УДК 621.382

DOI:10.36845/2073-8250-2020-257-2-4-14

ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АНАЛИТИЧЕСКИХ СТРУКТУРНЫХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ ТЕПЛОВОГО АНАЛИЗА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Н.Л. Евдокимова, В.В. Долгов, А.Ю. Моторин, В.Ф. Синкевич

АО «НПП «Пульсар», 105187, Москва, Окружной пр., 27

Тепловой анализ полупроводниковых приборов включает в себя определение тепловых сопротивлений кристалла, корпуса и теплоотвода отдельно. Сегодня тепловой анализ проводится с использованием тепловых структурных функций, полученных методом численной деконволюции. В этой работе на примерах диодов и транзисторов показана методика теплового анализа и определения теплового сопротивления кристалл–корпус с помощью аналитических структурных функций. Предложенная методика может быть использована для улучшения тепловых параметров приборов и для диагностики брака, где важно знать тепловые сопротивления отдельных элементов конструкции.

Ключевые слова: *тепловое сопротивление кристалл–корпус, структурная функция, теплоёмкость*

Сведения об авторах: *Наталья Львовна Евдокимова, к.т.н., evdokimova@pulsarnpp.ru; Владимир Викторович Долгов, dolgov_vv@pulsarnpp.ru; Андрей Юрьевич Моторин motorin_aj@pulsarnpp.ru; Владимир Фёдорович Синкевич, д.т.н., профессор, sinkevich@pulsarnpp.ru*

EXAMPLES OF USING THE ANALYTICAL STRUCTURAL FUNCTIONS FOR THE THERMAL ANALYSIS OF SEMICONDUCTOR DEVICES

N.L. Evdokimova, V.V. Dolgov, A.Yu. Motorin, V.F. Sinkevich

S&PE Pulsar JSC, 105187, Moscow, Okruzhnoy Pr., 27

Thermal analysis of semiconductor devices includes determination of thermal resistance of the chip, the case and the heatsink separately. Nowadays, the thermal analysis is carried out with the thermal structural functions obtained by the numerical deconvolution method. In this paper we experimentally show a possibility of performing the thermal analysis and determining the junction-to-case thermal resistance with the analytical thermal structure functions applied to certain diodes and transistors. The proposed technique can be used to improve the quality of thermal design and also in the screening tests of semiconductor devices, when it is necessary to know separate thermal resistances of the components.

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

Data on author: *Natalya Lvovna Evdokimova, Ph.D., evdokimova@pulsarnpp.ru; Vladimir Viktorovich Dolgov, dolgov_vv@pulsarnpp.ru; Andrey Yurievich Motorin, motorin_aj@pulsarnpp.ru; Vladimir Fedorovich Sinkevich, Sc.D., Professor, sinkevich@pulsarnpp.ru*

1. Введение

Для надёжной работы полупроводниковых приборов важно обеспечить рабочую температуру, которая не превышала бы максимально допустимое для данного кристалла значение. Тепловое сопротивление между кристаллом прибора и корпусом $R_{t \text{ кр-корп}}$ ограничивает предельные режимы работы прибора при тепловой нагрузке.

Тепловое сопротивление кристалл–корпус $R_{t \text{ кр-корп}}$ определяется через температуру кристалла $T_{\text{кр}}$, температуру корпуса $T_{\text{корп}}$ и разогревающую мощность $P_{\text{н}}$. Тогда тепловое сопротивление кристалл–корпус рассчитывается следующим образом:

$$R_{t \text{ кр-корп}} = \frac{T_{\text{кр}} - T_{\text{корп}}}{P_{\text{н}}}. \quad (1)$$

Вклад в тепловое сопротивление $R_{t \text{ кр-корп}}$ вносят все конструктивные элементы, находящиеся на пути теплового потока от кристалла к теплоотводу. Основными элементами являются тепловые сопротивления кристалла, корпуса и тепловые контактные сопротивления между ними.

Для улучшения тепловых свойств конструкции, а также при анализе брака по тепловому сопротивлению уже готового прибора необходимо выделить и проанализировать вклад отдельных элементов его конструкции. Для этого проводится тепловой анализ прибора, позволяющий найти тепловые сопротивления его отдельных элементов.

В настоящее время используется метод теплового анализа полупроводниковых структур, основанный на применении тепловых структурных функций [1–9]: интегральной (кумулятивной) теплоёмкости C и дифференциальной теплоёмкости $K = dC/dR_t$. В этих работах элементы тепловых RC цепей находятся с помощью

метода NID (Network Identification by Deconvolution) [7].

NID метод описан в стандарте по тепловым испытаниям JESD51-14 [8]. Он даёт возможность анализировать путь теплового потока и определять тепловые сопротивления отдельных элементов конструкции, а также свойства материалов, по которым идёт тепловой поток. Кумулятивная теплоёмкость C была использована в JESD51-14 [8] для определения тепловых сопротивлений кристалл–корпус $R_{t \text{ кр-корп}}$. Автоматическое определение тепловых структурных функций реализовано в приборе T3Ster компании Mentor Graphics [9].

В основу данного метода положена обработка экспериментальной зависимости теплового сопротивления полупроводникового прибора от времени $R_t = f(t)$, получаемая при нагреве либо при охлаждении прибора.

При этом в случае нагрева стандарт JEDEC № 51-14 рекомендует использовать для нагрева и измерения термочувствительного параметра (ТЧП) разные элементы структуры для исключения влияния нагревающего режима на ТЧП.

Недостатком NID метода является необходимость применения настраиваемых сглаживающих фильтров для погашения осцилляций, возникающих в результате численной деконволюции. А также то, что сам алгоритм деконволюции чувствителен к шумам во входных данных, и следовательно, из кривой охлаждения структурная функция не может быть реконструирована достаточно точно [10].

В работе [11], в отличие от [1–10], была введена аналитическая интегральная теплоёмкость C^* , которая определялась из уравнения теплового баланса. Полученное телом за время t количество теплоты (без

учёта потерь тепла за счёт конвекции и теплового излучения) $Q = P_n \cdot t$ равно накопленному телом теплу $Q = C \cdot \Delta T$. Из этого равенства можно найти полную (или интегральную) к моменту времени t теплоёмкость $C^* = P_n \cdot t / \Delta T$. Данное соотношение не учитывает конвекцию, тепловое излучение и потери тепла в теплоотводе (которые необходимо учитывать при длительном нагреве). Обозначив приращение температуры кристалла $\Delta T_{кр}$ и переходное тепловое сопротивление $R_t(t)$, получим полную аналитическую теплоёмкость C^* в виде:

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

Предложенная аналитическая теплоёмкость C^* позволяет анализировать проходящие в структуре тепловые процессы без применения сложного математического анализа и лишена проблем, связанных с процедурой численной деконволюции [10]. В дальнейшем для указания того, что используется аналитическая теплоёмкость, найденная по формуле (2), будем обозначать её со звездочкой C^* . Рассчитанные через неё другие тепловые функции также названы «аналитическими» и отмечены звездочкой (*):

– аналитическая дифференциальная теплоёмкость:

$$K^* = \frac{dC^*}{dR_t}; \quad (3)$$

– аналитическая функция теплового потока (heat flow) F_{hf}^* , меняющая свой характер (убывание, возрастание) в зависимости от формы теплового фронта [14]:

$$F_{hf}^* = \frac{1}{C^*} \frac{dC^*}{dR_t}. \quad (4)$$

Аналитические структурные функции так же, как структурные функции, полученные методом деконволюции, позволяют анализировать путь теплового потока.

В [12] методом численного моделирования рассмотрено поведение аналитических функций для разных конструкций при наличии и при отсутствии радиального растекания. В работе [13] по аналогии с работой [3] аналитические структурные функции в случае радиального растекания теплового потока были использованы для определения теплопроводности пластин. В [14] они были использованы для определения теплового сопротивления кристалл–корпус $R_{t \text{ кр-корп.}}$.

Следует отметить также, что в некоторых конструкциях кривая охлаждения может отличаться от кривой нагрева [15]. Это может повлиять на значения тепловых сопротивлений, найденных из кривой остывания. Во всех экспериментах, описываемых в данной работе, аномального поведения кривой остывания [15] не наблюдалось.

В ходе обсуждения работы [14] нам пришли письма с пожеланиями более подробно описать поведение введенных нами аналитических тепловых структурных функций.

Цель данной работы – показать возможность использования аналитических тепловых структурных функций на простых примерах. В разделе 2 для лучшего восприятия данной работы мы повторили основные моменты измерения кривой остывания и расчёта аналитических структурных функций, подробно описанные в [14, 15]. В разделе III приведены примеры использования аналитических тепловых функций для теплового анализа диодов и транзисторов. В разделе IV в качестве примера рассмотрены определения теплового сопротивления кристалл–корпус с использованием функции теплового потока F_{hf}^* . Выводы даны в разделе V.

2. Методика эксперимента

Аналитические тепловые функции определялись из теплового переходного сопротивления. В соответствии со стандартом JESD51-14 для определения переходного теплового сопротивления $R_t(t)$ [8] на исследуемый прибор подавался разогревающий импульс (мощностью $P_n = U_n \cdot I_n$). По его окончании на измерительном токе снималась кривая остывания – зависимость термочувствительного параметра (ТЧП) от времени. При этом мощность, подаваемая на прибор в режиме измерения, была равна $P_{изм} = U_{изм} \cdot I_{изм}$.

В качестве ТЧП было использовано прямое падение напряжения на $p-n$ переходе $U_{пр}$ при фиксированном измерительном токе. У исследуемых приборов заранее был определён температурный коэффициент термочувствительного параметра (напряжения $U_{пр}$) ТКН. Обработка результатов проводилась в программе Origin 9. Процесс проведения измерений $R_t(t)$ более подробно описан в [14, 15]. Повторим основные моменты:

В результате измерения создаются два массива: массив времен t_i и массив $U_{пр i}$. По изменению $U_{пр i}$ рассчитывается массив изменения температуры ΔT_i на участке остывания (для кривой остывания $\Delta T_i < 0$):

$$\Delta T_i = \frac{U_{пр i} - U_{пр 0}}{TKU}, \quad (5)$$

где $U_{пр 0}$ – это напряжение в начале кривой остывания при $t = 0$. Оно рассчитывается линейной экстраполяцией функции $U_{пр i}(\sqrt{t_i})$ к моменту времени $t = 0$.

Затем рассчитывается массив тепловых сопротивлений кристалл–среда:

$$R_{ti} = \frac{\Delta T_i}{\Delta P}, \quad (6)$$

где $\Delta P = U_{изм} \cdot I_{изм} - U_n \cdot I_n$ (для кривой остывания $\Delta P < 0$).

Далее проводится экспоненциальный фитинг, в результате которого вместо дискретной функции $R_{ti}(t_i)$ получаем аналитическую функцию $R_t(t)$. Проведение фитинга связано с необходимостью сглаживания экспериментальной кривой для последующего дифференцирования функции C^* и получения dC^*/dR_t .

Затем рассчитываются аналитические тепловые функции: кумулятивная теплоёмкость $C^*(2)$, дифференциальная теплоёмкость dC^*/dR_t (3) и функция теплового потока F^*_{hf} (4).

Таким образом, алгоритм обработки экспериментальных данных является следующим:

$$\text{ТЧП} \rightarrow \Delta T_i(5) \rightarrow R_{ti}(6) \rightarrow \text{фитинг} \rightarrow R_t(t) \rightarrow C^*(2) \rightarrow dC^*/dR_t(3) \rightarrow F^*_{hf}(4). \quad (7)$$

3. Пример использования аналитических тепловых функций для теплового анализа полупроводниковых приборов

Аналитические структурные функции могут быть использованы для определения вклада в общее тепловое сопротивление отдельных элементов конструкции полупроводниковых приборов: кристалла, корпуса и теплоотвода. На рис. 1 представлены зависимость аналитической кумулятивной C^* и аналитической дифференциальной теплоёмкости dC^*/dR_t от теплового сопротивления для двух разных диодов. Были выбраны мощный диод 2Д2931 (прямой ток до 30 А) и диод средней мощности 2Д237 (прямой ток до 1 А), имеющие размер кристалла соответственно 56 мм² и 1,8 мм².

По точкам перегиба графика dC^*/dR_t (рис. 1а, в) на обоих диодах можно вы-

делить 3 участка, соответствующих тепловым сопротивлениям кристалла (участок I), корпуса (участок II) и теплоотвода (участок III). Для диода 2Д237: тепловое сопротивление, падающее на кристалле, $-R_{t\text{кр}} = 2,7^\circ\text{C}/\text{Вт}$, на корпусе $-R_{t\text{корп}} = 6,5^\circ\text{C}/\text{Вт}$, на теплоотводе $-R_{t\text{тепл}} = 2,0^\circ\text{C}/\text{Вт}$. Для диода 2Д2931: тепловое сопротивление, падающее на кристалле, $-R_{t\text{кр}} = 0,11^\circ\text{C}/\text{Вт}$, на корпусе $-R_{t\text{корп}} = 0,19^\circ\text{C}/\text{Вт}$, на теплоотводе $-R_{t\text{тепл}} = 0,3^\circ\text{C}/\text{Вт}$.

Следует отметить, что каждый из участков начинается с контактного сопротивления между ним и предыдущим слоем.

Таким образом, метод определения тепловых сопротивлений кристалла, корпуса

и теплоотвода по аналитической дифференциальной структурной функции применим к диодам малой и большой площади. Тепловые сопротивления диода 2Д237 на каждом из участков существенно больше соответствующих тепловых сопротивлений диода 2Д2931, что соответствует разнице их площадей. Кумулятивная теплоёмкость C^* (рис. 1б, г) и дифференциальная теплоёмкость dC^*/dR_t (рис. 1а, в) мощного диода 2Д2931 на каждом из участков в десятки раз больше, чем у диода средней мощности 2Д237. Это соответствует резкому отличию их площадей и масс.

Рассмотрим аналитическую дифференциальную теплоёмкость dC^*/dR_t транзи-

Рис. 1

Аналитическая дифференциальная теплоёмкость dC^*/dR_t
и кумулятивная теплоёмкость C^* диодов

сторов. На рис. 2 приведены аналитические дифференциальные теплоёмкости двух разных транзисторов. В качестве 1-го примера была использована кривая остывания транзистора MOSFET, прилагаемая к программе TDIM-Master [17] (файл MOSFET_tim.txt). Мы обработали её согласно алгоритму (7). В качестве 2-го примера был использован транзистор 2ПЕ301. Полученная после обработки аналитическая дифференциальная теплоёмкость MOSFET и 2ПЕ301 приведена на рис. 2а и 2б соответственно.

Из рис. 2 видно, что в транзисторах (так же, как и в рассмотренных выше диодах) на функции dC^*/dR_t можно выделить участки I, II и III, соответствующие нагреву кристалла, корпуса и теплоотвода. Идентичность тепловых функций диодов и транзисторов подтверждает идентичность их тепловых моделей, включающих источник тепла на поверхности кристалла, сам кристалл, корпус прибора и теплоотвод.

Таким образом, и в диодах и в транзисторах с помощью функции dC/dR_t можно выделить и определить тепловые сопротивления кристалла, корпуса и теплоотвода. Это может быть использовано для ана-

лиза брака по тепловому сопротивлению и для улучшения тепловых параметров конструкции.

Наличие или отсутствие пологого участка ($dC^*/dR_t = \text{const}$) на графике dC/dR_t (рис. 1, 2) зависит от формы фронта теплового потока. Пологий участок соответствует плоскому фронту, то есть постоянной площади теплового потока. При этом для пологого участка выполняется соотношение [11]:

$$K^* = \frac{dC^*}{dR_t} = \frac{\pi}{4} S^2 \lambda c \rho, \quad (8)$$

где λ – теплопроводность, ρ – плотность, c – удельная теплоёмкость.

По определённому из графиков 1 или 2 значению dC^*/dR_t на пологом участке, используя параметры материалов λ , c и ρ (например, [16]), можно определять площадь сечения теплового потока S . Сравнение площади теплового потока с конструктивной площадью контакта позволяет анализировать качество теплового контакта между слоями.

Форма фронта теплового потока определяется геометрией кристалла и корпуса, а также теплопроводностью используемых в конструкции материалов.

Рис. 2

Аналитическая дифференциальная теплоёмкость dC^*/dR_t транзисторов

4. Пример определения теплового сопротивления кристалл–корпус с использованием функции теплового потока F_{hf}^*

Для определения теплового сопротивления кристалл–корпус $R_{t\text{кр-корп}}$ согласно (1) необходимо измерить температуру кристалла $T_{\text{кр}}$, температуру корпуса $T_{\text{корп}}$ и разогревающую мощность P_n . При этом температура корпуса, как правило, измеряется термопарой. Использование термопары на практике приводит к увеличению погрешности измерения, которую трудно оценить. Применение тепловых функций позволяет исключить использование термопары при определении температуры корпуса [8].

Для определения теплового сопротивления кристалл–корпус с помощью аналитических структурных функций нужно сложить тепловые сопротивления кристалла и корпуса: $R_{th-jc} = R_{th\text{ chip}} + R_{th\text{ case}}$ (области I и II на рис. 1 и 2).

Однако в некоторых приборах выделить границу корпус–теплоотвод по зависимости dC^*/dR_{th} сложно (рис. 1в). В работе [14] показано, что для этой цели лучше использовать аналитическую функцию потока F_{hf}^* . При достижении тепловым потоком теплоотвода начинается резкое растекание теплового потока по корпусу. Это соответствует изменению фронта теплового потока (от плоского либо цилиндрического к сферическому). Визуализацию результатов моделирования происходящих тепловых процессов во времени можно посмотреть в видеоролике [18]. При этом максимум функции теплового потока (в интервале 10-1000 мс) соответствует достижению тепловым потоком теплоотвода. Растеканию тепла по корпусу соответствует либо убывание функции потока (в случае плоского фронта растекания), либо постоянное зна-

чение функции потока (когда фронт растекания близок к цилиндрическому). Уходу тепла в теплоотвод соответствует возрастание функции потока. Поскольку при переходе от процесса растекания тепла по корпусу к уходу тепла в теплоотвод меняется функция теплового потока, критерием теплового сопротивления может быть точка перегиба функции потока. Более подробно функция потока рассмотрена в [14].

На рис. 3 приведены примеры функции dC^*/dR_t и функции потока F_{hf}^* для разных приборов. Тепловое сопротивление кристалл–корпус $R_{t\text{кр-корп}}$ (рис. 3) было определено по точке перегиба функции F_{hf}^* . Для сравнения на этих же приборах мы определили тепловые сопротивления кристалл–корпус по стандарту JESD51-14 [8]. Согласно данному стандарту, на одном и том же полупроводниковом приборе снимают две кривые остывания, монтируя прибор с пастой (W) и без пасты (WO) между корпусом и теплоотводом. Затем обе кривые остывания загружают в программу TDIM-Master [17]. При этом тепловое сопротивление кристалл–корпус определяется в программе [17] по точке расслоения переходных тепловых сопротивлений, снятых с пастой и без пасты между корпусом и теплоотводом. Полученные значения тепловых сопротивлений, определённые по стандарту JESD51-14 [8] в программе TDIM-Master [17], указаны на рис. 3 под графиком функции $F_{hf}^*(R_t)$.

Из рис. 3 видно, что функция F_{hf}^* имеет экстремумы, а функция dC^*/dR_{th} их не имеет. Поэтому разделять на участки и определять тепловое сопротивление кристалл–корпус лучше по функции F_{hf}^* , чем по функции dC^*/dR_{th} . Полученные значения тепловых сопротивлений кристалл–корпус, найденные с применением

Рис. 3
Определение $R_{t \text{ кр-корп}}$ по функции теплового потока F_{hf}^*

аналитической функции потока, близки к значениям тепловых сопротивлений, найденных по стандарту JESD51-14 [8]. При этом данная методика по сравнению с [8] сокращает время измерения (так как нужно снять только одну кривую остывания, а не

две W и WO) и менее чувствительна к качеству теплоотвода [14]. Поэтому тепловое сопротивление кристалл–корпус удобно определять с помощью функции теплового потока F_{hf}^* .

5. Выводы

Использование аналитических структурных функций позволяет определить отдельно тепловое сопротивление кристалла, корпуса и теплоотвода.

По аналитическим функциям dC^*/dR_t и F^*_{hf} можно определить тепловое сопротивление кристалл–корпус диодов, транзисторов и микросхем без использования термпары для измерения температуры корпуса.

Функция F^*_{hf} более наглядно позволяет находить границу кристалл–корпус приборов, чем функция dC^*/dR_t .

Литература

1. V. Székely, Tran van Bien. Fine structure of heat flow path in semiconductor devices: measurement and identification method. *Solid-State Electronics*, 1988, v. 31, N 9, pp. 1363-1368.
2. A. Poppe, V. Székely. Dynamic Temperature measurements: Tools providing a look into package and mount structures. *Electronics Cooling*, 2002. <https://www.electronics-cooling.com/2002/05/dynamic-temperature-measurements-tools-providing-a-look-into-package-and-mount-structures/>
3. V. Székely, M. Rencz, S. Torok, S. Ress. Calculating effective board parameters from transient measurements. – *IEEE Transactions on Component and Packing Technologies*, 2002, v. 24(4), 2002, pp. 605-610.
4. M. Rencz, V. Székely. Structure function evaluation of stacked dies. *Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium*, April 2004.
5. A. Poppe, G.Farkas, V. Székely et al. Multi-domain simulation and measurement of power LED-s and power LED assemblies. *Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium*, April 2006, pp.191-198.
6. J. Dai, J. Li, P. Agyakwa, M. Corfield, C. Johnson. Comparative thermal and structural characterization of sintered nano-silver and high-lead solder die attachment during power cycling. – *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, June 2018, vol.18, NO.2, pp. 256-264.
7. V. Székely. Identification of RC networks by deconvolution: chances and limits. *IEEE Transaction on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Applications*, Mar 1998, v.45, Issue 3, pp. 244-258.
8. 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. *JESD51-14*. Nov 2010.
9. T3Ster®: сайт. – URL: <http://www.mentor.com/products/mechanical/products/t3ster/>
10. D. Schweitzer, H. Pape, L. Chen. Transient Measurement of the junction-to-case thermal resistance using structure functions: chances and limits. *Twenty-fourth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium*. 2008.
11. Евдокимова, Н.Л. Тепловой анализ полупроводниковых структур / Н.Л. Евдокимова, В.С. Ежов, В.Ф. Минин // *Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы*. – 2013. – Вып. 1 (230). – С. 69-75.
12. Евдокимова, Н.Л. Аналитическая тепловая структурная функция. Численное моделирование / Н.Л. Евдокимова, В.С. Ежов, К.А. Иванов // *Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы*. – 2015. – Вып. 1 (235). – С. 27-35.
13. Евдокимова, Н.Л. Определение теплопроводности материалов, используемых в производстве полупроводниковых приборов / Н.Л. Евдокимова, В.В. Долгов, А.Ю. Моторин // *Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы*. – 2017. – Вып. 1 (244). – С. 45-52.
14. Евдокимова, Н.Л. Определение теплового сопротивления кристалл–корпус из его кривой охлаждения / Н.Л. Евдокимова, В.В. Долгов, К.А. Иванов // *Известия высших учебных заведений. Электроника*. – 2019. – Т. 24. – № 1. – С. 30-41.

15. Евдокимова, Н.Л. Сравнение переходных тепловых сопротивлений полупроводниковых приборов, полученных методами нагрева и остывания / Н.Л. Евдокимова, В.В. Долгов, К.А. Иванов, А.Ю. Моторин, В.С. Ежов // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2018. – Вып. 4 (251). – С. 37-45.
16. Kaye, G.W.C. and Laby, T.H. (1995) Tables of Physical & Chemical Constants. 16th Edition, NPL (National Physical Laboratory). URL: <https://www.npl.co.uk/resources>
17. D. Schweitzer, Software TDIM-MASTER: Program for the evaluation of transient dual interface measurements of Rth-JC. This software serves as reference and example implementation of the algorithms described in standard and can be downloaded from the JEDEC homepage: <http://www.jedec.org>.
18. Сайт. –URL: <https://yadi.sk/i/uqduILVHb1Mnsg>.
5. Poppe A., Farkas G., Székely V., et al. Multi-domain simulation and measurement of power LED-s and power LED assemblies. Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, April, 2006, pp.191-198.
6. Dai J., Li J., Agyakwa P., Corfield M., Johnson C. Comparative thermal and structural characterization of sintered nano-silver and high-lead solder die attachment during power cycling. – IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, June, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 256-264.
7. Szekely V. Identification of RC networks by deconvolution: chances and limits. IEEE Transaction on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Applications, March, 1998, vol. 45, iss. 3, pp. 244-258.
8. 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. JEDEC Committee, JESD51-14, 2010, available at: <https://www.jedec.org/standards-documents/docs/jesd51-14-0>
9. Website T3Ster®. Available at: <http://www.mentor.com/products/mechanical/products/t3ster/>
10. Schweitzer D., Pape H., Chen L. Transient Measurement of the junction-to-case thermal resistance using structure functions: chances and limits. 24th Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 2008.
11. Evdokimova N. L., Ezhov V. S., Minin V. F. Teplovoy analiz poluprovodnikovyykh struktur [Thermal analysis of semiconductor structures]. *Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices*, 2013, iss. 1 (230), pp. 69-75.
12. Evdokimova N. L., Ezhov V. S., Ivanov K. A. Analiticheskaya teplovaya strukturnaya funktsiya. Chislennoye modelirovaniye [Analytical thermal structural function. Numerical simulation]. *Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices*, 2015, iss. 1 (235), pp. 27-35.
13. Evdokimova N. L., Dolgov V. V., Motorin A. Yu. Opredeleniye teploprovodnosti materialov,

References

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, pp. 1363-1368.
2. Poppe A., Székely V. Dynamic Temperature measurements: Tools providing a look into package and mount structures. *Electronics Cooling*, 2002, available at: <https://www.electronics-cooling.com/2002/05/dynamic-temperature-measurements-tools-providing-a-look-into-package-and-mount-structures/>
3. Szekely V., Rencz M., Torok S., Ress S. Calculating effective board parameters from transient measurements. *IEEE Transactions on Component and Packing Technologies*, 2002, vol. 24(4), pp. 605-610.
4. Rencz M., Székely V. Structure function evaluation of stacked dies. Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, April, 2004.

- ispol'zuyemykh v proizvodstve poluprovodnikovyykh priborov [Determination of thermal conductivity of the materials used in manufacturing of semiconductor devices]. *Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices*, 2017, iss. 1 (244), pp. 45-52.
14. Evdokimova N. L., Dolgov V. V., Ivanov K. A. Opredeleniye teplovogo soprotivleniya kristall–korpus iz yego krivoy okhlazhdeniya [Determination of the thermal resistance of a junction–case by its cooling curve]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektronika*, 2019, vol. 24, no. 1, pp. 30-41.
15. Evdokimova N. L., Dolgov V. V., Ivanov K. A., Motorin A. Yu., Ezhov V. S. Sravneniye perekhodnykh teplovykh soprotivleniy poluprovodnikovyykh priborov, poluchennykh metodami nagreva i ostyvaniya [Transient thermal resistances of semiconductor devices, obtained by the heating and cooling methods]. *Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices*, 2018, iss. 4 (251), pp. 37-45.
16. Kaye, G.W.C., Laby, T.H. Tables of Physical & Chemical Constants. 16th Edition. National Physical Laboratory, 1995, available at: <https://www.npl.co.uk/resources>
17. Schweitzer D., Software TDIM-MASTER: Program for the evaluation of transient dual interface measurements of Rth-JC. JEDEC Committee, available at: <http://www.jedec.org>
18. Website, available at: <https://yadi.sk/i/uqduILVHb1Mnsg>