УДК 621.382.017.7

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

АО «НПП «Пульсар», Россия, Москва, 105187, Окружной проезд, д. 27

Тепловое сопротивление полупроводниковых приборов определяет их способность рассеивать тепло в рабочем режиме. Для измерения переходного теплового сопротивления полупроводникового прибора используют метод нагрева либо метод остывания. В данной работе экспериментально и методом численного моделирования рассмотрены отличия метода остывания от метода нагрева. Найдено, что кривая остывания может отличаться от кривой нагрева наличием аномального участка, на котором наблюдается резкое снижение скорости остывания. Установлено, что причина аномалии связана с латеральным потоком тепла, приводящим к накоплению тепла в некоторых элементах конструкции. Работа может быть использована при определении теплового сопротивления кристалл–корпус и при тепловом анализе полупроводниковых приборов по их кривой остывания.

Ключевые слова: измерение теплового сопротивления, тепловая структурная функция, теплоёмкость

Сведения об авторах: Наталья Львовна Евдокимова, evdokimova@pulsarnpp.ru; Владимир Викторович Долгов, dolgov_vv@pulsarnpp.ru; Кирилл Андреевич Иванов, ivanov_ka@pulsarnpp.ru; Моторин Андрей Юрьевич, motorin_aj@pulsarnpp.ru; Владимир Самуилович Ежов, v_ejov@pulsarnpp.ru

COMPARISON OF TRANSIENT THERMAL RESISTANCES OF SEMICONDUCTOR DEVICES, OBTAINED BY HEATING AND COOLING METHODS

N.L. Evdokimova, V.V. Dolgov, K.A. Ivanov, A.Yu. Motorin, V.S. Ezhov

S&PE Pulsar JSC, Russia, Moscow, 105187, Okruzhnoy pr., 27

Thermal resistance of semiconductor devices defines their ability to dissipate heat during operation. To measure transient thermal resistance of semiconductor device one could use the heating method or the cooling method. In this paper we compare these methods performing experimental measurements and numerical modeling. It was discovered that the cooling curve could differ from heating curve by the presence of anomalous area, where sharp decrease in the cooling rate is observed. It was established that the discovered anomaly is due to the lateral heat flow, causing the accumulation of heat in some elements of device structure. This paper could be used in determining the junction-to-case thermal resistance and also in thermal analysis of semiconductor devices by their cooling curve.

Keywords: thermal resistance measurement, thermal structure function, thermal capacity

Authors: Natalya Lvovna Evdokimova, evdokimova@pulsarnpp.ru; Vladimir Viktorovich Dolgov, dolgov_vv@pulsarnpp.ru; Kirill Andreevich Ivanov, ivanov_ka@pulsarnpp.ru; Motorin Andrey Yurievich, motorin_aj@pulsarnpp.ru; Vladimir Samuilovich Ezhov, v_ejov@pulsarnpp.ru

Введение

Тепловое сопротивление полупроводниковых приборов определяет их способность рассеивать тепло в рабочем режиме.

Для определения теплового сопротивления полупроводниковых приборов широко используют переходные измерения температуры кристалла прибора $T_{кр}(t)$ [1, 2]. Зависимость $T_{кр}(t)$ для разных начальных условий эксперимента называется кривой нагрева либо

кривой остывания. При рассеянии прибором мощности нагрева P_H переходное тепловое сопротивление кристалл–среда $R_{t\text{кр-ср}}(t)$ определяют из зависимости температуры кристалла полупроводникового прибора от времени $T_{кр}(t)$ по формуле:

$$R_{t\text{кр-ср}}(t) = \frac{T_{кр}(t) - T_{кр}(t=0)}{P_H}, \quad (1)$$

где $T_{кр}(t=0)$ – это температура кристалла в начальный момент времени.

Для получения $T_{кр}(t)$ на прибор подают разогревающую мощность и по термочувствительному параметру ТЧП определяют температуру кристалла. При этом зависимость $T_{кр}(t)$ снимают либо при подаче разогревающей мощности (кривая нагрева), либо после её отключения на участке, когда прибор охлаждается (кривая остывания).

В работе [3] изложена методика получения кривой нагрева и кривой остывания. В ней приведены экспериментальные данные о влиянии конвекции воздуха и смены теплоотвода на переходное тепловое сопротивление, полученное из кривой нагрева. Переходные тепловые сопротивления, измеренные методом нагрева при разных окружающих условиях, совпадали до времён порядка 1 с, а далее наблюдалось разветвление зависимостей $R_{т\text{кр-ср}}(t)$ при сохранении формы кривой. Причём на всем временном интервале большему статическому сопротивлению соответствовало большее динамическое сопротивление.

В работе [4] приведены кривые нагрева и остывания. Из приведённых зависимостей (рис. 10, [4]) следует, что все кривые нагрева совпали, а кривые остывания и значения статического сопротивления имели существенный разброс. Авторы [4] объяснили полученный разброс разными неконтролируемыми условиями при проведении эксперимента (плата, тепловая паста, сила прижима и т. д.). Важным выводом является установленное в работе принципиальное отличие метода нагрева “heating curve” от метода остывания “cooling curve”, причину которого авторы объясняют разными начальными условиями. При нагревании “heating curve” начальные температуры одинаковы и равны температуре среды. При остывании же из-за разброса тепловых сопротивлений при монтаже прибора на теплоотвод прибор нагревается до разных температур, следовательно, начальные температуры для разных “cooling curves” оказываются разными. Авторы предложили коррекцию кривой остывания для последующих расчётов $R_{т\text{кр-ср}}(t)$ смещением кривых остывания к среднему значению до их полного совпадения в интервале 0,5-2 мс.

Однако прямого сравнения переходных тепловых сопротивлений $R_{т\text{кр-ср}}(t)$, полученных из кривых остывания и нагрева, в литературе нами не найдено.

Поэтому целью данной работы является проведение такого сравнения.

Экспериментальные исследования

Определение температурного коэффициента ТЧП

При нагреве и остывании в качестве ТЧП было использовано прямое падение напряжения на p - n переходе U_{pn} , измеренное на фиксированном измерительном токе.

Перед проведением измерений проводили калибровку ТЧП, то есть снимали зависимость U_{pn} от температуры в термокамере для двух разных значений измерительного тока $I_{изм}$, соответствующих участкам нагрева ($I_{изм1}$) и остывания ($I_{изм2}$). Измерение температурного коэффициента ТЧП проводилось в импульсном режиме на измерителе теплового сопротивления [5]. Длительность импульсов $I_{изм}$ была выбрана такой, чтобы не происходил саморазогрев прибора в ходе калибровки (1 мс). В результате калибровки определялся температурный коэффициент прямого падения напряжения на диоде $TKH = \Delta U_{pn} / \Delta T$.

Методика измерения теплового сопротивления

Кривая нагрева и кривая остывания снимались в одном процессе измерения, который состоял из двух стадий:

1. На прибор в течение заданного времени (4 с) подавался разогревающий ток I_n и измерялась зависимость прямого падения напряжения на p - n переходе от времени $U_{pn}(t)$ с шагом 1 мс. Получалась кривая нагрева.

2. По окончании действия разогревающего тока на прибор подавался измерительный ток $I_{изм}$ и измерялась зависимость прямого падения напряжения на p - n переходе от времени $U_{pn}(t)$. Начальный участок до 100 мс снимался с шагом 10 мкс, второй участок до 50 с снимался с шагом 10 мс. Получалась кривая остывания.

Изменения $\Delta U_{pn} = U_{pn}(t) - U_{pn}(0)$ конвертировались в изменение температуры кристалла $\Delta T_i = \Delta U_{pn} / TKH$. При этом для участков нагрева и остывания использовалось свое значение ТКН.

Таким образом, в одном процессе измерения в одинаковых условиях (теплоотвод, сила прижатия к теплоотводу и среда) были

получены зависимости изменения температуры кристалла от времени на стадии нагрева $\Delta T_{кр.нагр}(t)$ (кривая нагрева) и на стадии остывания $\Delta T_{кр.ост}(t)$ (кривая остывания) прибора.

Результаты эксперимента

Ниже приведены результаты экспериментального исследования диода 2Д715. Внешний вид исследуемого диода показан на рис. 1.

Рис. 1

Внешний вид диода:

- 1 – кристалл; 2 – керамика;
- 3 – корпус; 4 – выводы

ТКН данного прибора на участке нагрева ($I_{изм1} = 10$ А) был равен $1,6$ мВ/°С, на участке остывания ($I_{изм1} = 100$ мА) – $2,5$ мВ/°С. Для участков нагревания и остывания по формуле (1) было построено переходное тепловое сопротивление кристалл–среда. График приведен на рис. 2.

Рис. 2

Переходное тепловое сопротивление диода 2Д715, полученное из кривой нагрева $R_{t,нагр}(t)$ и кривой остывания $R_{t,ост}(t)$

Из графика, приведённого на рис. 2, видно, что существует интервал времени, где переходные сопротивления $R_{t,нагр}(t)$ и $R_{t,ост}(t)$ не совпадают (кривые разделяются, расслаиваются). Причём поведение кривой $R_{t,ост}(t)$ является аномальным. Аномальность заключается в том, что при $t > 20$ мс тепловое сопротивление $R_{t,ост}(t)$ становится меньше, чем $R_{t,нагр}(t)$. Величина расслоения на разных приборах была разной.

Для выяснения причин отличий $R_{t,ост}(t)$ и $R_{t,нагр}(t)$ у диода 2Д715 было проведено численное моделирование процессов нагрева и остывания.

Численное моделирование

Описание модели

Для расчёта была использована программа AliceFlow_v0_34 [6].

Программа AliceFlow_v0_34 предназначена для расчёта поля температур в трёхмерных твердотельных моделях. В ряде случаев учитывается конвективный перенос теплоносителя. Учитываются нелинейности различной природы. Поддерживается расчёт тепловой переходной характеристики. Для ускорения вычислений используется алгебраический многосеточный метод. Для ускорения нестационарных расчётов реализованы адаптивные локально измельчённые сетки (АЛИС).

Граничное условие, заданное на основании теплоотвода: температура на основании теплоотвода была равна температуре среды $T = T_{ср}$. Теплоотвод моделировался медным бруском ($50 \times 50 \times 30$ мм). Между основанием корпуса и теплоотводом был слой термопасты КПТ-8 толщиной 50 мкм. Шероховатости контактируемых поверхностей (кристалла, керамики, корпуса и теплоотвода) не учитывались. Их границы считались идеально гладкими и прилегающими друг к другу без зазоров, т. е. контактное тепловое сопротивление считалось равным нулю.

При этом основная ошибка моделирования заключалась в невозможности промоделировать неровности контактирующих поверхностей, которые необходимы для расчёта контактных тепловых сопротивлений.

Используемая в расчёте модель прибора 2Д715 показана на рис. 3.

Рис. 3

Модель диода 2Д715:

1 – кристалл; 2 – керамика; 3 – корпус; 4 – выводы; 5 – паста; 6 – теплоотвод

Сравнение нагрева и остывания

Полученное в результате моделирования превышение температуры кристалла $T_{кр}$ над температурой среды $T_{сп}$, то есть перегрев кристалла $\Delta T_{кр} = T_{кр} - T_{сп}$ в зависимости от времени (для режимов нагрева и остывания) показан на рис. 4.

Рис. 4

Перегрев кристалла диода 2Д715 в режимах нагрева и остывания

Из рис. 4 следует, что кривая нагрева $\Delta T_{кр.наг}(t)$ и кривая остывания $\Delta T_{кр.ост}(t)$ отличаются. На участке остывания зависимость $\Delta T_{кр.ост}(t)$ имеет аномалию: в некоторой временной области скорость остывания $\Delta T_{кр.ост}(t)$ начинает уменьшаться. Полученные по (1) переходные тепловые сопротивления для участков нагрева $R_{t,кр.наг}(t)$ и остывания $R_{t,кр.ост}(t)$ приведены на рис. 5.

Рис. 5

Результаты моделирования $R_{t,кр.наг}(t)$ и $R_{t,кр.ост}(t)$

Из рис. 5 видно, что в некотором временном интервале кривые нагрева и остывания не совпадают (расслаиваются). Причём на участке расслаивания значения переходного теплового сопротивления, полученные из кривой остывания $R_{t, \text{кр.ост}}(t)$, ниже, чем полученные из кривой нагрева $R_{t, \text{кр.наг}}(t)$, т. е. расчётные данные подтвердили экспери-

ментально наблюдаемое расслаивание переходных тепловых сопротивлений (рис. 2). Это говорит о том, что расслаивание не случайно.

Для того, чтобы понять причину расслаивания, мы изменили конструкцию при моделировании, убрав массивные выводы диода. Новая конструкция показана на рис. 6.

Рис. 6

Модель диода 2Д715 без выводов:

1 – кристалл; 2 – керамика; 3 – корпус; 4 – паста; 5 – теплоотвод

Зависимость перегрева от времени для структуры без выводов приведена на рис. 7. Сравнение рис. 4 и 7 показало, что удаление из конструкции массивных выводов при-

водит к полному исчезновению аномалии кривой остывания. При этом кривая $R_{t, \text{кр.ост}}(t)$ полностью совпала с $R_{t, \text{кр.наг}}(t)$ (т. е. расслаивание исчезло).

Рис. 7

Перегрев кристалла диода 2Д715 без выводов в режимах нагрева и остывания

Влияние теплоотвода на кривую остывания

Для прибора 2Д715 с выводами (рис. 3) было промоделировано также влияние

свойств теплоотвода на появление аномалии, отмеченной на рис. 4. Было просчитано три варианта:

– в первом случае (как реально в эксперименте) между корпусом прибора и медным теплоотводом ($\lambda_{\text{Cu}} = 390 \text{ Вт/м } ^\circ\text{C}$) был слой пасты КПТ-8 ($\lambda = 0,7 \text{ Вт/м } ^\circ\text{C}$) толщиной 50 мкм;

– во втором (виртуальном) случае паста и теплоотвод имели большую теплопроводность $\lambda = 2000 \text{ Вт/м } ^\circ\text{C}$ (как у алмаза);

– в третьем случае был идеальный теплоотвод, и граничное условие $T = \text{const}$ было задано непосредственно на основании корпуса прибора.

Результаты расчёта приведены на рис. 7.

Рис. 8

Влияние теплоотвода на перегрев кристалла: 1 – реальный теплоотвод; 2 – виртуальный теплоотвод с высокой теплопроводностью ($\lambda = 2000 \text{ Вт/м } ^\circ\text{C}$);

3 – идеальный теплоотвод

Из рис. 8 видно, что появление аномалии кривой остывания зависит от качества теплоотвода. Улучшение качества теплоотвода снижает размер аномалии.

Обсуждение результатов

Сравнение нагрева и остывания. Аномалия кривой остывания

Для лучшего понимания причины аномального поведения кривой остывания можно посмотреть визуализацию происходящих тепловых процессов во времени [7]. Из видео [7] следует, что процесс остывания отличается от процесса нагрева. Рассмотрим скриншоты видео [7] для процесса нагрева и остывания.

На рис. 9 показано распределение плотности мощности теплового потока P по структуре для моментов времени на стадии

нагрева (а) и остывания (б). Расчёт P проводился по формуле:

$$P = \lambda * \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^2}. \quad (2)$$

Значения цветовой шкалы на рис. 9 равны $10\log(P)$.

а)

б)

Рис. 9

Скриншот плотности теплового потока диода при нагреве и остывании:
а – нагрев; б – остывание

На стадии нагрева в любой момент времени плотность теплового потока максимальна в области кристалла (рис. 9а). Фронт теплового потока соответствует смене цвета. Тепловой поток распространяется перпендикулярно фронту.

На стадии остывания было обнаружено, что есть временной интервал, в котором плотность теплового потока в области выводов выше, чем в кристалле. Такой момент отображён на рис. 9 б, из которого видно, что при остывании

тепловой поток от выводов идёт не только к теплоотводу, но и к кристаллу. При этом остывание кристалла должно замедляться. Именно этим объясняется появление аномалии (рис. 4 и 8) и её исчезновение при удалении из расчётной модели выводов (рис. 7).

То есть выводы диода являются своеобразным аккумулятором тепла (это теплоёмкость выводов). Аккумуляторы – это ёмкости тепла, заряжающиеся латеральным тепловым потоком при нагреве и разряжающиеся при остывании.

При остывании такой аккумулятор начинает отдавать кристаллу накопленное при нагреве тепло, замедляя его остывание. В результате мы видим аномалию на кривой остывания (рис. 4 и 8). Такими аккумуляторами тепла могут быть другие массивные элементы, находящиеся вне пути теплового потока к теплоотводу (крышка, рамка и т. д.). Если тепловой поток идёт только к теплоотводу и латеральный поток отсутствует, то аккумуляторов может не быть вообще.

Отсюда следует: чем сильнее нагрет аккумулятор, тем больше аномалия кривой остывания. На нагрев аккумулятора влияют физические и механические свойства слоёв прибора и теплоотвода. На рис. 8 мы видим, что чем хуже теплоотвод, тем больше перегрев кристалла. При этом чем сильнее нагрет аккумулятор, тем медленнее остывает кристалл, и следовательно, меньше будет значение переходного теплового сопротивления. Получается парадокс: в некотором временном интервале ухудшение теплоотвода приводит к уменьшению переходного теплового сопротивления. Если на одном графике построить две переходные тепловые характеристики, снятые на одном приборе при разных условиях остывания, то наблюдается своеобразная «петля». Такую «петлю» $R_{t, \text{кр.ост}}(t)$ мы неоднократно наблюдали на многих приборах.

Влияние теплоотвода на кривую остывания

На рис. 10 приведено экспериментальное сравнение переходного теплового сопротивления $R_{t, \text{кр.ост}}(t)$ диода 2Д212, измеренного при разных условиях остывания. В первом случае диод остывал на медном теплоотводе (обозначен как Cu), во втором случае диод остывал в воздухе (обозначен как Air).

Рис. 10

Переходная тепловая характеристика диода 2Д212 при его остывании на воздухе и на медном теплоотводе

Из рис. 10 видно, что есть некоторый временной интервал, где тепловое сопротивление, снятое при остывании прибора на воздухе, ниже, чем снятое при его остывании на медном теплоотводе. В этом временном интервале наблюдается своеобразная «петля». В то время как для переходных тепловых сопротивлений, полученных методом нагрева $R_{t, \text{кр.наг}}(t)$ для одного и того же прибора при тех же условиях, «петли» не было. В любой момент времени – чем хуже был теплоотвод, тем больше было переходное тепловое сопротивление.

Появление петли затрудняет определение теплового сопротивления кристалл–корпус $R_{t, \text{кр-корп}}$ согласно стандарту JE51-14 [2] по точке расслоения (separation point) переходных сопротивлений, снятых с пастой между корпусом и теплоотводом и без неё. Значение теплового сопротивления кристалл–корпус $R_{t, \text{кр-корп}}$, определённое методом [2], было равно $1,7 \text{ } ^\circ\text{C/Bt}$ (рис. 10). Для разных термопаст между корпусом и теплоотводом точка расслоения смещается, при этом меняется значение $R_{t, \text{кр-корп}}$. То есть аномалия кривой остывания приводит к неоднозначности определения $R_{t, \text{кр-корп}}$ методом [2].

Аномалия кривой остывания может отразиться также на значениях составляющих элементов теплового сопротивления (кристалл, керамика, корпус), определяемых по переходному тепловому сопротивлению $R_{t, \text{кр.ост}}(t)$ с использованием структурных

функций, полученных методом численной деконволюции C , $K = dC/dR$ [8–12] и аналитическим методом [11, 13, 14].

Выводы

1. Кривая остывания может отличаться от кривой нагрева.
2. На кривой остывания может быть участок, где резко замедляется скорость остывания. Причина связана с наличием аккумуляторов тепла, которые отдают тепло кристаллу при остывании.
3. Переходные сопротивления $R_{t, \text{кр.наг}}(t)$ и $R_{t, \text{кр.ост}}(t)$, рассчитанные по кривой нагрева и остывания, при наличии аккумуляторов разделяются в некотором временном интервале. Причём в этом интервале $R_{t, \text{кр.ост}}(t) < R_{t, \text{кр.наг}}(t)$. Чем хуже теплоотвод, тем больше тепла накапливает аккумулятор.
4. Наличие аккумуляторов приводит к появлению на графике переходных тепловых сопротивлений (полученных при разных условиях остывания) области, для которой у худшего теплоотвода наблюдаются меньшие значения теплового сопротивления («петля»). Появление петли затрудняет определение теплового сопротивления кристалл–корпус по точке расслоения кривых $R_{t, \text{кр}}(t)$, снятых при изменении термопасты между корпусом и теплоотводом [2].
5. Вопрос влияния описанного выше эффекта на определение тепловых сопротивлений отдельных элементов полупроводникового прибора по кривой остывания требует дальнейшего рассмотрения.

Литература

1. ОСТ 11 0944 - 96 Микросхемы интегральные и приборы полупроводниковые. Методы расчёта, измерения и контроля теплового сопротивления.
2. 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.
3. www.thermengr.com, Bernie Siegal, An Introduction to Diode Thermal Measurements, 2009, Thermal Engineering Associates, Inc. (TEA).
4. <http://onsemi.com>, prepared by: Roger Paul Stout, PEON Semiconductor, AND8215/D Semiconductor Package Thermal Characterization, April 2006, Semiconductor Components Industries, LLC.
5. Долгов В.В., Ежов В.С., Моторин А.Ю. Современный программно-аппаратный измерительный комплекс для контроля теплофизических и электрических параметров ППП и их ОБР // Твёрдотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА «Пулсар-2008» // Материалы VII научно-технической конференции (7-8 октября 2008 г., Москва). – С. 142-144.
6. AliceFlow_v0_34, registration number No. 2013660267, <https://github.com/kirill7785/algebraic-multigrid-method>.
7. <https://yadi.sk/i/uqduLVHb1Mnsg>.
8. D. Schweitzer, Software TDIM-MASTER: Program for the evaluation of transient dual interface measurements of Rth-JC, <http://www.jedec.org>.
9. V. Szekely. Identification of RC Networks by Deconvolution: Chances and Limits. IEEE Transaction on Circuits and Systems-I. Theory and Applications, v.45, N3, 1998, p. 244-258.
10. V. Szekely, M. Rencz, S. Torok, S. Ress. Calculating effective board parameters from transient measurements. – IEEE Tr. On Component and Packing Technology, v. 24, N4, 2002, p. 605-610.
11. A. Poppe, V. Székely. Dynamic Temperature Measurements: Tools Providing a Look into Package and Mount Structures. - Electronics Cooling, v.8, 2002, p.10-19.
12. Determination of the Junction-to-Case Thermal Resistance from one transient cooling curve. N.L. Evdokimova, V. V. Dolgov, K. A. Ivanov DOI: 10.13140/RG.2.2.12459.13605.
13. Евдокимова Н.Л., Ежов В.С., Минин В.Ф. Тепловой анализ полупроводниковых структур. // Электронная техника. Серия 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. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2015. – Вып. 1 (235). – С. 27-35.

References

1. Standard 11 0944 – 96, Integrated circuits and semiconductor devices. Methods of simulation, measurements and control of the thermal resistance.
2. 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.
3. www.thermengr.com, Bernie Siegal, An Introduction to Diode Thermal Measurements, 2009, Thermal Engineering Associates, Inc.(TEA).
4. <http://onsemi.com>, prepared by: Roger Paul Stout, PEON Semiconductor, AND8215/D Semiconductor Package Thermal Characterization, April 2006, Semiconductor Components Industries, LLC.
5. Dolgov V.V., Ezhov V.S., Motorin A.Yu. Modern soft-hardware test set for the control of the thermophysical and electrical parameters of semiconductor devices and their SOA. Proceedings of VII Scientific and Technical Conference «Solid-state Electronics. Complex Functional Blocks of Radio-electronic Equipment». M.: S&PE Pulsar. 2008. p.142-144.
6. AliceFlow_v0_34, registration number No. 2013660267. <https://github.com/kirill7785/algebraic-multigrid-method>.
7. <https://yadi.sk/i/uqduILVHb1Mnsg>.
8. D. Schweitzer, Software TDIM-MASTER: Program for the evaluation of transient dual interface measurements of Rth-JC. Downloadable from <http://www.jedec.org>.
9. V. Szekely. Identification of RC Networks by Deconvolution: Chances and Limits. IEEE Transaction on Circuits and Systems-I. Theory and Applications, v.45, N3, 1998, p. 244-258.
10. V. Szekely, M. Rencz, S. Torok, S. Ress. Calculating effective board parameters from transient measurements. – IEEE Tr. On Component and Packing Technology, v. 24, N4, 2002, p. 605-610.
11. A. Poppe, V. Székely. Dynamic Temperature Measurements: Tools Providing a Look into Package and Mount Structures. - Electronics Cooling, v.8, 2002, p.10-19.
12. Determination of the Junction-to-Case Thermal Resistance from one transient cooling curve. N.L. Evdokimova, V. V. Dolgov, K. A. Ivanov. DOI: 10.13140/RG.2.2.12459.13605.
13. Evdokimova N.L., Ezhov V.S., Minin V.F., Thermal analysis of semiconductor devices. Electronic Engineering, Series 2. Semiconductor Devices. 2013. No.1(230). pp.69-75.
14. Evdokimova N.L., Ezhov V.S., Ivanov K.A., Analytical thermal structural function. Numerical modeling. Electronic Engineering, Series 2. Semiconductor Devices. 2015. No.1(235). pp.27-35.