

## Определение теплового сопротивления кристалл – корпус полупроводникового прибора из его кривой охлаждения

*Н.Л. Евдокимова, В.В. Долгов, К.А. Иванов*

*АО «НПП «Пульсар», г.Москва, Россия*

*evdokimova@pulsarnpp.ru*

Тепловое сопротивление полупроводникового прибора определяет предельный тепловой режим, гарантирующий его работоспособность: чем выше значение теплового сопротивления полупроводникового прибора, тем больше может быть его перегрев. Поэтому необходим контроль тепловых сопротивлений выпускаемых приборов. В настоящее время получил широкое применение метод определения теплового сопротивления кристалл – корпус с использованием структурных функций: дифференциальной и интегральной (кумулятивной) теплоемкостей. В работе предложена новая тепловая характеристика – функция теплового потока, позволяющая определить момент, когда тепловой фронт достигает теплоотвода. При этом точка перегиба функции теплового потока соответствует тепловому сопротивлению кристалл – корпус, найденному по аналогичному методу. Использовано определение кумулятивной теплоемкости из уравнения теплового баланса. Структурные функции определены аналитически без процедуры числовой деконволюции. Сравнение предлагаемого метода с известными методами, использующими структурные функции, показало, что при тех же значениях параметров обрабатывать результаты проще, сокращается время измерения и нет строгих требований к теплоотводу. Данный метод может быть использован для сравнения конструкций разрабатываемых приборов и при анализе дефектов по тепловому сопротивлению готовых приборов.

**Ключевые слова:** тепловое сопротивление кристалл – корпус; структурная функция; теплоемкость

**Благодарности:** авторы выражают благодарность Ю.А. Концевому, В.С. Ежову и А.Ю. Моторину (АО «НПП «Пульсар», г.Москва) за плодотворное обсуждение результатов.

**Для цитирования:** Евдокимова Н.Л., Долгов В.В., Иванов К.А. Определение теплового сопротивления кристалл – корпус полупроводникового прибора из его кривой охлаждения // Изв. вузов. Электроника. – 2019. – Т. 24. – № 1. – С. 30–41. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-1-30-41

## Determination of Junction-to-Case Thermal Resistance from One Transient Cooling Curve

N.L. Evdokimova, V.V. Dolgov, K.A. Ivanov

J&C «S&PE «Pulsar», Moscow, Russia

evdokimova@pulsarnpp.ru

**Abstract:** The thermal resistance of the semiconductor device determines its thermal performance limit, guaranteeing its working capacity: the higher the value of the thermal resistance of the semiconductor device, the more is its overheating. Nowadays, the method to find the junction-to-case thermal resistance from its thermal function, using the structural functions: differential and integral (cumulative) thermal capacities, is commonly used. In the work a new thermal characteristic («function of a thermal flow») – the function of the heat flow, permitting to determine the moment when the thermal front reaches the heat sink, has been proposed. In this case the point of inflexion of the heat flow function corresponds to the junction-to-case thermal resistance, found from the analogous method. The determination of the cumulative thermal capacitance from the equation of the thermal balance has been used. Besides, the structural functions have been determined analytically without a numerical deconvolution procedure. The comparison of the offered method with other similar methods has shown that: giving the same results this new technique is simpler in processing of the results, it reduces the time of the measurement and does not impose the strict requirements to the heat sink. The given method can be used for comparison of designs and in the thermal resistance-based analysis of defects of produced semiconductor devices.

**Keywords:** junction-to-case thermal resistance; structure function; thermal capacitance

**Acknowledgements:** the authors thank Kontsevoy Yu.A., Ezhov V.S., Motorin A.Yu. for fruitful discussion of the results.

**For citation:** Evdokimova N.L., Dolgov V.V., Ivanov K.A. Determination of junction-to-case thermal resistance from one transient cooling curve. *Proc. Univ. Electronics*, 2019, vol. 24, no. 1, pp. 30–41. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-1-30-41

**Введение.** Для измерения теплового сопротивления кристалл – корпус необходимо измерить температуру кристалла и корпуса, а также разогревающую мощность  $P_p$ . Тепловое сопротивление кристалл – корпус  $R_{т.кр-корп}$  рассчитывается следующим образом:

$$R_{т.кр-корп} = \frac{T_{кр} - T_{корп}}{P_p}.$$

В настоящее время для измерения температуры кристалла широко используется временная релаксация напряжения  $p$ - $n$ -перехода после воздействия разогревающего импульса. Основная трудность заключается в точном измерении температуры корпуса с применением термпары. В работах [1–3] рассмотрен метод теплового анализа струк-

туры полупроводникового прибора с использованием структурных функций: интегральной теплоемкости  $C$  и дифференциальной теплоемкости  $K = dC/dR_T$ . В этих работах элементы  $R$ – $C$ -цепи определяются методом Network Identification by Deconvolution (NID) [4].

В работе [5] представлено сравнение структурных функций, полученных для двух разных условий на границе корпус – теплоотвод. В первом случае корпус прижимался к охлаждаемому теплоотводу, во втором случае между корпусом и охлаждаемым теплоотводом находилась тонкая керамическая пластина. Анализ структурных функций [5] показал, что тепловое сопротивление  $R_{T, \text{кр-корп}}$  может быть определено двумя методами: из интегральной теплоемкости  $C$  и по точке перегиба дифференциальной теплоемкости  $K$ . В первом случае значение  $R_{T, \text{кр-корп}}$  определяется из сравнения интегральной теплоемкости  $C$  с расчетным значением полной теплоемкости образца. При этом для расчета полной теплоемкости прибора нужно знать размеры и удельные теплоемкости элементов прибора. Во втором случае точка перегиба структурной функции  $K(R_T)$  находится после точки разделения двух структурных функций с керамической пластиной и без нее. Поэтому идентификация  $R_{T, \text{кр-корп}}$  по точке перегиба функции  $K(R_T)$  дает завышенное значение теплового сопротивления [6]. В работе [6] теоретически и экспериментально определено, что на структурную функцию большое влияние оказывает трехмерное распространение тепла и алгоритм деконволюции чувствителен к шумам во входных данных, а структурная функция, полученная из кривой охлаждения, не может быть реконструирована достаточно точно. В той же работе предложен альтернативный (без деконволюции) метод определения теплового сопротивления по переходному тепловому сопротивлению  $Z_{th}$ , который реализован в программе TDIM-Master [7].

В американском стандарте JESD51-14 [8] представлены методы измерения теплового сопротивления кристалл – корпус, в которых сравниваются интегральная теплоемкость  $C$  или переходное тепловое сопротивление  $Z_{th}(t)$ , полученные для двух разных условий на границе корпус – теплоотвод (Transient Dual Interface Test Method). Эти методы требуют измерения двух кривых охлаждения для одного полупроводникового прибора: с термопастой между корпусом и теплоотводом  $W$  (with) и без нее  $WO$  (without). Далее обе кривые охлаждения загружаются в программу TDIM-Master [7] и двумя методами определяется сопротивление кристалл – корпус: по точке разветвления производных кривых  $Z_{th}(t)$  [6] и по точке разветвления структурных функций  $C(R_{th})$ , снятых с пастой ( $W$ ) и без нее ( $WO$ ) [5]. Данная технология реализована в приборе T3Ster компании Mentor Graphics [9].

Однако рассмотренные методы имеют ряд недостатков, например кривую охлаждения нужно снять два раза, что увеличивает время измерения. При этом возникает дополнительная погрешность из-за того, что

- необходимо (субъективно) корректировать значение нагревающей мощности, для того чтобы кривые охлаждения, снятые с пастой и без нее, совпадали на начальном временном интервале, а это меняет значение теплового сопротивления;
- при снятии обеих кривых важно обеспечить одинаковое давление прижима корпуса прибора к теплоотводу;
- результаты данного метода существенно зависят от настроек, которые используются в программе TDIM-Master для обработки экспериментальных данных.

В настоящей работе рассматривается поведение структурных функций для разных форм теплового потока, применяется характеристика, удобная для анализа формы теплового потока, – функция  $F_{hf}$  (heat flow). Для расчета структурных функций используется, в отличие от работ [1–10], определение интегральной теплоемкости. Методом чис-

ленного моделирования проводится анализ функции теплового потока  $F_{hf}$  и предлагается метод определения теплового сопротивления кристалл – корпус по точке перегиба функции  $F_{hf}$ . Метод иллюстрируется в процессе измерения тепловых сопротивлений кристалл – корпус ряда полупроводниковых приборов.

**Теоретическое обоснование методики.** Рассмотрим, что происходит, когда тепловой поток доходит до основания корпуса. Кроме основного потока к теплоотводу тепло растекается по корпусу, и часть тепла уходит в крышку корпуса, т.е. тепловой поток расслаивается и форма фронта теплового потока меняется. Исследуем зависимость различных функций от формы фронта теплового потока для одномерного теплового потока, радиального растекания для цилиндрических координат, радиального растекания в полусферу. Все три вида теплового потока могут присутствовать в полупроводниковых приборах. Если активная область кристалла занимает почти всю площадь его поверхности, то реализуется случай, близкий к одномерному. Боковое растекание тепла по кристаллу или по корпусу может быть описано в цилиндрических координатах, растекание тепла в объеме теплоотвода – растеканием в полусферу.

При радиальном растекании тепла в пластину (случай цилиндрических координат) логарифм интегральной теплоемкости  $\ln(C_\Sigma)$  пропорционален полному сопротивлению  $R_\Sigma$  [10]. Это соотношение используется для измерения теплопроводности пластин [11] при цилиндрической симметрии тепловых контактов. В ходе обработки результатов обнаружено, что функция  $d\ln C/dR_t$  имеет максимум вблизи точки разветвления кривых W and WO. В дальнейшем используется соотношение

$$\frac{d \ln C}{dR_t} = \frac{1}{C} \frac{dC}{dR_t}.$$

В табл.1 представлены зависимости структурных функций  $C$ ,  $dC/dR_t$  и функции  $1/C \cdot dC/dR_t$  от координаты  $x$  или радиуса распространения тепла  $r$  и использованы следующие обозначения:  $w$  – толщина пластины;  $r$ ,  $x$  – радиус и координата распространения тепла;  $c$  – удельная объемная теплоемкость;  $\rho$  – плотность;  $\lambda$  – теплопроводность.

Из табл.1 видно, что при распространении теплового потока в одном материале интегральная теплоемкость  $C$  возрастает при любой форме теплового потока, дифференциальная теплоемкость  $K = dC/dR_t$  не меняется в случае одномерного теплового потока и возрастает в остальных случаях. Функция  $1/C \cdot dC/dR_t$  в зависимости от формы теплового потока может убывать, не меняться и возрастать и, следовательно, иметь экстремумы, т.е. может быть использована для анализа формы фронта теплового потока:

$$F_{hf} = \frac{1}{C} \frac{dC}{dR_t}. \quad (1)$$

Используем другое определение интегральной теплоемкости – аналитическую теплоемкость  $C^*$  [5], которая отличается от интегральной теплоемкости  $C$ , найденной из анализа  $R$ – $C$ -цепей с помощью численной деконволюции [1–10]. Определение получено аналитически и основано на уравнении теплового баланса. За время  $t$  тело получит количество теплоты  $Q = C \cdot \Delta T = Pt$  [12]. В работе [13] аналитическая теплоемкость  $C^*$  определена как количество теплоты  $Q$ , необходимое для нагревания кристалла прибора на  $1^\circ\text{C}$ :

$$C^* = \frac{Q}{\Delta T_{кр}} = \frac{P_p t}{\Delta T_{кр}} = \frac{t}{R_t(t)}, \quad (2)$$

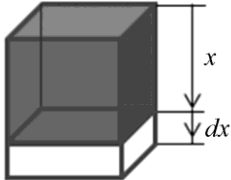
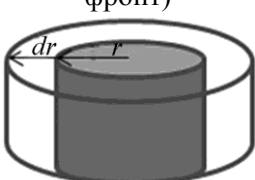
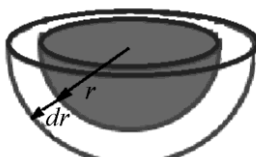


Таблица 1

Структурные функции для разной геометрии образца

Table 1

The structure functions for the different sample geometry

Структурная функция	Одномерный тепловой поток (плоский фронт)	Растекание тепла по пластине (цилиндрический фронт)	Растекание тепла в объеме (сферический фронт)
			
$dC$	$c\rho S dx$	$2\pi w c\rho r dr$	$2\pi r^2 c\rho dr$
$dR_t$	$\frac{dx}{\lambda S}$	$\frac{dr}{2\pi\lambda w r}$	$\frac{dr}{2\pi\lambda r^2}$
$C$	$c\rho S x$ (возрастает)	$\pi w c\rho r^2$ (возрастает)	$\frac{4}{3}\pi c\rho r^3$ (возрастает)
$K = \frac{dC}{dR_t}$	$c\rho\lambda S^2$ (не меняется)	$4\pi^2 w c\rho\lambda r^2$ (возрастает)	$4\pi^2 c\rho\lambda r^4$ (возрастает)
$F_{hf} = \frac{1}{C} \frac{dC}{dR_t}$	$\frac{\lambda S}{x}$ (убывает)	$4\pi w\lambda$ (не меняется)	$3\pi\lambda r$ (возрастает)

где  $\Delta T_{кр}$  – изменение температуры кристалла;  $t$  – время воздействия мощности;  $R_t(t)$  – переходное тепловое сопротивление.

Данная функция позволяет анализировать происходящие в структуре тепловые процессы без применения сложного математического анализа, и нет проблем, связанных с численной деконволюцией. Для указания того, что используется аналитическая теплоемкость  $C^*$ , рассчитанные через нее тепловые функции будут также называться аналитическими и отмечаться звездочкой (\*): аналитическая структурная функция

$$F_{hf}^* = \frac{1}{C^*} \frac{dC^*}{dR_t}$$

$K^* = dC^*/dR_t$  и аналитическая функция потока

Функции  $C^*$  и  $K^*$  использовались для анализа параметров конструкции [13, 14] и

определения теплопроводности пластин ( $\frac{K^*}{C^*} \propto w\lambda$ ) при радиальном растекании тепла [11]. Эти функции могут быть использованы для определения теплового сопротивления кристалл – корпус.

**Методика эксперимента.** В соответствии со стандартами JESD51-14 [8] и ОСТ 11 0944-96 [15] на исследуемый прибор подавался разогревающий импульс и снималась кривая охлаждения – зависимость термочувствительного параметра (ТЧП) от времени. Для различных приборов использовались разные ТЧП: прямое падение напряжения на  $p$ – $n$ -переходе либо падение напряжения на сопротивлении канала в некоторых типах полевых транзисторов. Обработка результатов проводилась в программе Origin 9. Электрические выбросы на начальном участке убирались маскированием дан-

ных на участке выбросов. При этом выбросы исключались из дальнейшей обработки сигнала. Примерное время выбросов составляло менее 150 мкс. Длительность разогревающего импульса выбиралась достаточной для того, чтобы тепло дошло до теплоотвода, в данном случае 1 с. У исследуемых приборов заранее определен температурный коэффициент термочувствительного параметра (напряжения) (ТКН).

В результате измерения получены два массива: массив времен  $t_i$  и массив ТЧП. По изменению ТЧП рассчитывался массив изменения температуры  $\Delta T_i = \Delta \text{ТЧП}_i / \text{ТКН}$  и массив тепловых сопротивлений на участке охлаждения:

$$R_{t_i} = \frac{\Delta T_i}{P_p} = \frac{T_{\text{кр}}(t=0) - T_{\text{кр}i}}{P_p}. \quad (3)$$

Далее проводилось сглаживание экспериментальных данных в программе Origin с помощью процедуры экспоненциального фитинга. Выходная функция представляет собой сумму экспонент. После маскирования начального участка, содержащего выбросы электрического сигнала, оказалось достаточным пять экспонент. Температура  $T_{\text{кр}}(t=0)$  определялась стандартной процедурой экстраполяции начального участка кривой охлаждения (по  $\sqrt{t}$ ) к моменту  $t=0$  [8,15] (начальный участок снят с интервалом 10 мкс). Далее по формуле (2) рассчитывался массив  $C^*$  и по формуле (1) находилась функция теплового потока  $F_{hf}^*$ . Таким образом, алгоритм преобразования массивов для определения тепловых функций следующий:

$$\text{ТЧП} \rightarrow \Delta T_i \rightarrow R_{t_i} (3) \rightarrow \text{фитинг} \rightarrow R_t(t) \rightarrow C^* (2) \rightarrow dC^*/dR_t \rightarrow F_{hf}^* (1). \quad (4)$$

**Результаты эксперимента.** В эксперименте применялся диод 2Д715 (рис.1). Термочувствительным параметром являлось прямое падение напряжения на  $p$ - $n$ -переходе. В результате обработки, проведенной по алгоритму (5), получены тепловые функции данного диода. При сглаживании экспериментальных данных коэффициент корреляции превышал 0,995. В дальнейших преобразованиях использовалась полученная в результате фитинга кривая переходного теплового сопротивления  $R_t(t)$ . Построенные по алгоритму (4) функции  $R_t$ ,  $C^*$ ,  $dC^*/dR_t$  и  $F_{hf}^*$  для диода 2Д715 показаны на рис.2–5. Для сравнения диод монтировался на теплоотводе с теплопроводящей пастой (W) и без нее (WO).

Из рис.2 видно, что тепловое сопротивление при увеличении времени непрерывно возрастает и не выходит на участок насыщения, т.е. определить напрямую тепловое сопротивление кристалл – корпус нельзя. Появление различий в  $R_t$  при измерении с пастой и без нее показывает, что в данный момент времени тепловой поток дошел до теплоотвода. Абсцисса точки разделения кривых W и WO на рис.2 показывает время, за которое тепловой поток достигает теплоотвода. Абсцисса точки разделения кривых W и WO (см. рис.3 и 4) соответствует тепловому сопротивлению кристалл – корпус. Но

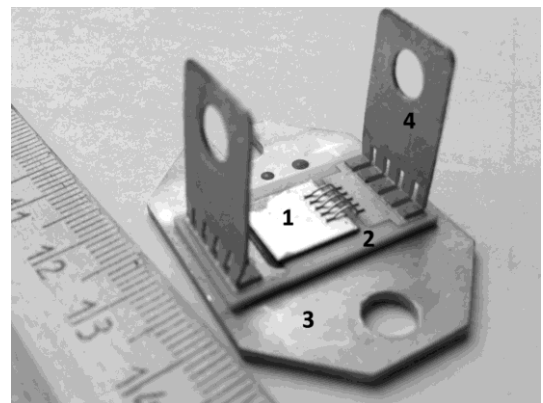


Рис.1. Внешний вид диода 2Д715 без крышки: 1 – кристалл; 2 – керамика; 3 – корпус; 4 – выводы

Fig.1. Image of the diode 2D715 without case cover: 1 – chip; 2 – ceramic; 3 – case; 4 – lead

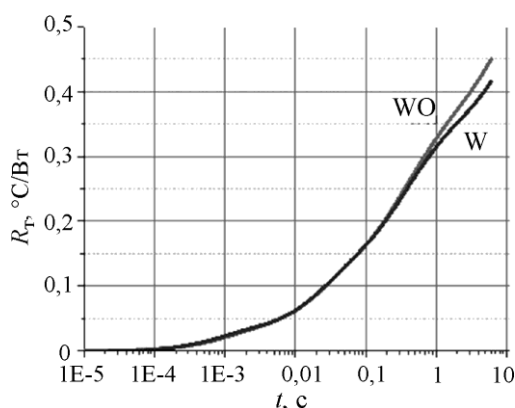


Рис.2. Зависимость переходного теплового сопротивления диода 2Д715 от времени  
Fig.2. Dependence of the transient thermal resistance of the diode 2D715 on the time

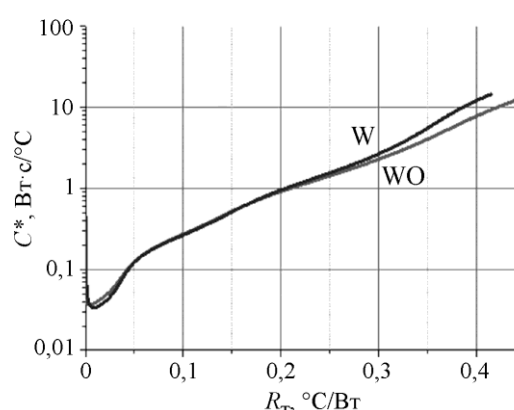


Рис.3. Зависимость аналитической теплоемкости от теплового сопротивления  
Fig.3. Dependence of the analytical thermal capacitance on the thermal resistance

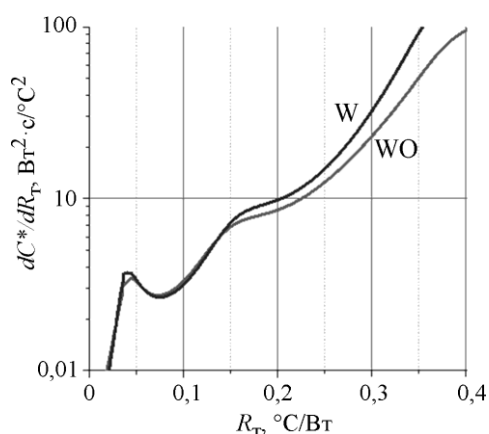


Рис.4. Аналитическая дифференциальная структурная функция  $K^* = dC^*/dR_T$   
Fig.4. Analytical differential structural function  $K^* = dC^*/dR_T$

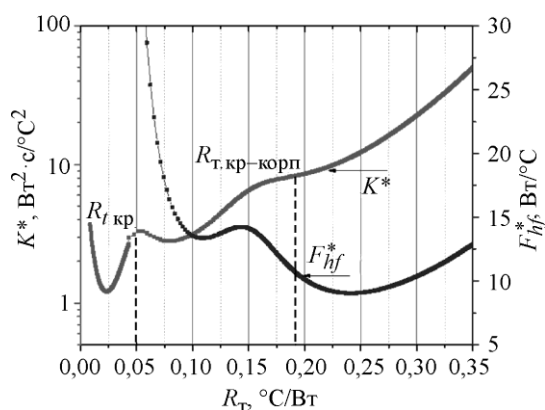


Рис.5. Сопоставление аналитических функций  $F_{hf}^*$  и  $K^*$

Fig.5. Comparison analytical structural function  $K^*$  and heat flow function  $F_{hf}^*$

это значение зависит от коррекции мощности нагрева, которая необходима по методам TDIM.

Аналитическая структурная функция  $K^*$  (см. рис.4) имеет такой же вид (те же пики и долины), что и дифференциальная структурная функция, полученная в работе [6]. Точка разделения кривых W и WO на рис.4 близка к точке перегиба кривой  $K^*$ . На графиках  $R_T = f(t)$  и  $C^* = f(R_T)$  (см. рис.2 и 3) по ходу кривой трудно точно определить точку разделения ввиду их монотонности в этой точке.

Проанализируем аналитическую структурную функцию  $K^*$ , показанную на рис.5. На кривой  $K^* = f(R_T)$  по точкам перегиба кривой  $K^*$  можно выделить три основных участка прохождения теплового потока: I – через кристалл ( $R_{T,кр}$ ); II – через керамику и корпус ( $R_{T,кр-корп}$ ); III – в теплоотвод.

Для определения теплового сопротивления кристалл – корпус следует рассмотреть интервал  $0,1 \text{ °C/Wt} < R_T < 0,2 \text{ °C/Wt}$ , где наблюдается разветвление кривых W и WO (см. рис.4). Участок  $0,10\text{--}0,14 \text{ °C/Wt}$ , на котором обе функции  $F_{hf}^*$  и  $K^*$  возрастают, соответствует сферическому фронту распространения тепла в корпус диода. Участок от

$0,15\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Вт} < R_T < 0,20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$  после максимума  $F_{hf}^*$ , на котором  $K^*$  возрастает, а  $F_{hf}^*$  уменьшается, соответствует плоскому фронту распространения тепла в корпусе диода. Последний участок  $R_T > 0,25\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ , на котором обе функции  $F_{hf}^*$  и  $K^*$  снова возрастают, соответствует сферическому фронту распространения тепла в теплоотводе (см. табл.1).

Таким образом, максимум функции  $F_{hf}^*$  соответствует изменению формы фронта теплового потока от сферической к плоской. В полупроводниковых приборах тепловой поток доходит до теплоотвода за время в интервале 10–1000 мс (рис.6).

**Результаты численного моделирования.** Для лучшего понимания процесса распространения тепла в структуре проведено численное моделирование диода 2Д715 с помощью программ ANSYS Icerak 18.2 и AliceFlow\_v0\_34 [16]. На основании теплоотвода задано граничное условие  $T = \text{const}$ .

В результате расчета получено распределение температуры по структуре прибора в зависимости от времени. Численное моделирование позволило визуализировать фронт теплового потока. Результаты для моментов времени 1–3 (см. рис.6) представлены на рис.7.

Таким образом, максимум функции теплового потока соответствует условию, когда фронт теплового потока достигает основания корпуса, фронт теплового потока сферический и функция  $F_{hf}^*$  максимальна (момент времени 1). При этом тепловое сопротивление кристалл – корпус как характеристика конструкции прибора определяется максимумом функции потока в интервале 10–1000 мс. Далее (момент времени 2) происходит растекание тепла по корпусу в горизонтальном направлении. При этом в зависимости от геометрии структуры фронт распространения тепла плоский, функция  $F_{hf}^*$  уменьшается. Если фронт имеет цилиндрическую форму, то функция  $F_{hf}^*$  постоянна. Затем (момент времени 3) наблюдаются два процесса: растекание тепла в горизонтальном направлении и уход теплового потока в теплоотвод. При этом фронт теплового потока сферический, функция  $F_{hf}^*$  возрастает.

В зависимости от качества границы корпус – теплоотвод меняется доля теплового потока, идущая в теплоотвод. Поэтому тепловое сопротивление кристалл – корпус, определенное по точке ветвления кривых W и WO, зависит от теплоотвода, теплопрово-

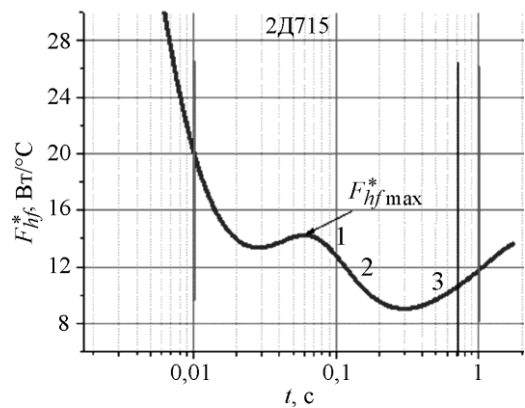


Рис.6. Зависимость функции теплового потока от времени: 1–3 – моменты времени (см. рис. 7)  
Fig.6. Time dependence of the heat flow function  $F_{hf}^*$ : 1–3 – the stage of the time (fig.7)

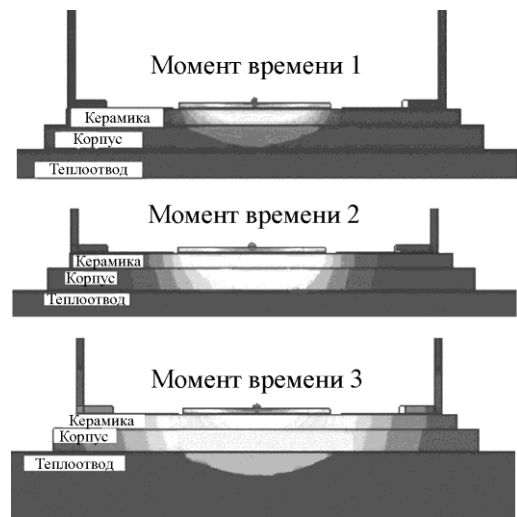


Рис.7. Распределение температуры по образцу для разных моментов времени  
Fig.7. The temperature distribution for different time stages

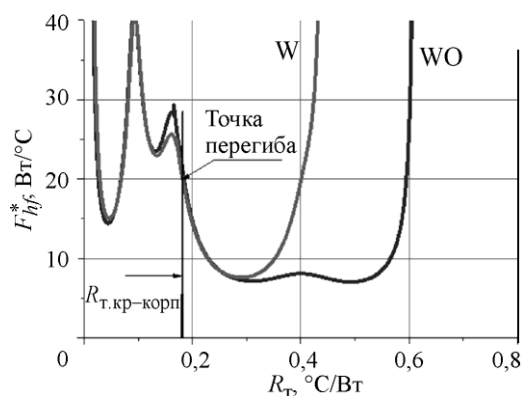


Рис.8. Функция теплового потока  $F_{hf}^*$  диода, смонтированного с пастой (W) и без нее (WO)

Fig.8. The heat flow function  $F_{hf}^*$ , mounted with thermal grease (W) and without (WO)

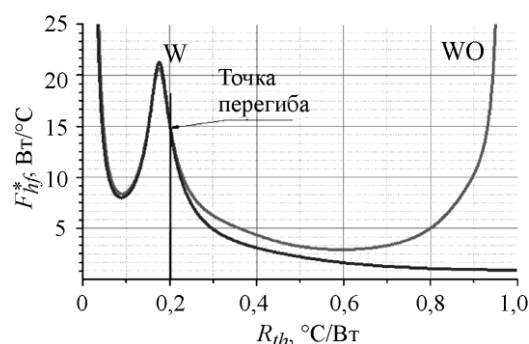


Рис.9. Функция теплового потока  $F_{hf}^*$  для прибора MOSFET

Fig.9. The heat flow function  $F_{hf}^*$  for the MOSFET

дующей пасты и давления прижима. Чем лучше теплоотвод, тем меньше доля тепла, растекающегося горизонтально по корпусу прибора. Экспериментально это наблюдается в разнице длины пологого участка функции  $F_{hf}^*$  на приборах, смонтированных на теплоотводе с пастой (W) и без нее (WO) (рис.8).

Поскольку при переходе от процесса растекания тепла по корпусу к процессу ухода тепла в теплоотвод меняется функция теплового потока, критерием перехода должна быть точка перегиба функции потока  $F_{hf}^*$ . На рис.8 обозначены точка перегиба и соответствующее ей значение теплового сопротивления  $R_{т.кр-корп}$ .

Для проверки предложенного метода рассчитана функция теплового потока для кри-вых охлаждения прибора MOSFET в программе TDIM-Master. Полученная функция для MOSFET с пастой (W) и без нее (WO) приведена на рис.9. Видно, что точка перегиба функции  $F_{hf}^*$  (см. рис.9) практически предшествует ветвлению кривых W и WO. Значение теплового сопротивления в точке перегиба функции  $F_{hf}^*$  одинаково для обеих кривых W и WO. Следовательно, метод не предъявляет строгих требований к теплоотводу.

Предлагаемый метод использован для измерения тепловых сопротивлений кри-сталл – корпус ( $R_{т.кр-корп}$ ) различных приборов. Для этих же приборов найдены значе-ния тепловых сопротивлений кристалл – корпус с помощью метода, описанного в [3]. Для этого в программу TDIM-Master загружались две кривые охлаждения W и WO. Значения, найденные предложенным методом и методом из работы [3], совпадают в пределах погрешности измерения, которая составляет 10%. Это показывает возмож-ность использования рассматриваемого метода для определения тепловых сопротивле-ний кристалл – корпус. Результаты измерений приведены в табл.2.

Таблица 2

Сравнение результатов измерений тепловых сопротивлений приборов предложенным методом и согласно стандарту JEDEC [7, 8]

Table 2

The comparison of the junction-to-case thermal resistances of various devices measuring by proposed method and JEDEC standard [7, 8]

Прибор	$R_{т.кр-корп}$ , °C/Wt	$t$ , мс	$R_{т.кр-корп}$ , °C/Wt (программа TDIM-Master)
2Д715	0,18	60	0,19
2Д212	1,7	120	1,8

2Д213	0,57	180	0,59
2Д2931	0,29	30	0,27
IRFP450	0,21	30	0,20
IRF740	0,84	50	0,80
КТ866А	0,47	40	0,49
2П9109А	1,2	30	1,3

Значения времени  $t$ , за которое тепловой поток в данных приборах доходит до теплоотвода (см. табл.2), соответствуют точке перегиба функции  $F_{hf}^*$  для измеряемых приборов. Для некоторых приборов полученные значения времени подтверждены результатами численного моделирования и могут быть использованы для определения длительности разогревающего импульса в импульсных измерениях  $R_{т. кр-корп.}$

**Заключение.** По результатам исследования можно сделать следующие выводы. Определение кумулятивной теплоемкости из уравнения теплового баланса позволяет найти тепловые функции без процедуры численной деконволюции. Функция теплового

потока  $F_{hf}^* = \frac{1}{C^*} \frac{dC^*}{dR_t}$  дает возможность определить форму фронта теплового потока.

Максимум функции теплового потока  $F_{hf}^*$  в интервале 10–1000 мс свидетельствует о том, что тепловой фронт достиг теплоотвода. Тепловое сопротивление кристалл – корпус можно найти из точки перегиба функции теплового потока  $F_{hf}^*$  в интервале времени 10–1000 мс.

Предлагаемый метод дает те же значения тепловых сопротивлений кристалл – корпус, что и его аналог – Transient Dual Interface Test Method [8], но он проще в обработке результатов, требует одного измерения вместо двух и не предъявляет строгих требований к теплоотводу. Метод может быть использован при выборе измерительного режима, для сравнения конструкций и при анализе брака по тепловому сопротивлению готовых приборов.

### Литература

1. Székely V., Van Bien T. Fine structure of heat flow path in semiconductor devices: measurement and identification method // Solid-State Electronics. – 1988. – Vol. 31. – No. 9. – P. 1363–1368.
2. Comparative thermal and structural characterization of sintered nano-silver and high-lead solder die attachment during power cycling / J. Dai, J. Li, P. Agyakwa et al. // IEEE Tr. on Device and Materials Reliability. – 2018. – Vol. 18. – Iss. 2. – P. 256–265.
3. Poppe A., Székely V. Dynamic temperature measurements: tools providing a look into package and mount structures // Electronics Cooling. – 2002. – Vol. 8. – P. 10–19.
4. Székely V. Identification of RC networks by deconvolution: chances and limits // IEEE Transaction on Circuits and Systems. I. Theory and Applications. – 1998. – Vol. 45. – No. 3. – P. 244–258.
5. Szabo P., Steffens O., Lenz M., Farkas G. Transient junction-to-case thermal resistance measurement methodology of high accuracy and high repeatability // IEEE Transaction on Component and Packing Technologies. 2005. – Vol. 28. – No. 4. – P. 630–636.
6. Schweitzer D., Pape H., Chen L. Transient measurement of the junction-to-case thermal resistance using structure functions: chances and limits // Proc. 24th SEMITHERM. – San Jose. – 2008. – P. 193–199.
7. Schweitzer D. Software TDIM-MASTER: Program for the evaluation of transient dual interface measurements of  $R_{th-JC}$ . – URL: <http://www.jedec.org> (дата обращения: 20.06.2018).
8. JESD51-14. Transient dual interface test method for the measurement of the thermal resistance junction-to-case of semiconductor devices with heat flow through a single path. – 2011. – URL: <https://www.jedec.org/committees/JC-15> (дата обращения: 20.06.2018).
9. T3Ster® - Dynamic Thermal Characterization. – URL: <http://www.mentor.com/products/mechanical/products/t3ster/> (дата обращения: 20.06.2018).

10. Szekely V., Rencz M., Torok S., Ress S. Calculating effective board parameters from transient measurements // *IEEE Tr. On Component and Packing Technology*. – 2002. – Vol. 24. – No. 4. – P. 605–610.
11. Евдокимова Н.Л., Долгов В.В., Моторин А.Ю. Определение теплопроводности материалов, используемых в производстве полупроводниковых приборов // *Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы*. – 2017. – Вып.1(244). – С. 45–52.
12. Lenz M., Striedl G., Fröhler U. Thermal resistance theory and practice. Special Subject Book, January 2000. – URL: <http://www.infineon.com> (дата обращения: 20.06.2018).
13. Евдокимова Н.Л., Ежов В.С., Минин В.Ф. Тепловой анализ полупроводниковых структур // *Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы*. – 2013. – Вып.1(230). – С. 69–75.
14. Евдокимова Н.Л., Ежов В.С., Иванов К.А. Аналитическая тепловая структурная функция. Численное моделирование // *Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы*. – 2015. – Вып.1(235). – С. 27–35.
15. ОСТ 110944–96. Микросхемы интегральные и приборы полупроводниковые. Методы расчета, измерения и контроля теплового сопротивления. – М. 1997. – 110 с.
16. AliceFlow\_v0\_34, registration number No. 2013660267. – URL: <https://github.com/kirill7785/algebraic-multigrid-method> (дата обращения: 20.06.2018).

Поступила в редакцию 27.06.2018 г.; после доработки 31.07.2018 г.; принята к публикации 27.11.2018 г.

**Евдокимова Наталья Львовна** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник АО «НПП «Пульсар» (Россия, 105187, г. Москва, Окружной пр., д. 27), [evdokimova@pulsarnpp.ru](mailto:evdokimova@pulsarnpp.ru)

**Долгов Владимир Викторович** – инженер АО «НПП «Пульсар» (Россия, 105187, г. Москва, Окружной пр., д. 27), [dolgov\\_vv@pulsarnpp.ru](mailto:dolgov_vv@pulsarnpp.ru)

**Иванов Кирилл Андреевич** – инженер-электроник АО «НПП «Пульсар» (Россия, 105187, г. Москва, Окружной пр., д. 27), [kirill7785@pulsarnpp.ru](mailto:kirill7785@pulsarnpp.ru)

### **References**

1. Szekely V., Rencz M., Torok S., Ress S. Calculating effective board parameters from transient measurements. *IEEE Tr. On Component and Packing Technology*, 2002, vol. 24, no. 4, pp. 605–610.
2. Székely V., Tran van Bien. Fine structure of heat flow path in semiconductor devices: measurement and identification method. *Solid-State Electronics*, 1988, vol. 31, no. 9, pp. 1363–1368.
3. Poppe A., Székely V. Dynamic Temperature Measurements: Tools Providing a Look into Package and Mount Structures. *Electronics Cooling*, 2002, vol. 8, pp.10–19.
4. Szekely V. Identification of RC Networks by Deconvolution: Chances and Limits. *IEEE Transaction on Circuits and Systems-I. Theory and Applications*, 1998, vol. 45, no. 3, pp. 244–258.
5. Szabo P., Steffens O., Lenz M., Farkas G. Transient Junction-to-Case Thermal Resistance Measurement Methodology of High Accuracy and High Repeatability. *IEEE Transaction on Component and Packing Technologies*, 2005, vol. 28, no. 4, pp. 630–636.
6. Schweitzer D., Pape H., Chen L. Transient Measurement of the Junction-to-Case Thermal Resistance Using Structure Functions: Chances and Limits. *Proc. 24th SEMITHERM*, San Jose, 2008, pp. 19–199.
7. Schweitzer D. *Software TDIM-MASTER: Program for the evaluation of transient dual interface measurements of Rth-JC*. Available at: <http://www.jedec.org> (accessed: 20.06.2018).
8. JESD51-14 «Transient Dual Interface Test Method for the Measurement of the Thermal Resistance Junction-to-case of Semiconductor Devices with Heat Flow through a Single Path». 2011. Available at: <https://www.jedec.org/committees/JC-15>(accessed: 20.06.2018).
9. T3Ster® - Dynamic Thermal Characterization. Available at: <http://www.mentor.com/products/mechanical/products/t3ster/>, T3Ster® - Dynamic Thermal Characterization (accessed: 20.06.2018).
10. Szekely V., Rencz M., Torok S., Ress S. Calculating effective board parameters from transient measurements. *IEEE Tr. On Component and Packing Technology*, 2002, vol. 24, no. 4, pp. 605–610.
11. N.L. Evdokimova, V.V. Dolgov, A.Yu. Motorin. Definition of heat conductivity of the materials used in production of semiconductor devices. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 2. Poluprovodnikovyye pribory = Electronic Engineering. Ser. 2. Semiconductor devices*, 2017, iss. 1(244), pp. 45–52. (in Russian).

12. Lenz M., Striedl G., Fröhler U. *Thermal Resistance Theory and Practice. Special Subject Book*, 2000. Available at: <http://www.infineon.com> (accessed: 20.06.2018).
13. Evdokimova N.L., Ezhov V.S., Minin V.F. Thermal analysis of semiconductor structures. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 2. Poluprovodnikovyye pribory = Electronic Engineering. Ser. 2. Semiconductor devices*, 2013, iss. 1(230), pp. 69–75. (in Russian).
14. Evdokimova N.L., Ezhov V.S., Ivanov K.A. Analytical thermal structural function. Numerical modeling. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 2. Poluprovodnikovyye pribory = Electronic Engineering. Ser. 2. Semiconductor devices*, 2015, iss. 1(235), pp. 27–35. (in Russian).
15. *OST 11 0944 - 96. Integrated microcircuits and semiconductor devices. Methods of calculation, measurement and control of thermal resistance*. Moscow, 1997. 110 p.
16. *AliceFlow\_v0\_34*, registration number No. 2013660267. Available at: <https://github.com/kirill7785/algebraic-multigrid-method> (accessed: 20.06.2018).

Received 27.06.2018; Revised 31.07.2018; Accepted 27.11.2018.

**Information about the authors:**

**Natalia L. Evdokimova** – Cand. Sci. (Eng.), Senior Scientific Researcher, J&C «S&PE «Pulsar» (Russia, 105187, Moscow, Okrzhnoy proezd, 27), [evdokimova@pulsarnpp.ru](mailto:evdokimova@pulsarnpp.ru)

**Vladimir V. Dolgov** – Engineer, J&C «S&PE «Pulsar» (Russia, 105187, Moscow, Okrzhnoy proezd, 27), [dolgov\\_vv@pulsarnpp.ru](mailto:dolgov_vv@pulsarnpp.ru)

**Kirill A. Ivanov** – Elektrik Engineer, J&C «S&PE «Pulsar» (Russia, 105187, Moscow, Okrzhnoy proezd, 27), [kirill7785@pulsarnpp.ru](mailto:kirill7785@pulsarnpp.ru)

**Вниманию читателей журнала  
«Известия высших учебных заведений. Электроника»**

**Подписку на печатную версию журнала можно оформить:**

- по каталогу «Газеты, журналы» АО Агентство «Роспечать» в любом почтовом отделении. Подписной индекс 47570
- по прямой подписке в АО Агентство «Роспечать»: [www.press.rospress.ru](http://www.press.rospress.ru)
- по каталогу АО «МК-Периодика»: [www.periodicals.ru](http://www.periodicals.ru); [info@periodicals.ru](mailto:info@periodicals.ru)
- по объединенному каталогу «Пресса России» ООО «Агентство «Книга-Сервис» в любом почтовом отделении. Подписной индекс 38934
- через редакцию - с любого номера и до конца года

**Подписку на электронную версию журнала  
можно оформить на сайтах:**

- Научной электронной библиотеки: [www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru)
- ООО «Агентство «Книга-Сервис»: [www.rucont.ru](http://www.rucont.ru); [www.akc.ru](http://www.akc.ru);  
[www.pressa-rf.ru](http://www.pressa-rf.ru)
- ООО «УП Урал-Пресс»: [www.delpress.ru](http://www.delpress.ru)
- ООО «ИВИС»: [www.ivis.ru](http://www.ivis.ru)