

УДК 621.317.332.1

В.А. Сергеев, И.В. Фролов

АЛГОРИТМ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОВЫХ СХЕМ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ ПО ЧАСТОТНЫМ ЗАВИСИМОСТЯМ ТЕПЛОВОГО ИМПЕДАНСА¹

Сергеев Вячеслав Андреевич, доктор технических наук, доцент, окончил физический факультет Горьковского государственного университета. Директор Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук. Имеет статьи и изобретения в области моделирования и исследования характеристик полупроводниковых приборов и интегральных схем. [e-mail: sva@ulstu.ru].

Фролов Илья Владимирович, кандидат технических наук, окончил радиотехнический факультет Ульяновского государственного технического университета. Научный сотрудник Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук. Имеет публикации в области методов и средств неразрушающего контроля полупроводниковых приборов. [e-mail: ilya-frolov88@mail.ru].

Аннотация

Предельные функциональные возможности и надежность полупроводниковых приборов (ППП) определяются температурой активной области приборных структур при работе приборов в составе радиоэлектронной аппаратуры. Для практических приложений эту температуру согласно принципу теплоэлектрической аналогии рассчитывают на основе эквивалентной тепловой схемы, представляющей собой электрическую цепь из нескольких последовательно соединенных RC-звеньев, каждый из которых соответствует определенному слою конструкции ППП. Эффективность контроля качества сборки ППП и отбраковки приборов с дефектами теплоотвода определяется точностью определения параметров их эквивалентной тепловой схемы. Представлен краткий анализ известных способов идентификации и определения параметров эквивалентной тепловой схемы ППП по переходным тепловым характеристикам. Предложен более точный алгоритм идентификации и расчета параметров эквивалентных тепловых схем ППП в виде многозвенной RC-цепи по частотным зависимостям модуля и фазы теплового импеданса. Проведена апробация алгоритма на примере идентификации и расчета параметров тепловой модели маломощного гетеропереходного светодиода фирмы Vishay типа TLCR5800. Обсуждаются возможности автоматизации предложенного алгоритма в условиях массового контроля.

Ключевые слова: полупроводниковый прибор, эквивалентная тепловая схема, тепловой импеданс, тепловые параметры, идентификация, алгоритм, светодиод.

THE ALGORITHM FOR THE FREQUENCY-DEPENDENT THERMAL IMPEDANCE PARAMETER IDENTIFICATION OF THERMAL CIRCUITS OF THE SEMICONDUCTOR DEVICES

Vyacheslav Andreevich Sergeev, Doctor of Engineering, Associate Professor; graduated from the Faculty of Physics at Gorky State Technical University; Director of the Ulyanovsk Branch of the Kotel'nikov Institute of Radio-Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences; an author of articles in the field of the modeling and research of semiconductor devices and integrated circuits parameters. e-mail: sva@ulstu.ru.

Ilya Vladimirovich Frolov, graduated from the Faculty of Radioengineering at Ulyanovsk State Technical University; Scientific Associate at the Ulyanovsk Branch of the Kotel'nikov Institute of Radio-Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences; an author of articles in the field of methods and means of the nondestructive inspection for semiconductor devices. e-mail: ilya-frolov88@mail.ru.

¹ Статья подготовлена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках проекта «Разработка методов и аппаратуры для исследования и контроля тепловых процессов в мощных полупроводниковых излучающих приборах на основе гетероструктур» ФЦП «Исследования и разработки по перспективным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» (соглашение о предоставлении субсидии № 14.607.21.0010 от 05.06.2014 г.).

Abstract

The limit functionality and reliability of semiconductor devices (SD) are determined by the active region temperature of the device structures when the SD is operating as a part of electronic equipment. For practical applications, this temperature is calculated in accordance with the principle of thermoelectric analogy based on the equivalent thermal circuit which is presented as an electric circuit of several series-connected RC-elements, each of which corresponds to a specific layer of the SD-structure. The effectiveness of the SD-assembly quality control and the reject of devices with heat sink defects depend on the accuracy of determining the parameters of their equivalent thermal circuit. A brief analysis of the known methods for identifying and determining the parameters of the SD equivalent thermal circuit over the transient thermal characteristics is presented. A more accurate algorithm for the identification and the calculation of the parameters of equivalent thermal circuits in the form of SD multilink RC circuit for the frequency dependence of the modulus and the phase of the thermal impedance is proposed. The algorithm approbation is performed in terms of the identification and the calculation of the parameters of the thermal model of a low-power hetero junction LED of the Vishay production TLCR5800 type. The possibilities of automation of the proposed algorithm in terms of mass control are considered.

Key words: semiconductor device, equivalent thermal circuit, thermal impedance, thermal parameters, identification, algorithm, LED.

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее распространенным типом конструкции планарных полупроводниковых приборов (ППП) является корпусная конструкция с односторонним отводом тепла [1]. Во всех вариантах такой конструкции полупроводниковая пластина закрепляется определенным способом (припоем или токопроводящим клеем) на термокомпенсирующей прокладке или основании корпуса. В типовой конструкции современных ППП источники тепла распределены в тонком слое вблизи рабочей поверхности полупроводниковой приборной структуры. Тепловой поток направлен от рабочей поверхности пластины к корпусу и далее в окружающую среду (рис. 1).

Определение тепловых свойств и характеристик ППП является важнейшей задачей выходного контроля при производстве ППП и входного контроля – при производстве радиоэлектронной аппаратуры с применением ППП. Во-первых, от температуры зависит большинство электрических параметров ППП, во-вторых, повышенная температура приводит к ускорению процессов деградации и образованию дефектов в приборных структурах и, как следствие, к ускорению отказов ППП в условиях эксплуатации [1].

В установленных отраслевыми стандартами и реализуемых на практике методиках контроля чаще всего единственным контролируемым тепловым параметром ППП является тепловое сопротивление переход-корпус, определяющее величину перегрева (повышения температуры) активной области кристалла ППП относительно температуры корпуса при рассеивании прибором мощности 1 Вт [2]. В последние годы с целью повышения эффективности контроля качества ППП и достоверности отбраковки приборов с дефектами теплоотвода как в России [3, 4], так и за рубежом [5–7] активно разрабатываются методы и средства измерения теплового сопротивления отдельных слоев конструкции ППП: кристалла, кристаллодержателя, слоя припоя или токопроводящего клея и основания корпуса. При реализации указанных методов необходимо решать задачу идентификации параметров эквивалентных тепловых схем ППП по результатам изме-

рения интегральных динамических тепловых характеристик приборов. Ключевым критерием при выборе того или иного способа является точность идентификации и определения тепловых параметров ППП. Следует отметить, что точность определения тепловых параметров ППП будет определяться как точностью измерения тепловых характеристик, так и точностью алгоритма идентификации. Важным критерием эффективности алгоритма идентификации в условиях массового производства является также быстрдействие получения исходных данных для расчета и быстрдействие самого расчета.

Простейшей тепловой моделью ППП является плоскостная система, состоящая из n однородных слоев с заданными геометрическими размерами и теплофизическими параметрами материалов, нижним своим основанием размещенная на идеальном теплоотводе, температура которого постоянна и равна θ_0 . Согласно принципу теплоэлектрической аналогии, эквивалентная тепловая схема такой плоскостной системы (по Фостеру) может быть представлена в виде цепи из параллельных $R_{Ti}C_{Ti}$ -

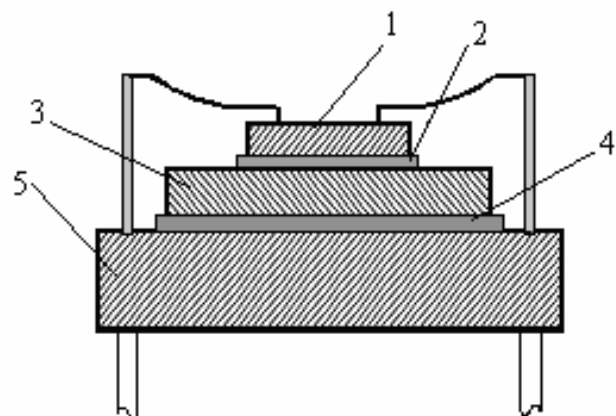


Рис. 1. Конструкция мощного биполярного транзистора (без крышки):

1 – полупроводниковый кристалл, 2 – слой сплава Au-Si, 3 – термокомпенсирующая прокладка, 4 – слой припоя, 5 – основание корпуса

звеньев, где R_{Ti} – тепловое сопротивление i -го слоя конструкции ППП [К/Вт], C_{Ti} – теплоемкость материала i -го слоя [Дж/К] (рис. 2) [1].

Тепловые свойства большинства ППП могут быть достаточно адекватно описаны трехзвенной тепловой схемой.

При этом первое звено с тепловой постоянной времени $\tau_{T1} = R_{T1}C_{T1}$ соответствует первому слою – кристаллу полупроводника, второе звено с тепловой постоянной времени $\tau_{T2} = R_{T2}C_{T2}$ соответствует второму слою конструкции – теплопроводящему кристаллодержателю, и третье звено с тепловой постоянной времени $\tau_{T3} = R_{T3}C_{T3}$ соответствует третьему слою – основанию корпуса.

1 СПОСОБЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ И РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОЙ СХЕМЫ ППП

Все известные способы идентификации параметров тепловой схемы ППП (по аналогии с электрическими схемами) в зависимости от вида динамической тепловой характеристики, используемой для расчета, разделяются на две группы: способы, основанные на анализе переходных (импульсных) тепловых характеристик (ПТХ) ППП, то есть изменения температуры перехода $\theta_n(t)$ во времени при нагреве прибора ступенькой (импульсом) греющей мощности: $P(t) = P_0$ при $t > 0$, и способы, основанные на анализе частотных тепловых характеристик, то есть зависимости амплитуды и фазы изменения температуры перехода $\theta_n(\omega)$ от частоты при нагреве прибора гармонической мощностью $P(t) = P_0 + P_m \sin \omega t$. В общем случае может быть задан любой закон изменения греющей мощности. Принципиальным различием способов идентификации является вид аргумента анализируемой зависимости температуры перехода – время или частота; при этом во втором случае необходим периодический нагрев прибора.

Наиболее распространенный способ идентификации параметров эквивалентной тепловой схемы ППП по ПТХ состоит в измерении зависимости температуры перехода ППП от времени в процессе нагрева или естественного охлаждения ППП после его разогрева постоянной мощностью P_0 [3–7]. Температуру перехода $\theta_n(t)$ определяют, как правило, косвенным методом с определенным шагом по време-

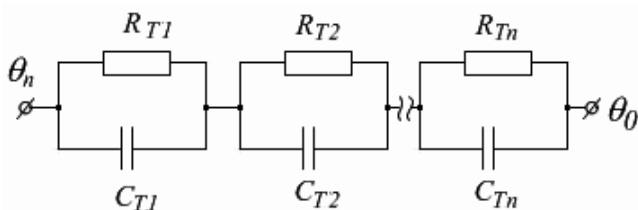


Рис. 2. Одномерная эквивалентная n -звенная тепловая схема ППП по Фостеру:

θ_n – температура активной области (p - n перехода), θ_0 – температура корпуса

ни по изменению одного из температурочувствительных параметров ППП; для этого ППП переключают из режима разогрева в режим измерения [5–7]. Полное переходное тепловое сопротивление ППП $Z_T(t) = \theta_n(t)/P_0$ в рассматриваемой модели представляется суммой экспоненциальных зависимостей $Z_T(t) = \sum_{i=1}^n R_{Ti} (1 - \exp(-t/\tau_{Ti}))$

и для 3-звенной тепловой схемы имеет вид:

$$Z_T(t) = R_{T1} (1 - \exp(-t/\tau_{T1})) + R_{T2} (1 - \exp(-t/\tau_{T2})) + R_{T3} (1 - \exp(-t/\tau_{T3})) \quad (1)$$

По измеренным значениям $\theta_n(t)$ рассчитывают $Z_T(t)$ и на основании выражения (1) проводят расчет параметров тепловой схемы R_{Ti} , τ_{Ti} либо путем оптимальной аппроксимации, либо путем решения системы n уравнений вида (1), составленных для различных моментов времени. Данный способ идентификации параметров тепловой схемы ППП лежит в основе военного стандарта США MilStd 883C Method 1012.1 [5] и международного стандарта JESD51-1 [6]. При этом для более точной идентификации тепловых параметров по ПТХ А. Рооре и V. Szekely предложили так называемый аппарат структурных функций [7].

Несмотря на активное развитие и широкое применение, способы и средства идентификации параметров тепловой схемы ППП по ПТХ обладают рядом недостатков, связанных главным образом с погрешностью измерения ПТХ. Значительная погрешность измерения ПТХ обусловлена погрешностью квантования аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и влиянием переходных тепловых и электрических процессов при переключении ППП из режима разогрева в режим измерения [8]. Для повышения точности измерения ПТХ греющую мощность задают близкой к предельно допустимой, что повышает опасность отказов приборов при испытаниях [3].

Повысить точность определения параметров тепловой схемы ППП позволяет подход, основанный на изменении греющей мощности по гармоническому закону [9]. Этот подход предполагает измерение теплового импеданса ППП (модуля $|Z_T(\omega)|$ и фазы $\phi_T(\omega)$) на нескольких фиксированных частотах изменения греющей мощности. Повышение точности измерения тепловых характеристик в этом случае достигается за счет фильтрации полезного сигнала, что позволяет существенно снизить амплитуду изменения греющей мощности. Существенным преимуществом идентификации параметров тепловой схемы ППП по частотным тепловым характеристикам является достаточность измерения модуля и фазы теплового импеданса на нескольких частотах, что сокращает общее время измерения по сравнению с идентификацией тепловых параметров ППП по ПТХ, где требуется измерение переходного теплового сопротивления в течение длительного промежутка времени нагрева или остывания ППП. Данное обстоятельство является крайне важным при контроле качества ППП в условиях массового производства, где тре-

буется высокое быстродействие средств контроля. Описанный подход реализован в ряде способов и устройств измерения теплового импеданса различных классов ППП с применением широтно-импульсной модуляции греющей мощности [10–12].

2 АЛГОРИТМ ИДЕНТИФИКАЦИИ И РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ТЕПЛОВЫХ СХЕМ ППП ПО ЧАСТОТНЫМ ТЕПЛОВЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

Предлагаемый алгоритм основан на анализе экспериментально измеренных частотных зависимостей модуля и фазы теплового импеданса ППП и расчете параметров тепловой схемы по аналитическим выражениям, связывающим эти параметры с указанными частотными зависимостями модуля и фазы теплового импеданса ППП в выбранной модели.

Блок-схема алгоритма представлена на рисунке 3.

Исходным массивом данных являются измеренные значения модуля $|Z_T(\omega)|$ и фазы $\varphi_T(\omega)$ теплового импеданса ППП на фиксированном наборе частот в диапазоне $[\omega_{\min}; \omega_{\max}]$.

Первый шаг алгоритма подразумевает получение массива данных и построение графиков частотной зависимости $|Z_T(\omega)|$ и $\varphi_T(\omega)$. Из-за влияния случайной погрешности измерения экспериментальные зависимости $|Z_T(\omega)|$ и $\varphi_T(\omega)$ имеют, как правило, «негладкий» характер, что приводит к скачкам и изломам производной при дифференцировании этих функций. На втором шаге алгоритма осуществляется сглаживание зависимостей $|Z_T(\omega)|$ и $\varphi_T(\omega)$ одним из стандартных методов, например, методом наименьших квадратов, методом скользящей медианы, и др.

На третьем шаге алгоритма сглаженная зависимость модуля теплового импеданса дифференцируется по частоте. На основании анализа производной делается выбор эквивалентной схемы, описывающей тепловую модель ППП. Поскольку максимум производной соответствует участку наибольшей крутизны функции, а минимум – наименьшей, следовательно, количество RC-звеньев в эквивалентной тепловой цепи должно соответствовать количеству максимумов или минимумов первой производной модуля теплового импеданса по частоте.

После определения числа n звеньев эквивалентной тепловой схемы составляется система $2n$ уравнений для модуля и фазы теплового импеданса на различных частотах и далее производится расчет искомых параметров путем решения этой системы уравнений.

Модуль $|Z_T(\omega)|$ и тангенс фазы $\varphi_T(\omega)$ импеданса цепи по схеме Фостера, составленной из n RC-звеньев, описываются выражениями:

$$|Z_T(\omega)| = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n \frac{R_{Ti}}{1 + \omega^2 \tau_{Ti}^2} \right)^2 + \omega^2 \left(\sum_{i=1}^n \frac{R_{Ti} \tau_{Ti}}{1 + \omega^2 \tau_{Ti}^2} \right)^2}, \quad (2)$$



Рис. 3. Блок-схема алгоритма идентификации параметров эквивалентных тепловых схем ППП по частотным тепловым характеристикам

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi_T(\omega) &= \frac{\operatorname{Im} Z_T}{\operatorname{Re} Z_T} = \\ &= -\omega \sum_{i=1}^n \frac{R_{Ti} \tau_{Ti}}{1 + \omega^2 \tau_{Ti}^2} / \sum_{i=1}^n \frac{R_{Ti}}{1 + \omega^2 \tau_{Ti}^2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Объединяем выражение (2) и (3) и получаем выражение для расчета параметров цепи:

$$\sum_{i=1}^n \frac{R_{Ti}}{1 + \omega^2 \tau_{Ti}^2} = \frac{|Z_T(\omega)|}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_T(\omega)}}. \quad (4)$$

Ключевым шагом предлагаемого алгоритма расчета параметров эквивалентной тепловой схемы, отличающим его от стандартных алгоритмов решения подобных задач, является определение набора частот, оптимальных с точки зрения минимума суммы методических погрешностей косвенного измерения параметров. В [13] доказано, что для любой однозначно идентифицируемой структуры двухполюсника (ДП) существует набор оптимальных частот, при измерении на которых модуля $|Z_T(\omega)|$ и (или) фазы $\varphi_T(\omega)$ импеданса погрешность определения параметров ДП будет минимальной.

На примере двухзвенной RC-цепи в [14] показано, что при условии экспериментально выявляемого различия тепловых параметров слоев конструкции ППП ($\tau_{Ti} > \tau_{Ti-1}$) оптимальным частотам соответствуют точки максимальной и минимальной крутизны графика частотной зависимости модуля теплового импеданса $|Z_T(\omega)|$, т. е. частоты, соответствующие минимумам и максимумам первой производной модуля теплового импеданса по частоте. В случае близких значений тепловых постоянных времени слоев конструкции ППП ($\tau_{Ti} \approx \tau_{Ti-1}$) оптимальные частоты отклоняются от указанных характерных точек, алгоритм их выбора становится более сложным и требует отдельного рассмотрения.

Таким образом, после выбора $2n$ оптимальных частот на пятом шаге алгоритма составляется и решается система из $2n$ уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \frac{R_{Ti}}{1 + \omega_1^2 \tau_{Ti}^2} = \frac{|Z_T(\omega_1)|}{\sqrt{1 + tg^2 \varphi_T(\omega_1)}}, \\ \dots \\ \sum_{i=1}^n \frac{R_{Ti}}{1 + \omega_{2n}^2 \tau_{Ti}^2} = \frac{|Z_T(\omega_{2n})|}{\sqrt{1 + tg^2 \varphi_T(\omega_{2n})}}. \end{cases} \quad (5)$$

Система уравнений (5) является нелинейной относительно искомым параметров R_{Ti} и τ_{Ti} .

Для упрощения задачи используем прием, изложенный в [13], и решение системы проведем в два этапа. Вначале приводим систему (5) к виду:

$$A \cdot D = B, \quad (6)$$

где $A = A(\omega)$ – квадратная матрица размерностью $2n$, элементы которой зависят только от частоты ω ;

$D = D(R_{Ti}, \tau_{Ti})$ – матрица-столбец, элементы которой зависят только от искомым параметров R_{Ti} и τ_{Ti} ;

$B = B(\omega)$ – матрица-столбец, составленная из значений $|Z_T(\omega_k)| / \sqrt{1 + tg^2 \varphi_T(\omega_k)}$, $1 \leq k \leq 2n$.

На первом этапе решаем систему линейных уравнений относительно коэффициентов D_k .

На втором этапе с использованием зависимостей $D_k = D_k(R_{Ti}, \tau_{Ti})$ составляется и решается система из $2n$ нелинейных уравнений относительно параметров эквивалентной тепловой схемы R_{Ti}, τ_{Ti} , которая значительно проще исходной системы уравнений (5).

На этом алгоритм завершается, и производится вывод рассчитанных значений параметров тепловой схемы ППП.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ АЛГОРИТМА

Разработанный алгоритм апробирован на примере идентификации параметров эквивалентной тепловой схемы маломощного гетеропереходного светоизлучающего диода (СИД) фирмы Vishay типа TLCR5800. СИД данного типа изготовлен в полусферическом 5-миллиметровом корпусе (рис. 4) [15].

Кристалл СИД представляет собой светоизлучающую

AlInGaP/GaAs гетероструктуру с множественными квантовыми ямами. Кристалл приклеен ко дну кристаллодержателя – металлической чашке отражателя, расположенной в верхней части анодного вывода. Контактная площадка на верхней (излучающей) поверхности кристалла СИД соединена с катодом тонкой металлической провололочкой. Прозрачная капсула выполнена из эпоксидной смолы. В такой конструкции можно выделить три характерных слоя (элемента): слой 1 – кристалл; слой 2 – чашка отражателя и анодный вывод; слой 3 – корпус (капсула) – и представить эквивалентную тепловую схему в виде трехзвенной RC-цепи.

Тепловой импеданс СИД измерялся при токе 30 мА в диапазоне частот модуляции греющей мощности 0,01–500 Гц на измерителе теплового импеданса, разработанном в УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН [11]. Температурный коэффициент напряжения на гетеропереходе СИД данного типа при малом прямом токе измерялся по стандартной методике и составил 3,5 мВ/К.

В соответствии с разработанным алгоритмом график частотной зависимости модуля теплового импеданса был сглажен и продифференцирован по частоте (рис. 5).

Анализ графика производной модуля теплового импеданса, на котором в явном виде присутствуют три минимума и три максимума, подтверждает верность выбранной трехзвенной тепловой модели. По характерным точкам на графике производной модуля теплового импеданса – точкам минимума и максимума – определены оптимальные частоты $\omega_{1_ОПТ} - \omega_{6_ОПТ}$ после чего произведен расчет параметров эквивалентной тепловой схемы. Результаты расчета представлены в таблице 1.

По данным таблицы 1 в соответствии с зависимостью (2) построен график частотной зависимости, обозначенный на рисунке 5 штриховой линией. Среднеквадратическое отклонение (СКО) расчетного графика от экспериментального составляет 1,3 К/Вт.

Полученные значения параметров тепловой схемы лежат в пределах значений, характерных для маломощных СИД [15].

При использовании алгоритма в условиях массового производства необходимо предварительно на представительной выборке N контролируемых изделий определить набор оптимальных частот $\{\omega_{i_ОПТ}\}$ для данного типа полупроводниковых приборов путем усреднения соответствующих значений оптимальных частот по выборке

$$\omega_{i_ОПТ} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \omega_{i_ОПТ}^j,$$

где $\omega_{i_ОПТ}^j$ – i -е значение оптимальной частоты j -го образца прибора, на которых в дальнейшем и производится измерения модуля и фазы теплового импеданса в производственных условиях. Оценки показывают, что разброс значений оптимальных частот для однотипных приборов не превышает 10%, и погрешностью, обусловленной отклонением от оптимальных значений частоты модуляции, для задач производственного контроля можно пренебречь.

Результаты расчета параметров эквивалентной тепловой схемы

Параметр	$R_{T1'}$, К/Вт	$\tau_{T1'}$, с	$R_{T2'}$, К/Вт	$\tau_{T2'}$, с	$R_{T3'}$, К/Вт	$\tau_{T3'}$, с
Значение	29,3	$1,77 \cdot 10^{-3}$	22,9	0,86	41,5	5,48

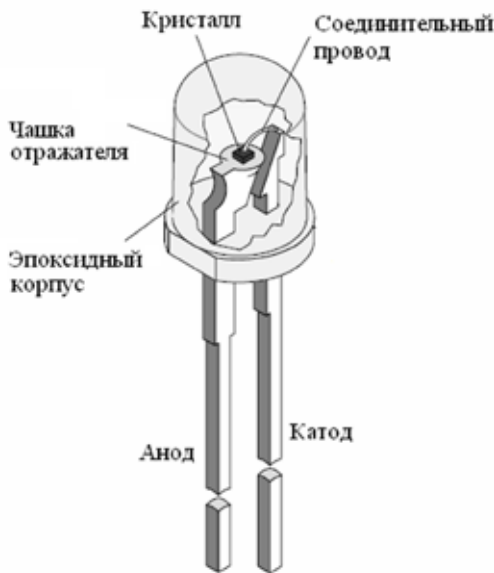


Рис. 4. Конструкция малоомощного СИД

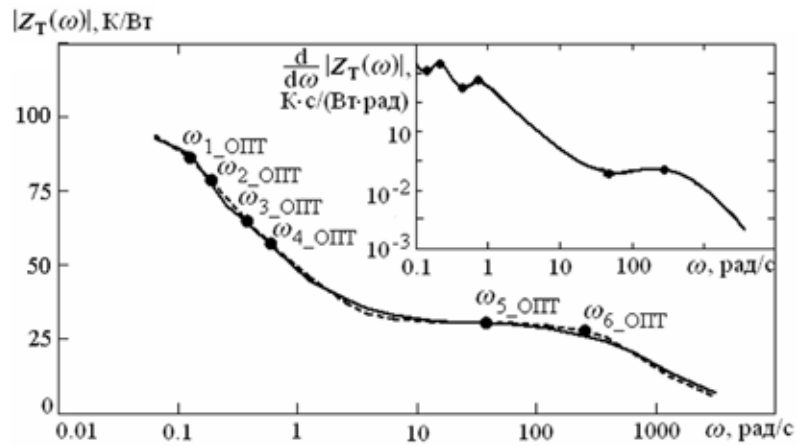


Рис. 5. Частотная зависимость модуля теплового импеданса СИД Vishay TLCR5800 при токе 30 мА; сплошная линия – эксперимент; штриховая линия – расчет. На вставке – график производной модуля теплового импеданса по частоте

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показаны преимущества идентификации и расчета параметров эквивалентных тепловых схем ППП по частотным зависимостям модуля и фазы теплового импеданса по сравнению с методами идентификации, основанными на анализе переходных тепловых характеристик. Предложен алгоритм идентификации параметров эквивалентных тепловых схем ППП путем решения системы уравнений, связывающих значения модуля и фазы теплового импеданса с параметрами тепловой схемы и частотой модуляции греющей мощности в характерных точках частотной зависимости модуля импеданса.

Результаты экспериментальной апробации алгоритма на примере идентификации и расчета параметров эквивалентных тепловых схем малоомощного гетеропереходного СИД фирмы Vishay типа TLCR5800 подтвердили эффективность предложенного алгоритма. Показано, что эквивалентная (по Фостеру) тепловая схема СИД данного типа может быть представлена трехзвенной RC-цепью, расчетные тепловые параметры СИД лежат в пределах значений, характерных для малоомощных [15], при этом СКО расчетной частотной зависимости модуля теплового импеданса от экспериментальной в диапазоне изменения 10...90 К/Вт не превышает 1,3 К/Вт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конструкции корпусов и тепловые свойства полупроводниковых приборов / под общ. ред. Н.Н. Горюнова. – М.: Энергия, 1972. – 120 с.

2. ГОСТ 19656.18-84. Диоды полупроводниковые СВЧ. Методы измерения теплового сопротивления переход-корпус и импульсного теплового сопротивления. – М.: 1984.

3. Пат. 2392631 РФ, МПК G01R31/26. Устройство для измерения теплового сопротивления переход-корпус полупроводникового прибора / Мальцев И.А., Мальцев А.А.; заявитель и патентообладатель Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева. – № 2009122088/28; заявл. 09.06.2009; опубл. 20.06.2010, Бюл. №17.

4. Пат. 2240573 РФ, МПК G01R31/26. Экспресс-метод измерения теплового сопротивления переход-корпус силовых полупроводниковых приборов в корпусном исполнении / Флоренцев С.Н., Гарцбейн В.М., Иванов С.В., Марамыгин Н.Ф., Романовская Л.В.; заявитель и патентообладатель Флоренцев С.Н. – № 2003111424/28; заявл. 22.04.2003; опубл. 20.11.2004.

5. MilStd 883C Method 1012.1 Thermal Characteristics of Microelectronic Devices.

6. IC Thermal Measurement Method – Electrical Test Method (Single Semiconductor Device) EIA/JEDEC JESD51-1 standard. – URL: <http://www.jedec.org/download/search/jesd51-1.pdf>.

7. Poppe A., Székely V. Dynamic temperature measurements: tools providing a look into package and mount structures // Electronics Cooling. 2002. No. 8. pp. 10–19.

8. Сергеев В.А., Юдин В.В. Измерение тепловых параметров полупроводниковых изделий с применением амплитудно-импульсной модуляции греющей мощности // Метрология. – 2010. – № 4. – С. 72–78.

9. Сергеев В.А. Методы и средства измерения тепловых параметров полупроводниковых приборов и интегральных схем // Электронная промышленность. – 2004. – № 1. – С. 45–48.

10. Пат. 2402783 РФ, МПК G01 R 31/26. Способ измерения теплового импеданса полупроводниковых диодов / Сергеев В.А., Смирнов В.И., Юдин В.В. и др.; заявитель и патентообладатель Ульяновский государственный технический университет. – № 2009129994/28 ; заявл. 04.08.2009 ; опубл. 27.10.10, Бюл. № 30.

11. Измеритель теплового импеданса полупроводниковых диодов с широтно-импульсной модуляцией греющей мощности / В.А. Сергеев [и др.] // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2010. – № 3. – С. 45–47.

12. Измерение теплового импеданса мощных светодиодов с применением широтно-импульсной модуляции мощности / В.А. Сергеев [и др.] // Известия вузов. Электроника. – 2012. – № 3. – С. 64–68.

13. Кнеллер В.Ю., Боровских Л.П. Определение параметров многоэлементных двухполюсников. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 144 с.

14. Сергеев В.А., Фролов И.В. Алгоритм определения набора оптимальных частот тестового сигнала при измерении параметров многоэлементных двухполюсников // Автоматизация процессов управления. – 2014. – № 1 (35). – С. 31–37.

15. Шуберт Ф. Светодиоды / пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 496 с.

REFERENCES

1. *Konstruktsii korpusov i teplovyie svoystva poluprovodnikovyykh priborov. Pod obschey red. N.N. Goryunova* [Case Construction and Thermal Characteristics of Semiconductor Devices. Under the Editorship of N.N. Goryunov]. Moscow, Energiya Publ., 1972. 120 p.

2. GOST 19656, 18-84. *Diody poluprovodnikovye SVCh. Metody izmereniya teplovogo soprotivleniya perekhod-korpus i impulsnogo teplovogo soprotivleniya* [State Standard 19656, 18-84. Semiconductor UHF Diodes. Methods of Measuring the Junction-to-Case Thermal Impedance and the Impulse Thermal Impedance]. Moscow, 1984.

3. Maltsev I.A., Maltsev A.A. *Ustroystvo dlya izmereniya teplovogo soprotivleniya perekhod-korpus poluprovodnikovogo pribora* [Apparatus for Measuring the Junction-to-Case Thermal Resistance of Semiconductor Device]. Patent RF 2392631 RF, Int.Cl.: G01R31/26. Applicant and proprietor: Kazan National Research Technical University named after A.N.Tupolev. Application: no. 2009122088/28. Date of filling: June 09, 2009. Date of publication: June 20, 2010, Bull. no. 17.

4. Florentsev S.N., Gartsbeyn V.M., Ivanov S.V., Maramygin N.F., and Romanovskaya L.V. *Ekspress-metod izmereniya teplovogo soprotivleniya perekhod-korpus silovykh poluprovodnikovyykh priborov v korpusnom ispolnenii* [Express Method of Measuring the Junction-to-Case Thermal Impedance of Power Semiconductor Devices Enclosed in Case]. Patent RF 2240573 RF, Int.Cl.: G01R31/26.

Applicant and proprietor: Florentsev S.N. Application: no. 2003111424/28. Date of filling: April 22, 2003. Date of publication: November 20, 2004.

5. MilStd 883C Method 1012.1 *Thermal Characteristics of Microelectronic Devices*.

6. *IC Thermal Measurement Method – Electrical Test Method (Single Semiconductor Device) EIA/JEDEC JESD51-1 standard*. [Electronic resource]. Available at: <http://www.jedec.org/download/search/jesd51-1.pdf>.

7. Poppe A., and Székely V. Dynamic temperature measurements: tools providing a look into package and mount structures. *Electronics Cooling*, 2002, no. 8, pp. 10–19.

8. Sergeev V.A., and Yudin V.V. Izmerenie teplovykh parametrov poluprovodnikovyykh izdeliy s primeneniem amplitudno-impulsnoy modulyatsii greyushey moschnosti [Measurement of Semiconductor Products Heat Parameters using the Heating Power Amplitude-Pulse Modulation]. *Metrologiya* [Measurement Technique], 2010, no. 4, pp. 72–78.

9. Sergeev V.A. *Metody i sredstva izmereniya teplovykh parametrov poluprovodnikovyykh priborov i integralnykh skhem* [Methods and Means of Measuring the Thermal Parameters of Semiconductor Devices and Integrated Circuits]. *Elektronnaya promyshlennost* [Electronics Industry], 2004, no. 1, pp. 45–48.

10. Sergeev V.A., Smirnov V.I., Yudin V.V., and Others. *Sposob izmereniya teplovogo impedansa poluprovodnikovyykh diodov* [Method of Measuring the Semiconductor Diodes Thermal Impedance]. Patent RF 2402783 RF, Int.Cl.: G01R31/26. Date of filling: August 04, 2009. Date of publication: October 27, 2010, Bull. no. 30.

11. Sergeev V.A., and Others. Izmeritel teplovogo impedansa poluprovodnikovyykh diodov s shirotno-impulsnoy modulyatsiyey greyushey moschnosti [Automated Thermal Impedance Meter for Semiconductor Diodes with Pulse-Duration Modulation of Heating Power]. *Promyshlennyye ASU i kontrolyery* [Industrial Automatic Control System and Controllers], 2010, no. 3, pp. 45–47.

12. Sergeev V.A., and Others. Izmerenie teplovogo impedansa moschnykh svetodiodov s primeneniem shirotno-impulsnoy modulyatsii moschnosti [Measuring the Thermal Impedance of Powerful Diodes with Power Supply Pulse Width Modulation]. *Izvestiya vuzov. Elektronika* [Proceedings of Universities. Electronics], 2012, no.3, pp. 64–68.

13. Kneller V.Yu. and Borovskih L.P. *Opreделение parametrov mnogoelementnykh dvuhpolysnikov* [Determination of Parameters of Multicomponent Two-Terminal Devices]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 144 p.

14. Sergeev V.A. and Frolov I.V. *Algoritm opredeleniya nabora optimalnykh chastot testovogo signala pri izmerenii parametrov mnogoelementnykh dvuhpolysnikov* [An Algorithm to Determine a Set of Optimal Frequencies for the Test Signal When Measuring Parameters of Multielement Two-Terminals]. *Avtomatizatsiya protsessov upravleniya* [Automation of Control Processes], 2014, no.1, pp. 31–37.

15. Schubert F.E. *Svetodiody. Per. s angl. pod red. A. E. Yunovicha* [LEDs. Transl. from Engl. under the Editorship of A.E. Yunovich]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008. 496 p.