наличия положительной тепловой обратной связи общий ток через $p-n$ -переход становится резко неоднородным – в некоторых областях резко возрастает за счет уменьшения тока в остальной части площади перехода. Области локализации тока имеют более высокую температуру, чем средняя температура по всему солнечному элементу. Увеличение греющего тока увеличивает размеры областей локализации, но практически не увеличивает максимальную температуру в них.

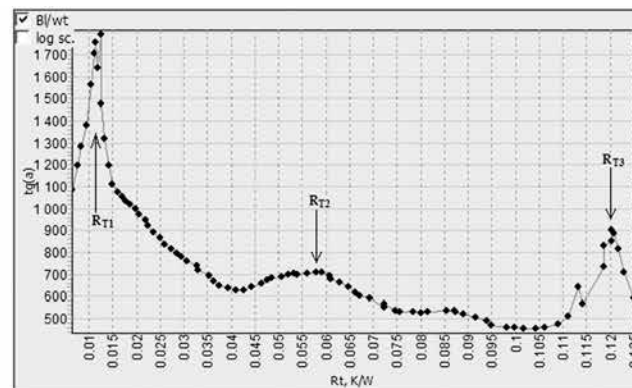
Возникновение областей локализации тока должно приводить к появлению дополнительной компоненты теплового сопротивления, обусловленной перепадом температуры между локально разогретой областью и остальной частью пластины солнечного элемента. Наличие такой компоненты подтверждают результаты, представленные на рисунке 5. Компонента теплового сопротивления R_{T1} на рисунке 5а связана с областью локального перегрева солнечного элемента, такая же компонента имеется и для солнечной батареи (рис. 5б). Резкие всплески напряжения на вершине греющих импульсов (рис. 5) подтверждают наличие процессов перераспределения тока через $p-n$ -переход и его локализацию. Эти же процессы локализации тока объясняют появление на осциллограммах, представленных на рисунке 3, резких выбросов температуры $p-n$ -перехода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан аппаратно-программный комплекс для измерения теплового сопротивления солнечных батарей, в основу работы которого положен модуляционный метод измерения. Данный метод на основе анализа зависимости теплового импеданса от частоты модуляции греющей мощности позволяет определять компоненты



а)



б)

Рис. 5. Результаты измерений компонент теплового сопротивления солнечного элемента при $I_{zp} = 0,125$ А (а) и солнечной батареи при $I_{zp} = 1,0$ А (б)

теплового сопротивления, связанные с особенностями конструкции объекта измерения.

Комплекс обеспечивает диапазон измерения теплового сопротивления от 0,01 до 100 К/Вт, погрешность измерения составляет 5 %, диапазон греющих токов – от 0,25 до 4 А, диапазон частоты модуляции греющей мощности – от 0,01 до 1000 Гц.

Исследования теплофизических процессов солнечных элементов и солнечных батарей показали, что тепловое сопротивление таких объектов нелинейно зависит от величины греющего тока, стремясь при больших греющих токах к постоянному значению. Это объясняется процессами локализации тока в области *p-n*-перехода, обусловленными наличием положительной тепловой обратной связи. Экспериментальным подтверждением таких процессов является появление компоненты теплового сопротивления, возникающей из-за перепада температур между локально разогретой областью объекта измерения и остальной частью полупроводниковой пластины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эффективность преобразования солнечной энергии солнечным элементом на основе Si с квантовыми точками Ge / А.В. Войцеховский, Д.В. Григорьев, О.П. Пчеляков, А.И. Никифоров // 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. ОСТ 11 0944-96. Микросхемы интегральные и приборы полупроводниковые. Методы расчета, измерения и контроля теплового сопротивления. – М.: ГУП НПП Пульсар, 1997. – 110 с.

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. Siegal B. Solar Photovoltaic Cell thermal measurement issues // 26th Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (SEMI-THERM). 21–25 Feb. 2010. – URL: http://www.thermengr.com/Siegal_SPVC_Thermal_Issues.pdf.

6. Total Thermal Solutions // Lytron Inc. Catalog. – URL: <http://www.lytron.com/Cold-Plates>.

7. Смирнов В.И., Сергеев В.А., Гавриков А.А. Спектральный и временной методы измерения теплового сопротивления полупроводниковых приборов // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2014. – № 10. – С. 58–63.

8. Смирнов В.И., Гавриков А.А., Шорин А.М. Метод измерения компонент теплового сопротивления полупроводниковых приборов и его практическая реализация // Автоматизация процессов управления. – 2017. – № 2 (48). – С. 98–105.

9. Измерения теплового импеданса мощных транзисторов / В.И. Смирнов, В.А. Сергеев, А.А. Гавриков, А.М. Шорин // Радиотехника. – 2017. – № 6. – С. 83–90.

10. 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.

11. Issues of Thermal Transient Testing on Photovoltaic Modules / B. Plesz, S. Rész, P.G. Szabó, G. Hantos and D. Dudola // 20th International Workshop on Thermal Investigations of IC's and Systems Greenwich, London, 24–26 Sept. 2014.

12. Смирнов В.И., Сергеев В.А., Гавриков А.А. Измерение теплового сопротивления солнечных модулей модуляционным методом // Журнал радиоэлектроники. – 2018. – № 8. – URL: <http://jre.cplire.ru/jre/aug18/14/text.pdf>.

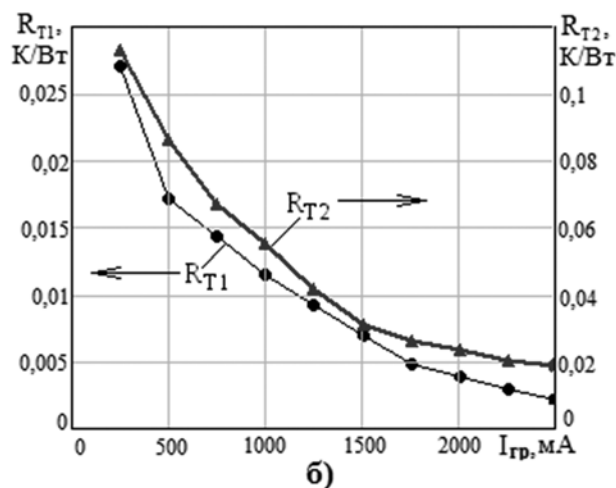
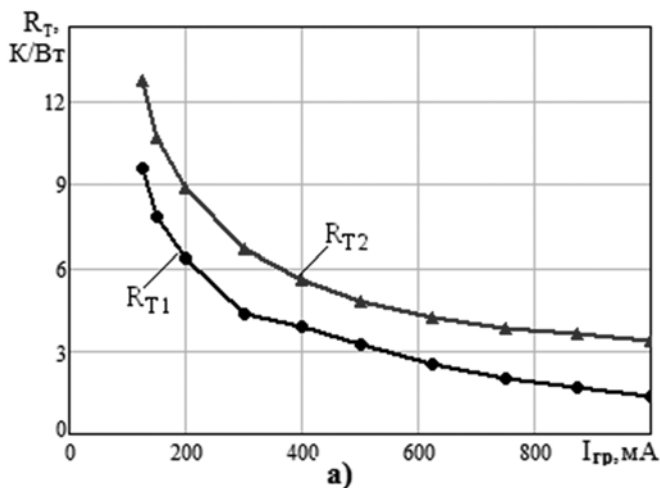


Рис. 6. Зависимости компонент теплового сопротивления R_{T1} и R_{T2} от величины греющего тока I_{gp} : а) для солнечного элемента; б) для солнечной батареи

REFERENCES

1. Voitsekhovskii A.V., Grigorev D.V., Pcheliakov O.P., Nikiforov A.I. Effektivnost preobrazovaniia solnechnoi energii solnechnym elementom na osnove Si c kvantovymi tochkami Ge [Efficiency of Solar Energy Conversion by Si Solar Cell with Ge Quantum Dots]. *Prikladnaia fizika* [Applied Physics], 2010, no. 2, pp. 96–102.
2. Bakirov M.I. Fotoelektricheskie i radiatsionnye kharakteristiki kremnievykh elementov pri povyshennykh osveshchennostiakh. [Photoelectric and Radiation Characteristics of Silicon Solar Elements under Elevated Illumination and Temperatures]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Physics and Engineering of Semiconductors], 1997, no. 5, pp. 520–522.
3. OST 11 0944-96. *Mikroskhemy integralnye i pribory poluprovodnikovye. Metody raschiota i kontroliia teplovogo soprotivleniia* [Industrial Standard. Integrated Microcircuits and Semiconductor Devices. Methods for Calculating, Measuring and Controlling Thermal Resistance]. Moscow, GUP NPP Pulsar Publ., 1997. 110 p.
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. Siegal B. Solar Photovoltaic Cell Thermal Measurement Issues. *26th Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (SEMI-THERM)*. 21–25 Feb. 2010. Available at: http://www.thermengr.com/Siegal_SPVC_Thermal_Issues.pdf.
6. Total Thermal Solutions. *Lytron Inc. Catalog*. Available at: <http://www.lytron.com/Cold-Plates>.
7. Smirnov V.I., Sergeev V.A., Gavrikov A.A., Spektralnyi i vremennoi metody izmereniia teplovogo soprotivleniia [Spectral and Temporal Method for Measuring the Thermal Resistance of Semiconductor Devices.] *Promyshlennye ASU i kontroliery*. [Industrial Automatic Control Systems and Controllers], 2014, no. 10, pp. 58–63.
8. Smirnov V.I., Gavrikov A.A., Shorin A.M. Metod izmereniia komponent teplovogo soprotivleniia poluprovodnikovykh priborov i ego prakticheskaia realizatsiia [The Method for Measuring Thermal Resistance Components of Semiconductor Devices and its Practical Implementation]. *Avtomatizatsiia protsessov upravleniia* [Automation of Control Processes], 2017, no. 2, pp. 98–105.
9. Smirnov V.I., Sergeev V.A., Gavrikov A.A., Shorin A.M. Izmereniia teplovogo impedansa moshchnykh tranzistorov [Measurement of Thermal Impedance of High-Power Transistors]. *Radiotekhnika* [Journal Radioengineering], 2017, no. 6, pp. 83–90.
10. Zhang J., 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.
11. Plesz B., S. Rész, 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.
12. Smirnov V.I., Sergeev V.A., Gavrikov A.A. Izmerenie teplovogo soprotivleniia solnechnykh modulei modulatsionnym metodom [Measurement of Thermal Resistance of Solar Modules by Modulation Method]. *Jurnal Radioelektroniki* [Journal of Radio Electronics], 2018, no. 8. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/aug18/14/text.pdf>.