

ELECTRONIC AND ELECTRICAL ENGINEERING

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 621.382.017

В.И. Смирнов, Ю.А. Савостин, А.А. Гавриков, А.М. Шорин

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛООВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

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

Савостин Юрий Александрович, окончил Московский институт электронной техники по специальности «Автоматика и электроника», начальник исследовательской лаборатории АО «ПКК Миландр». Имеет публикации в области измерений параметров полупроводниковых интегральных микросхем. [e-mail: savostin.u@ic-design.ru].

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

Шорин Антон Михайлович, окончил УлГТУ по специальности «Проектирование и технология электронных средств», аспирант кафедры «Проектирование и технология электронных средств» УлГТУ. Имеет публикации в области измерений теплофизических параметров полупроводниковых приборов. [e-mail: anshant@yandex.ru].

Аннотация

Рассмотрены методы и средства измерения теплового сопротивления интегральных микросхем. Проведено сравнение стандартных методов измерения с модуляционным методом, использующим модуляцию греющей мощности по гармоническому закону. Описаны работа измерителя теплового импеданса, основанного на модуляционном методе, его программное обеспечение и функциональные возможности. Приведены результаты измерений теплового сопротивления, полученные по ОСТ 11 0944–96 (метод постоянной температуры кристалла) и методом модуляции греющей мощности. Показано, что в пределах погрешности стандартного метода результаты обоих методов согласуются между собой. Отмечается, что достоинством модуляционного метода является возможность измерения не только сопротивления «переход – корпус», но и отдельных компонент теплового сопротивления, например, компоненты «переход – кристаллодержатель». Это может быть использовано при контроле качества монтажа кристалла в корпус.

Ключевые слова: тепловой импеданс, интегральная микросхема, модуляция греющей мощности, компоненты теплового сопротивления.

METHODS AND MEANS FOR MEASURING THE THERMAL RESISTANCE OF INTEGRATED CIRCUITS

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

Iurii Aleksandrovich Savostin, graduated from the Moscow Institute of Electronic Technology with the specialty in Automation and Electronics; Head of Research Laboratory at JSC "ICC Milandr"; an author of publications in the field of measuring semiconductor integrated circuit parameters. e-mail: savostin.u@ic-design.ru.

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

Anton Mikhailovich Shorin, graduated from Ulyanovsk State Technical University with the specialty in Design and Technology of Electronic Instrumentation; an engineer at the Ulyanovsk Branch of the Kotel'nikov Institute of Radio-Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, an author of publications in the field of measuring thermal and physical parameters of semiconductor devices. e-mail: anshant@yandex.ru.

Abstract

The article deals with methods and means for measuring the thermal resistance of integrated circuits. The standard measuring methods and a modulation method using heating power varying harmonically are compared. The operation principles of thermal resistance meter based on the modulation method, its software and functionality are described. The results of thermal resistance measurements obtained according to the Industry Standard OST 11 0944–96 (method of constant die temperature) and with the use of modulation method are represented. The results of both methods were demonstrated to go with each other within the standard method accuracy. It is indicated that the ability to measure not only the total resistance "junction-to-case" but also individual thermal resistance components, e.g. the "junction-chip carrier" components, is a merit of the modulation method. This could be used when testing the quality during mounting the die into the case.

Key words: thermal impedance, integrated circuit, modulation of heating power, thermal resistance components.

ВВЕДЕНИЕ

Тепловое сопротивление R_{Tjx} полупроводниковых приборов относительно корпуса или окружающей среды определяется выражением:

$$R_{Tjx} = \frac{T_j - T_x}{P}, \quad (1)$$

где T_j – температура электронно-дырочного перехода прибора;

T_x – температура корпуса или окружающей среды;

P – тепловая мощность, рассеиваемая в приборе.

Зная, например, тепловое сопротивление «переход – корпус» $R_{Tjк}$ и температуру корпуса $T_к$ прибора, можно определить температуру перехода T_j :

$$T_j = T_к + R_{Tjк} \cdot P. \quad (2)$$

Для дискретных полупроводниковых приборов (транзисторов, диодов и т. д.) температура перехода T_j определяется косвенным путем по результатам измерения термочувствительного параметра (ТЧП). Для мощных MOSFET-транзисторов в качестве ТЧП можно

использовать прямое напряжение исток-сток или сопротивление открытого канала, для IGBT-транзисторов – напряжение между коллектором и эмиттером. В большинстве случаев в качестве ТЧП используют прямое падение напряжения на одном из p - n -переходов при малом измерительном токе.

Для интегральных микросхем (ИМС) температура перехода T_j определяется согласно OST 11 0944–96 [1] либо непосредственно с помощью инфракрасного микропирометра или термоэлектрического преобразователя, либо косвенным способом на основе измерения ТЧП. Использование инфракрасного излучения для определения температуры кристалла предложено в работе [2], в которой для определения теплового сопротивления «переход – корпус» измеряют термограмму верхней поверхности кристалла ИМС. Реализация таких измерений требует удаления крышки ИМС, что ограничивает возможности метода. При косвенном измерении T_j в качестве ТЧП используют прямое падение напряжения на защитных диодах (ESD-диодах), предохраняющих микросхему от статических разрядов и перенапряжений на ее выводах.

В дискретных полупроводниковых приборах поток тепла обычно направлен в одну сторону – от кристалла через корпус и радиатор в окружающую среду. Для ИМС распределение тепловых потоков более сложное, что иллюстрирует рисунок 1. Часть потока распространяется через корпус в окружающую среду, часть – через внешние выводы в печатную плату и далее в окружающую среду. Соотношение между этими потоками зависит от конструкции корпуса ИМС и от материала, из которого он изготовлен. При этом необходимо учитывать, что поверхность корпуса ИМС обычно не является изотермической. Поэтому относительно простые одномерные тепловые модели, типичные для дискретных полупроводниковых приборов [1], для ИМС не применимы, а сам процесс измерения теплового сопротивления требует выполнения ряда условий, например, проведения измерений при повышенной температуре корпуса и фиксации температуры окружающей среды с точностью $\pm 2^\circ\text{C}$.

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОвого СОПРОТИВЛЕНИЯ ИМС

Особенностью методов измерения теплового сопротивления ИМС, изложенных в [3], является то, что в процессе измерения R_{Tjx} объект измерения крепится на специальный термостабилизированный теплоотвод, температуру которого можно регулировать в широких пределах. Температура корпуса T_k микросхемы измеряется с помощью термопары, температура кристалла (температура перехода T_j) определяется на основе измерения падения напряжения на защитных диодах. Допускаются два варианта реализации метода – способ постоянной температуры кристалла и способ измерения при двух значениях мощности и температуры. В первом способе вначале в объекте рассеивается тепловая мощность P_1 до достижения стационарного теплового режима, характеризуемого постоянством температуры корпуса $T_{к1}$, и измеряется ТЧП – прямое напряжение $U_{ТЧП}$ на защитных диодах. Затем рассеивается тепловая мощность P_2 , а изменение температуры кристалла, контролируемое величиной $U_{ТЧП}$ компенсируется изменением температуры теплоотвода и, соответственно, температуры корпуса $T_{к2}$. Тепловое сопротивление «переход – корпус» $R_{Тнк}$ определяется выражением:

$$R_{Тнк} = \frac{T_{к1} - T_{к2}}{P_1 - P_2}, \quad (3)$$

где индексы 1 и 2 соответствуют первому и второму значениям рассеиваемой тепловой мощности.

Второй способ основан на измерении ТЧП при двух различных тепловых мощностях, рассеиваемых в ИМС, и двух температурах корпуса T_k . Одна из температур близка к предельно допустимой, другая – на 20–30% ниже. Как и в предыдущем способе, измерения $U_{ТЧП}$ и T_k производятся в стационарных тепловых режимах.

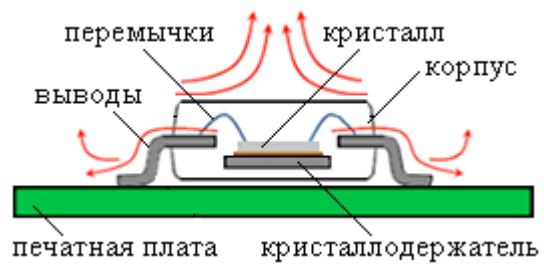


Рис. 1. Конструкция ИМС (стрелками показаны тепловые потоки)

Измерение ТЧП при двух различных температурах корпуса $T_{к1}$ и $T_{к2}$ позволяет определить температурный коэффициент напряжения K_T , связывающий прямое напряжение $U_{ТЧП}$ на защитных диодах с температурой кристалла:

$$K_T = \frac{U_{ТЧП2} - U_{ТЧП1}}{T_{к2} - T_{к1}}.$$

Тепловое сопротивление «переход – корпус» $R_{Тнк}$ определяется выражением:

$$R_{Тнк} = \frac{U_{ТЧП}(P_2) - U_{ТЧП}(P_1)}{K_T \cdot (P_2 - P_1)},$$

где $U_{ТЧП}(P_1)$ и $U_{ТЧП}(P_2)$ – ТЧП при рассеиваемых мощностях P_1 и P_2 соответственно. Вычисление $R_{Тнк}$ производится для обоих значений температуры корпуса $T_{к1}$ и $T_{к2}$ и затем усредняется.

К недостаткам обоих методов следует отнести существенное влияние на результаты измерений качества контакта термопары с корпусом ИМС. Кроме этого, продолжительность однократного измерения теплового сопротивления относительно велика, что обусловлено необходимостью вывода объекта в стационарный тепловой режим.

Более высокую производительность измерений обеспечивает динамический метод измерения $R_{Тнк}$, изложенный в [4]. В данном методе через объект пропускают импульс греющего тока, измеряют напряжение во время прохождения импульса, а также измеряют ТЧП до и после импульса. Это позволяет определить рассеиваемую в объекте мощность и вызванное этим изменение температуры перехода, что дает возможность по формуле (1) рассчитать тепловое сопротивление.

При всей своей простоте и оперативности метод обладает двумя серьезными недостатками. Во-первых, на результаты измерений теплового сопротивления существенно влияет длительность греющего импульса. Требуется, чтобы в конце импульса температура кристалла ИМС достигла стационарного состояния, а температура корпуса ИМС практически осталась неизменной. Без проведения специальных исследований для каждого конкретного образца ИМС определить оптимальную длительность импульса бывает весьма проблематично. Во-вторых, измерение ТЧП после прохождения греющего импульса следует производить с некоторой вре-

менной задержкой, пока не закончатся переходные электрические процессы в защитном диоде, связанные с инжекцией неосновных носителей заряда и последующим их рассасыванием. За это время кристалл может остыть, что приводит к погрешности определения теплового сопротивления.

Как отмечалось ранее, отвод тепла от активной области кристалла может осуществляться как через поверхность корпуса, которая не является изотермической, так и через выводы ИМС в печатную плату и далее в окружающую среду. Это вносит некоторую неопределенность в измерение теплового сопротивления «переход – корпус» и определение по формуле (2) температуры перехода T_j . Стандарт JESD51-2 [5] рекомендует для определения T_j использовать в качестве дополнительной процедуры измерение теплового характеристического параметра Ψ_{JT} :

$$\Psi_{JT} = \frac{T_j - T_T}{P}, \quad (4)$$

где T_T – температура корпуса в геометрическом центре верхней поверхности корпуса, измеряемая термопарой или приемником инфракрасного излучения.

Дальнейшее развитие эта идея получила в стандарте JESD51-2a [6], в котором предлагается использовать тепловой характеристический параметр Ψ_{JB} , характеризующий разность температур между кристаллом (переходом) и печатной платой. Параметр Ψ_{JB} определяется аналогично Ψ_{JT} , но вместо температуры центральной точки на поверхности корпуса ИМС в формулу (4) подставляется температура поверхности платы вблизи корпуса ИМС. Несмотря на практическую значимость теплового характеристического параметра Ψ_{JT} , в технической документации на ИМС обычно приводятся значения теплового сопротивления R_{Tnk} .

Широкое распространение за рубежом получил метод, изложенный в стандарте JESD51-14 [7]. Суть его заключается в том, что в объекте рассеивают ступенчато

изменяющуюся мощность P и измеряют отклик на это воздействие – изменение температуры p - n -перехода $T_j(t)$ в процессе разогрева объекта до достижения стационарного состояния. Анализ кривой нагрева $T_j(t)$ (или кривой охлаждения) позволяет определить компоненты теплового сопротивления элементов конструкции объекта, по которым распространяется тепловой поток от кристалла в окружающую среду. Данный анализ основан на вычислении кумулятивной и дифференциальной структурных функций [8]. Кумулятивная структурная функция представляет собой временную зависимость суммарной теплоемкости $C_{T\Sigma}$ от суммарного теплового сопротивления $R_{T\Sigma}$, которые определяются выражениями:

$$C_{T\Sigma} = \frac{P \cdot t}{T_j(t) - T_j(t=0)}, \quad R_{T\Sigma} = \frac{T_j(t) - T_j(t=0)}{P},$$

где P – величина рассеиваемой в объекте тепловой мощности; $T_j(t=0)$ – начальная температура перехода. Дифференциальная структурная функция $K(R_{T\Sigma})$ определяется выражением:

$$K(R_{T\Sigma}) = \frac{dC_{T\Sigma}}{dR_{T\Sigma}}.$$

Типичный вид кумулятивной и дифференциальной структурных функций представлен на рисунке 2. Как было показано в работе [9], пологие участки структурной функции $C_{T\Sigma}(R_{T\Sigma})$ соответствуют элементам конструкции объекта с высокой теплопроводностью, а участки $C_{T\Sigma}(R_{T\Sigma})$ с резким ростом – элементам конструкции с низкой теплопроводностью. Дифференциальная структурная функция $K(R_{T\Sigma})$ дает возможность более четко выявить особенности кумулятивной структурной функции. На рисунке 2б положение локальных максимумов соответствует компонентам теплового сопротивления.

Недостатком метода является то, что в процессе измерений компонент теплового сопротивления тем-

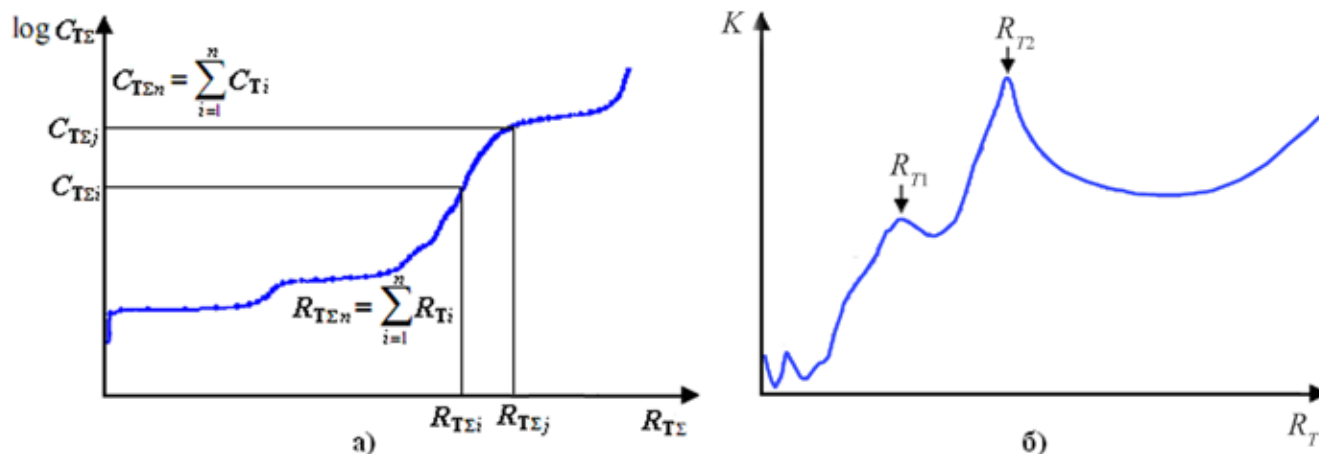


Рис. 2. Типичный вид кумулятивной (а) и дифференциальной (б) структурных функций (R_{T1} и R_{T2} – компоненты теплового сопротивления)

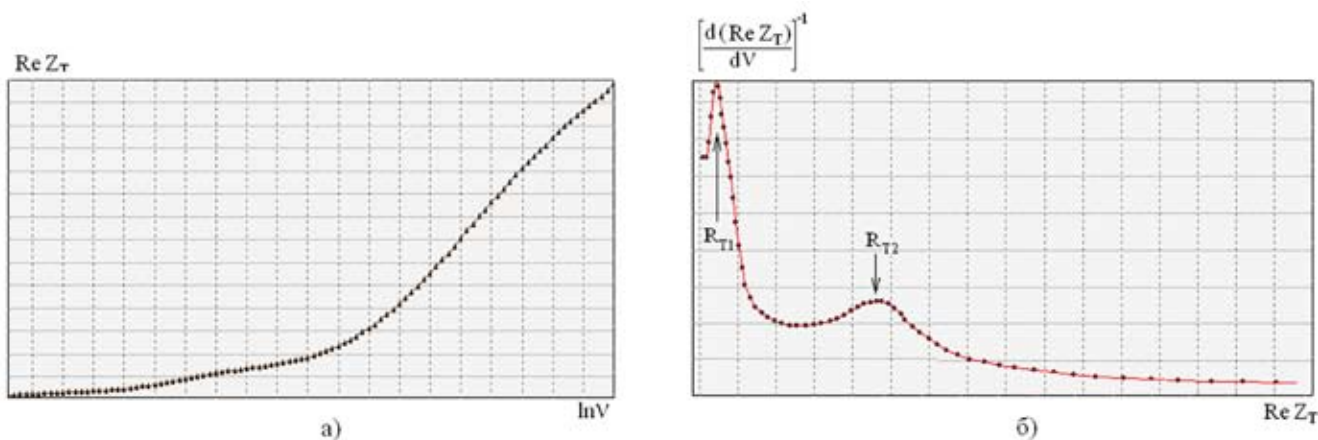


Рис. 3. Частотная зависимость вещественной части $Re Z_T(v)$ теплового импеданса (а) и результат ее обработки (б)

температуру корпуса объекта необходимо поддерживать постоянной. Для ИМС, у которых существенная часть теплового потока распространяется через внешние выводы ИМС, фиксация температуры корпуса может оказаться непростой задачей.

Свободным от этого недостатка является модуляционный метод измерения теплового сопротивления, изложенный в [10]. В нем нагрев объекта производится мощностью, модулированной по гармоническому закону:

$$P(t) = P_0 + P_1 \cdot \sin 2\pi\nu t,$$

где P_0 – постоянная составляющая мощности;

P_1 – амплитуда переменной составляющей мощности ($P_1 < P_0$);

ν – частота модуляции греющей мощности.

Для этого через объект пропускают последовательность импульсов греющего тока, длительность которых изменяется по гармоническому закону (ШИМ-импульсов). В паузах между импульсами, с небольшой относительно среза импульсов временной задержкой, необходимой для завершения переходных электрических процессов, измеряется ТЧП. Измерение ТЧП на-

чинается после непродолжительного предварительного разогрева объекта и вывода его в такой тепловой режим, при котором температура $p-n$ -перехода будет пульсировать относительно некоторого квазистационарного значения $T_j(t)$, изменяющегося с частотой модуляции греющей мощности:

$$T_j(t) = T_{j0}(t) + T_{j1} \sin(2\pi\nu t - \varphi),$$

где T_{j0} – постоянная составляющая температуры $p-n$ -перехода;

T_{j1} – амплитуда переменной составляющей температуры $p-n$ -перехода на частоте модуляции;

φ – сдвиг фаз между переменными составляющими температуры $p-n$ -перехода и греющей мощности.

С помощью преобразования Фурье производится вычисление спектра $T_j(\nu)$, осуществляется его цифровая фильтрация и восстановление отфильтрованной зависимости $T_j(t)$. Отношение амплитуд переменных составляющих температуры перехода T_{j1} и мощности P_1 определяет модуль $Z_T(\nu)$ теплового импеданса

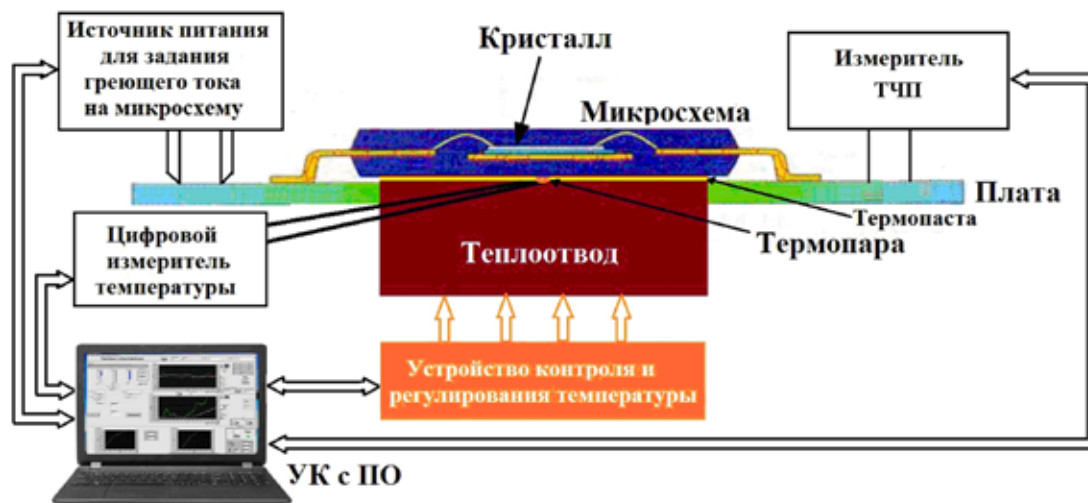


Рис. 4. Функциональная схема измерительного стенда для измерения теплового сопротивления ИМС по ОСТ 11 0944–96

на частоте модуляции ν , а отношение мнимой и вещественной Фурье-трансформант – тангенс фазы $\varphi(\nu)$ теплового импеданса.

Определение компонент теплового сопротивления производится на основе измерения частотных зависимостей модуля $Z_T(\nu)$, фазы $\varphi(\nu)$ и вещественной части $Re Z_T(\nu)$ теплового импеданса, которые имеют особенности в виде пологих участков или точек перегиба, связанные с той или иной компонентой теплового сопротивления. Выявление этих особенностей осуществляется на основе вычисления производных указанных величин по частоте модуляции. Как было показано в [11], наиболее высокую точность обеспечивает анализ частотной зависимости вещественной части $Re Z_T(\nu)$ теплового импеданса. В качестве иллюстрации на рисунке 3 показана частотная зависимость вещественной части теплового импеданса и результат ее обработки.

СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛООВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ИМС

Метод, основанный на анализе кривой нагрева и вычисления структурных функций, реализован в измерительном комплексе T3Ster – Thermal Transient Tester [12]. Объектами измерения в нем могут быть как маломощные ИМС, так и мощные силовые модули на MOSFET- и IGBT-транзисторах. Для измерения теплового сопротивления мощных объектов в T3Ster используют дополнительные бустеры, позволяющие обеспечить величину греющего тока до 50 А. Стоимость такого комплекса при минимальной комплектации превышает 100 тыс. долларов. В России он имеется только в Научно-технологическом центре микроэлектроники РАН (г. Санкт-Петербург).

Несмотря на наличие отраслевого стандарта ОСТ 11 0944–96, разработанного еще в 1996 году, средства контроля теплового сопротивления полупрово-

дниковых приборов и ИМС отечественной промышленностью не производятся. На отдельных предприятиях, производящих электронные компоненты, имеются разработанные собственными силами измерительные стенды, в которых реализованы методики, изложенные в ОСТ 11 0944–96. Примером может служить измерительный стенд, разработанный и изготовленный сотрудниками исследовательской лаборатории АО «ПКК Миландр» (г. Зеленоград). В основу работы стенда положен один из методов ОСТ 11 0944–96, а именно, метод постоянной температуры кристалла. Функциональная схема стенда представлена на рисунке 4.

Для удобства проведения измерений испытуемые микросхемы предварительно распаиваются на специальные печатные платы. В отверстие печатной платы, расположенное под корпусом микросхемы, вставляется теплоотвод, к которому через тонкий слой термопасты плотно прижимается микросхема. В отверстие теплоотвода, расположенное под центром основания корпуса, вставляется термopара, которая контролирует температуру на корпусе микросхемы. С помощью программного обеспечения (ПО) управляющего компьютера (УК) через устройство контроля и регулирования температуры на микросхеме устанавливаются и варьируются необходимые температурные режимы. По команде ПО УК на микросхему периодически поступают импульсы греющего тока от источника греющего тока, а после окончания каждого из них следует измерение ТЧП. Соотношение длительности импульса греющего тока к длительности полного цикла (импульс греющего тока + измерение ТЧП) должно быть не менее 99%, чтобы не допускать значительного остывания кристалла за время измерения ТЧП. Так как амплитуда импульсов греющего тока может достигать значительных величин, то для компенсации падения напряжения от источника на подводящих проводах используется четырехпроводная схема подключения источника греющего тока. ПО на УК, по-

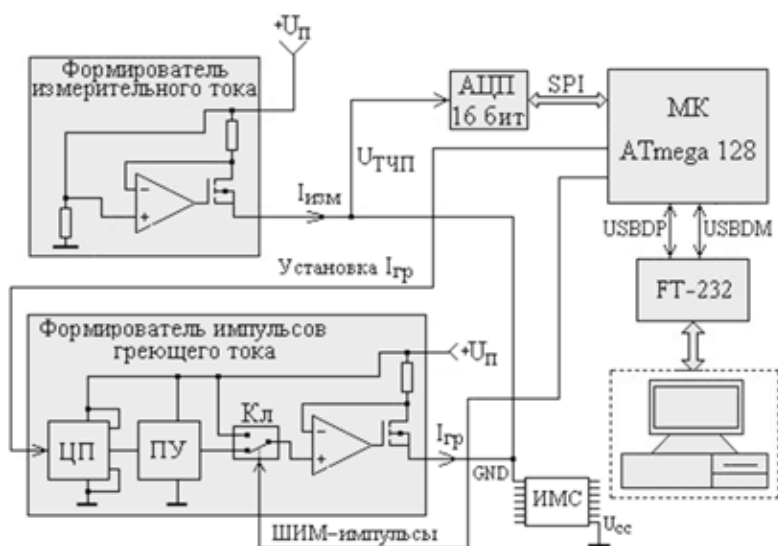


Рис. 5. Функциональная схема измерителя теплового импеданса ИМС

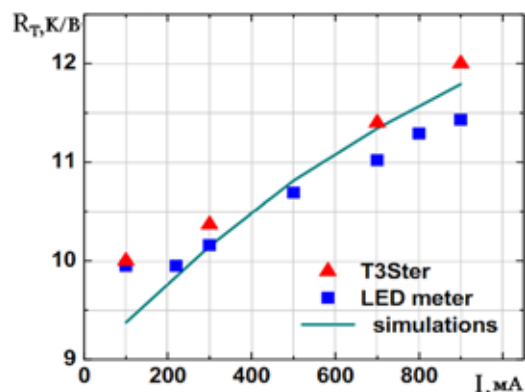


Рис. 6. Результаты измерения зависимости теплового сопротивления «переход – корпус» от величины греющего тока, полученные с помощью T3Ster, LED Meter и моделирования

лучая данные от всех приборов, определяет момент достижения схемой состояния термического равновесия по ТЧП и определяет тепловое сопротивление ИМС согласно ОСТ 11 0944–96 по формуле (3).

Модуляционный метод реализован в измерительном комплексе LED Meter, разработанном и изготовленном сотрудниками Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (г. Ульяновск). Функциональная схема измерителя теплового импеданса ИМС представлена на рисунке 5 [13]. Функционирование прибора осуществляется под управлением микроконтроллера (МК). Получив из компьютера параметры измерения, МК формирует последовательность ШИМ-импульсов греющего тока, протекающих через объект измерения. Для ИМС импульсы тока протекают от общего вывода GND к выводу питания U_{cc} . В паузах между греющими импульсами измеряется $U_{TЧП}$ – напряжение на объекте при протекании через него измерительного тока $I_{изм}$.

Формирователь измерительного тока $I_{изм}$ реализован на основе операционного усилителя (ОУ), в обратную цепь которого включен полевой транзистор. Величина $I_{изм}$ определяется напряжением на неинвертирующем входе ОУ и токозадающим резистором в цепи стока транзистора, подключенным к источнику питания $+U_n$. По аналогичной схеме реализован и формирователь импульсов греющего тока $I_{гр}$, но напряжение на неинвертирующем входе ОУ устанавливается программно от МК с помощью цифрового потенциометра (ЦП) и преобразователя уровней напряжения (ПУ). С помощью переключателя напряжения (Кл) осуществляется широтно-импульсная модуляция $I_{гр}$. Преобразование измеряемых напряжений $U_{TЧП}$ в цифровой код, поступающий в микроконтроллер, осуществляется 16-разрядным аналого-цифровым преобразователем (АЦП). Передача результатов преобразования с выхода АЦП в МК производится с помощью скоростного последовательного интерфейса SPI. Все результаты измерений записываются в память МК и по окончании измерения пересылаются в компьютер для последующей обработки. Взаимодействие МК с компьютером осуществляется посредством USB-интерфейса, для реализации которого используется конвертор «RS-USB» на основе микросхемы FT-232.

ПО включает в себя управляющую программу для МК и программу LED Meter для компьютера, осуществляющую обработку результатов измерений. Управляющая программа для МК обеспечивает формирование последовательности ШИМ-импульсов греющего тока, измерение напряжения на объекте во время прохождения через него греющих импульсов и в паузах между ними, передачу результатов измерения в компьютер для их последующей обработки, диагностику нештатных ситуаций. Программа LED Meter задает режимы работы комплекса, принимает результаты измерений из прибора и вычисляет модуль, фазу и вещественную

часть теплового импеданса, а также их зависимости от частоты модуляции греющей мощности, отображает результаты измерения и их обработки в текстовом и графическом видах.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ

Сравнение результатов измерений теплового сопротивления, полученных с помощью T3Ster и измерителя теплового импеданса (рис. 5), использующего модуляционный метод, проведено в НТЦ микроэлектроники РАН (г. Санкт-Петербург). Объектами измерений являлись светодиоды на AlInGaN. Результаты измерения зависимости теплового сопротивления «переход – корпус» от величины греющего тока представлены на рисунке 6 [14]. При небольшой величине греющего тока, не превышающей 500 мА, результаты измерений теплового сопротивления, полученные разными методами, отличаются на 2–3%. При величине тока 900 мА отличие достигает 6%.

Сравнение результатов измерений теплового сопротивления ИМС, полученных с помощью измерительного стенда (рис. 4) и измерителя теплового импеданса (рис. 5), производилось в исследовательской лаборатории АО «ПКК Миландр» (г. Зеленоград). Объектом измерения являлась ИМС 1636PP4У (корпус H16.48-1B). В процессе измерения объект монтировался на медный радиатор и помещался в специальную теплоизолирующую оболочку. Измерения проводились при температурах окружающей среды, равных $T_c = 27^\circ\text{C}$ и $T_c = 50^\circ\text{C}$. Греющий ток $I_{гр}$ составлял величину 1,6 А, температурный коэффициент напряжения, измеренный при величине тока 3 мА, принимался равным 2,32 мВ/К. Результаты измерения зависимости теплового импеданса от частоты модуляции греющей мощности, полученные модуляционным методом, представлены на рисунке 7.

В верхнем графическом окне по оси ординат отложена вещественная часть $Re Z_T(\nu)$ теплового импеданса, в нижнем графическом окне – фаза $\varphi(\nu)$ теплового импеданса. По оси абсцисс в обоих окнах отложены порядковые номера измерений, частота модуляции мощности в которых приведена во второй колонке таблицы справа от графиков. При определенных частотах модуляции греющей мощности наблюдаются минимумы в зависимости $\varphi(\nu)$ и пологие участки в зависимости $Re Z_T(\nu)$, соответствующие различным компонентам теплового импеданса. Первый минимум фазовой характеристики $\varphi(\nu)$ соответствует компоненте теплового сопротивления «переход – кристаллодержатель». Второй минимум в области частот 0,25 Гц соответствует компоненте теплового сопротивления «переход – корпус» $R_{Тнк}$, значение которой определяется в результате анализа зависимости $Re Z_T(\nu)$ по методике, описанной выше. Результат такого анализа представлен на рисунке 8.

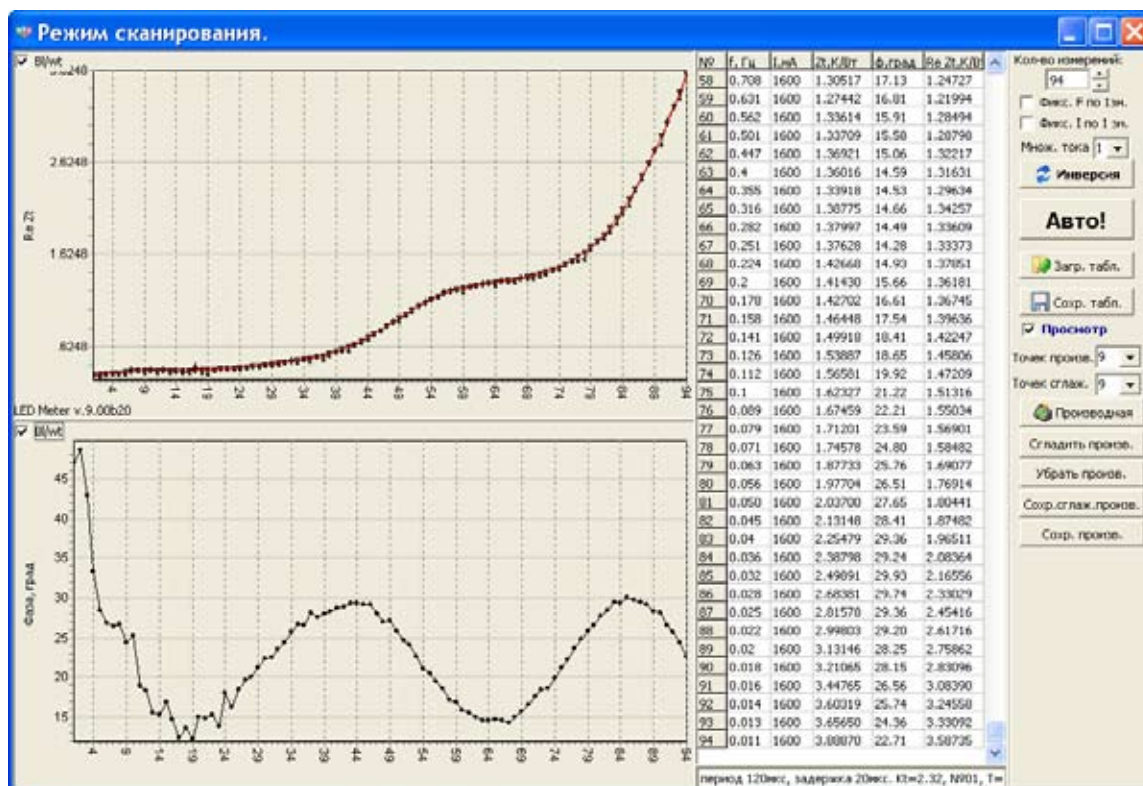


Рис. 7. Результаты измерения зависимости теплового импеданса от частоты модуляции греющей мощности (образец – ИМС 1636PP4У, $T = 50^\circ\text{C}$, $I_{cp} = 1,6 \text{ A}$)

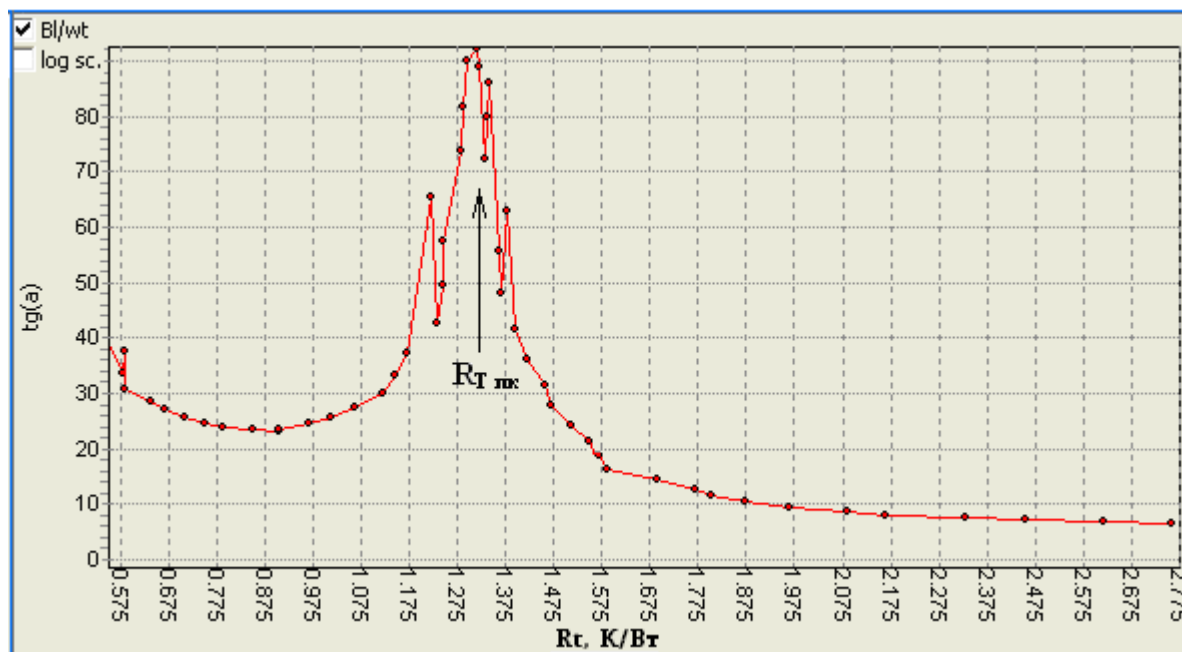


Рис. 8. Результат определения компоненты теплового сопротивления «переход – корпус» (образец – ИМС 1636PP4У, $T = 50^\circ\text{C}$, $I_{cp} = 1,6 \text{ A}$)

Максимум кривой $[dRe Z_r/dv]^{-1}$ соответствует тепловому сопротивлению $R_{Tнк} = 1,34 \text{ К/Вт}$. Значение теплового сопротивления «переход – корпус», полученное по ОСТ 11 0944–96 с помощью измерительного стенда (рис. 4), равно $1,39 \text{ К/Вт}$. Аналогичные измерения

при комнатной температуре окружающей среды дали соответственно $1,41 \text{ К/Вт}$ и $1,28 \text{ К/Вт}$. Таким образом, результаты измерения теплового сопротивления при $T_c = 50^\circ\text{C}$ и $T_c = 27^\circ\text{C}$, полученные по ОСТ 11 0944–96 и модуляционным методом, отличаются соответственно

на 3,7% и 9,2%. Такое отличие в результатах измерений теплового сопротивления вполне допустимо, поскольку погрешность измерения по ОСТ 11 0944–96 оценивается в 10% при доверительной вероятности 0,95.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опыт эксплуатации измерителя теплового импеданса в АО «ПКК Миландр» (г. Зеленоград) показал, что результаты измерения теплового сопротивления ИМС, полученные по ОСТ 11 0944–96 (метод постоянной температуры кристалла) и методом модуляции греющей мощности, в пределах погрешности согласуются между собой.

В отличие от метода, основанного на ОСТ 11 0944–96, модуляционный метод позволяет надежно производить измерения теплового сопротивления маломощных ИМС с малыми размерами кристалла, поскольку в нем отсутствуют проблемы, связанные с креплением термопары к корпусу ИМС.

Несомненным достоинством модуляционного метода является возможность измерения не только сопротивления «переход – корпус», но и других компонент теплового сопротивления, например, компоненты «переход – кристаллодержатель». Это может быть использовано при контроле качества монтажа кристалла в корпус. Особенно хорошо этот метод зарекомендовал себя при проведении различных технологических проб в процессе производства ИМС (типа подбора режимов сушки клея), когда требуется оперативно оценить относительные значения теплового сопротивления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тугов Н.М., Глебов Б.А., Чарыков Н.А. Полупроводниковые приборы. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.
2. Мартынов И.А. Измерение теплового сопротивления кристалл – корпус микросхем и полупроводниковых приборов с использованием тепловизора // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2016. – № 4. – С. 3–6.
3. ОСТ 11 0944-96. Микросхемы интегральные и приборы полупроводниковые. Методы расчета, измерения и контроля теплового сопротивления. – М.: ГУП НПП Пульсар, 1997. – 110 с.
4. IC Thermal Measurement Method – Electrical Test Method (Single Semiconductor Device) EIA/JEDEC JESD51-1 standard. – URL: <http://www.jedec.org/standards-documents/results/JESD51-1>.
5. Integrated Circuits Thermal Test Method Environment Conditions - Natural Convection (Still Air) EIA/JEDEC JESD51-2 standard. – URL: <http://www.resheji.com/uploads/Standard/JESD51-2.pdf>.
6. Integrated Circuits Thermal Test Method Environmental Conditions - Natural Convection (Still Air) EIA/JEDEC JESD51-2a standard. – URL: <http://mathscinotes.com/wp-content/uploads/2013/12/jesd51-2a.pdf>.
7. 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 JESD51-14 standard. – URL: http://www.jedec.org/sites/default/files/docs/JESD51-14_1.pdf.

8. Szekely V. and Tran Van Bien: Fine structure of heat flow path in semiconductor devices: a measurement and identification method // Solid-State Electronics, V. 31, pp. 1363–1368 (1988).

9. Schweitzer D., Pape H., Chen L. Transient Measurement of the Junction-To-Case Thermal Resistance Using Structure Functions: Chances and Limits // 24th IEEE SEMI-THERM Symposium. – San Jose, CA, USA (2008).

10. Спектральный и временной методы измерения теплового сопротивления полупроводниковых приборов // В.И. Смирнов [и др.] // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2014. – № 10. – С. 58–63.

11. Метод измерения компонент теплового сопротивления полупроводниковых приборов и его практическая реализация / В.И. Смирнов [и др.] // Автоматизация процессов управления. – 2017. – № 2. – С. 98–105.

12. T3Ster – Thermal Transient Tester. – URL: <https://www.mentor.com/micred/t3ster>.

13. Измерение теплового импеданса светодиодов и светодиодных матриц / В.И. Смирнов [и др.] // Измерительная техника. – 2017. – № 1. – С. 33–36.

14. Theoretical and Experimental Study of Thermal Management in High-Power AllnGaN LEDs / A. Chernyakov [and others] // 15th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems- EuroSimE. Ghent, Belgium, 2014. s. 314–318.

REFERENCES

1. Tugov N.M., Glebov B.A., Charykov N.A. *Poluprovodnikovye pribory* [Semiconductor Devices]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 576 p.
2. Martynov I.A. Izmerenie teplovogo soprotivleniia kristall-korpus mikroskhem i poluprovodnikovyykh priborov s ispolzovaniem teplovizora [Die-Case Thermal Resistance of ICs and Semiconductor Devices Measurements with Thermal Image Camera]. *Izvestiia SPbGETU "LETI"* [Izvestiya SPbGETU "LETI"], 2016, no. 4, pp. 3–6.
3. *OST 11 0944-96. Mikroskhemy integralnye i pribory poluprovodnikovye. Metody rascheta, izmereniia i kontroliia teplovogo soprotivleniia* [Industry Standard OST 11 0944-96. Integrated Circuits and Semiconductor Devices. Methods of Calculation, Measurement and Monitoring of the Thermal Resistance]. Moscow, GUP NPP Pulsar Publ., 1997. 110 p.
4. *EIA/JEDEC JESD51-1 Standard. IC Thermal Measurement Method – Electrical Test Method (Single Semiconductor Device)*. Available at: <http://www.jedec.org/standards-documents/results/JESD51-1>.
5. *EIA/JEDEC JESD51-2 Standard. Integrated Circuits Thermal Test Method Environment Conditions – Natural Convection (Still Air)*. Available at: <http://www.resheji.com/uploads/Standard/JESD51-2.pdf>.
6. *EIA/JEDEC JESD51-2a Standard. Integrated Circuits Thermal Test Method Environmental Conditions – Natural*

Convection (Still Air). Available at: <http://mathscinotes.com/wp-content/uploads/2013/12/jesd51-2a.pdf>.

7. JEDEC JESD51-14 Standard. *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*. Available at: http://www.jedec.org/sites/default/files/docs/JESD51-14_1.pdf.

8. Szekely V. and Tran Van Bien. Fine Structure of Heat Flow Path in Semiconductor Devices: a Measurement and Identification Method. *Solid-State Electronics*, 1988, vol. 31, pp. 1363–1368.

9. Schweitzer D., Pape H., Chen L. Transient Measurement of the Junction-To-Case Thermal Resistance Using Structure Functions: Chances and Limits. *24th IEEE SEMI-THERM Symposium*. San Jose, CA, USA, 2008.

10. Smirnov V.I. et al. Spektralnyi i vremennoi metody izmereniia teplovogo soprotivleniia poluprovodnikovyykh priborov [Spectral and Temporal Method for Measuring the Thermal Resistance of Semiconductor Devices]. *Promyshlennye ASU i kontroly* [Industrial Automatic Control Systems and Controllers], 2014, no. 10, pp. 58–63.

11. Smirnov V.I. et al. Metod izmereniia komponent teplovogo soprotivleniia poluprovodnikovyykh priborov i ego prakticheskaia realizatsiia [The Method for Measuring Thermal Resistance Components of Semiconductor Devices and its Practical Implementation]. *Avtomatizatsiia protsessov upravleniia* [Automation of Control Processes], 2017, no. 2, pp. 98–105.

12. T3Ster – *Thermal Transient Tester*. Available at: <https://www.mentor.com/micred/t3ster>.

13. Smirnov V.I. et al. Izmerenie teplovogo impedansa svetodiodov i svetodiodnykh matrits [Measurement of the Thermal Impedance of Light-Emitting Diodes and Light-Emitting Diode Matrices]. *Izmeritelnaia tekhnika* [Measurement Techniques], 2017, no. 1, pp. 33–36.

14. Cherniakov A. et al. Theoretical and Experimental Study of Thermal Management in High-Power AlInGaN LEDs. *15th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems – EuroSimE*. Ghent, Belgium, 2014, pp. 314–318.