

DOI: 10.17725/rensit.2023.15.117

## Моделирование теплоэлектрических процессов в силовых модулях на MOSFET-транзисторах

<sup>1,2</sup>Смирнов В.И., <sup>1</sup>Ходаков А.М., <sup>1</sup>Гавриков А.А.

<sup>1</sup>Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Ульяновский филиал, <http://www.ulireran.ru/>

Ульяновск 432071, Российская Федерация

<sup>2</sup>Ульяновский государственный технический университет, <https://www.ulstu.ru/>,

Ульяновск 432027, Российская Федерация

E-mail: [smirnov-vi@mail.ru](mailto:smirnov-vi@mail.ru), [hod22am@mail.ru](mailto:hod22am@mail.ru), [a.gavrikoff@gmail.com](mailto:a.gavrikoff@gmail.com)

Поступила 25.04.2023, рецензирована 03.05.2023, принята 10.05.2023

Представлена действительным членом РАЕН В.В. Колесовым

**Аннотация.** Представлена тепловая модель силового модуля на MOSFET-транзисторах, смонтированных на медно-керамической плате, изготовленной по технологии DBC (Direct Bond Copper – прямое присоединение меди). Анализ тепловых процессов в модуле, возникающих при импульсном нагреве отдельных транзисторов, производился на основе решения уравнения теплопроводности методом конечных элементов с использованием программной среды COMSOL Multiphysics. В рамках модели был произведен расчет теплового поля по поверхности платы DBC и определены температуры перегрева всех транзисторов модуля. Результаты моделирования сравнивались с аналогичными результатами, полученными экспериментально. В качестве экспериментальных использовались результаты измерения элементов матрицы тепловых импедансов, полученных методом модуляции греющей мощности по гармоническому закону. Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о том, что расчетные и экспериментальные значения температуры перегрева кристаллов находятся в хорошем согласии друг с другом, что, в свою очередь, подтверждает корректность разработанной тепловой модели силового модуля.

**Ключевые слова:** силовой модуль, MOSFET-транзистор, тепловая модель, температурное поле, тепловое сопротивление

УДК 621.382.32

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 23-29-00026.

**Для цитирования:** Смирнов В.И., Ходаков А.М., Гавриков А.А. Моделирование теплоэлектрических процессов в силовых модулях на MOSFET-транзисторах. РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2023, 15(2):117-124. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.117.

## Modeling of thermoelectrical processes in a power MOSFET modules

<sup>1,2</sup>Vitaliy I. Smirnov, <sup>1</sup>Alexander M. Hodakov, <sup>1</sup>Andrey A. Gavrikov

<sup>1</sup>Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Ulyanovsk Branch, <http://www.ulireran.ru/>  
Ulyanovsk 432071, Russian Federation

<sup>2</sup>Ulyanovsk State Technical University, <https://www.ulstu.ru/>

Ulyanovsk 432027, Russian Federation

E-mail: [smirnov-vi@mail.ru](mailto:smirnov-vi@mail.ru), [hod22am@mail.ru](mailto:hod22am@mail.ru), [a.gavrikoff@gmail.com](mailto:a.gavrikoff@gmail.com)

Received April 25, 2023, peer-reviewed May 03, 2023, accepted May 10, 2023

**Abstract:** The paper represents thermal model of power MOSFET module based on a transistors mounted on copper-ceramic DBC (Direct Bond Copper) plate. The analysis of thermal processes in the module caused by pulse heating of particular transistors was performed by the finite elements method using COMSOL Multiphysics. The model performs estimation of the temperature field on the DBC plate and transistors overheat temperature. The modeling results was compared to the experiment – thermal impedance matrix measured by the modulation method using the heating power modulated by the harmonic law. Analysis of the data obtained allows to conclude that the calculated and experimental values of the dies overheating temperature are in good agreement with each other and confirms the correctness of the developed thermal power module model.

**Keywords:** power module, MOSFET, thermal model, temperature filed, thermal resistance

UDC 621.382.32

**Acknowledgments:** The work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 23-29-00026).

**For citation:** Vitaliy I. Smirnov, Alexander M. Hodakov, Andrey A. Gavrikov. Modeling of thermoelectrical processes in a power MOSFET modules. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2023, 15(2):117-124e. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.117.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (118)
  2. ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ (118)
  3. ТЕПЛОВАЯ МОДЕЛЬ СИЛОВОГО МОДУЛЯ (120)
  4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ АНАЛИЗ (121)
  5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (124)
- ЛИТЕРАТУРА (124)

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Силовые модули нашли широкое применение в различных областях промышленности, включая транспорт, электроэнергетику, металлургию, промышленный электропривод и др. Обычно они состоят из нескольких мощных MOSFET-или IGBT-транзисторов, смонтированных на общей теплопроводящей подложке, заключенных в герметичный корпус. Основные требования, предъявляемые к силовым модулям, это способность коммутировать большие токи с высокой частотой и выдерживать большие напряжения в закрытом состоянии. В отличие от аналогичных по назначению устройств, реализованных на дискретных электронных компонентах, силовые модули обладают гораздо более высокой плотностью мощности. В них из-за плотной компоновки кристаллов резко снижены активные и паразитные связи между элементами модуля, что повышает КПД и снижает возможные перегрузки и уровень электромагнитных помех при коммутации транзисторов [1].

Особенностью работы силовых модулей является то, что в каждый момент времени в открытом состоянии находится только часть транзисторов, другие транзисторы закрыты. Результатом является неоднородный нагрев кристаллов модуля и, как следствие, неоднородное распределение температуры по поверхности подложки. Это может привести к тому, что при средней температуре по подложке в пределах нормы, некоторые кристаллы будут иметь температуру выше предельно допустимой. Чтобы этого не произошло, необходимо контролировать температуру каждого кристалла модуля. Таковую задачу можно решить либо на основе анализа тепловой модели, либо на основе измерения матрицы тепловых импедансов, которая учитывает перекрестные тепловые связи между транзисторами модуля.

## 2. ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследований являлся силовой модуль SK85MH10T производства компании Semikron, состоящий из четырех мощных MOSFET-транзисторов, смонтированных на плате, изготовленной по технологии DBC (Direct Bond Copper – прямое присоединение меди). Конструкция модуля представлена на **Рис. 1а**, где цифрами отмечены: 1 – кристалл; 2 – переключатель; 3 – плата DBC; 4 – радиатор; 5 – диэлектрик; 6 – основание модуля. Основой платы DBC является керамическая подложка из

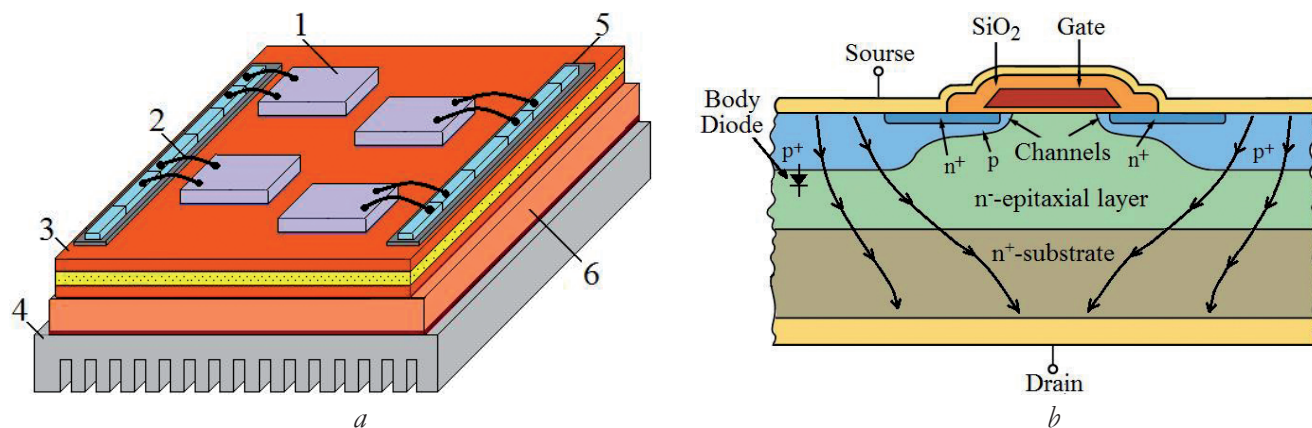


Рис. 1. Силовой модуль SK85MH10T: а) конструкция; б) структура MOSFET-транзистора.

$Al_2O_3$ , с двух сторон которой методом спекания в атмосфере кислорода присоединена медная фольга. Медная фольга обеспечивает высокую электропроводность и теплопроводность монтажному слою платы DBC, а керамическая основа – хорошие изоляционные свойства. Структура транзистора, сформированного в каждом кристалле модуля, показана на Рис. 1б.

Для исследования взаимного влияния тепловых связей между транзисторами модуля производились измерения перекрестных тепловых сопротивлений и определение элементов матрицы тепловых импедансов. При проведении таких измерений для поддержания температуры основания модуля постоянной он крепился к радиатору с помощью термопасты. После проведения измерений перекрестных тепловых сопротивлений крышка модуля была демонтирована с тем, чтобы можно было определить точные размеры кристаллов и их расположение на плате DBC, что необходимо для моделирования тепловых процессов, происходящих при пропускании импульсов греющего тока через транзисторы модуля.

На Рис. 1б показана только часть структуры мощного MOSFET-транзистора, а именно, его базовая ячейка. В действительности мощный MOSFET-транзистор состоит из множества таких базовых ячеек, количество которых может составлять несколько тысяч. Особенностью структуры является наличие в каждой базовой ячейке антипараллельного диода между  $p+$ -областью истока и  $n$ -областью стока. При открытом транзисторе, когда ток протекает от стока к истоку, антипараллельный диод никак не влияет на работу транзистора.

Тем не менее, стандартом JEDEC [2] его рекомендуется использовать для измерения температуры кристалла. Для этого через диод пропускают небольшой измерительный ток (на Рис. 1б показан стрелками) и измеряют напряжение USD между истоком и стоком, которое уменьшается по линейному закону с увеличением температуры кристалла. При этом следует учесть, что напряжение USD измеряется у множества параллельно соединенных диодов, при этом значение USD зависит от локальной температуры кристалла. В случае неоднородного распределения температуры по кристаллу измеренное напряжение USD будет определять наиболее высокую локальную температуру кристалла.

Наиболее широко используемым методом исследований теплоэлектрических процессов в силовых модулях является анализ их тепловой модели. Для построения модели часто используют принцип теплоэлектрической аналогии [3], согласно которому тепловым параметрам (тепловому потоку, температуре, тепловому сопротивлению, теплоемкости и т.д.) соответствует электрический аналог (сила тока, напряжение, сопротивление, электрическая емкость и т.д.). В этом случае объект представляется схемой замещения, состоящей из RC-цепочек, соединенных определенным образом согласно его конструкции. Обычно используют схемы замещения Кауэра или Фостера [4]. Тепловые процессы, происходящие в объекте, математически описываются аналогично электрическим процессам в схеме замещения.

Для определения параметров схемы замещения используют либо информацию о материале и геометрии элементов конструкции объекта, либо опираются на экспериментально полученные результаты. Иллюстрацией первого подхода является работа [5], в которой авторам удалось рассчитать параметры всех элементов силового модуля из шести пар IGBT-транзисторов и диодов, расположенных на медном основании, имеющим тепловой контакт с алюминиевым радиатором. Для экспериментального определения параметров схемы замещения часто используют измерения переходных характеристик. Для этого через объект пропускают последовательность импульсов греющего тока с нарастающей по логарифмическому закону длительностью и после каждого импульса измеряют отклик на это воздействие – изменение температуры кристаллов до достижения стационарного состояния. Анализ кривой нагрева позволяет определять компоненты теплового сопротивления, используемые для построения модели многокристалльной системы [6]. Довольно широко используют методы моделирования, основанные на решении уравнения теплопроводности. При этом для расчета тепловых потоков в многокристалльной системе используют либо метод конечных элементов [7], либо метод дифференциальных разностей [8].

Процессы отвода тепла от нагретых кристаллов через подложку к основанию корпуса модуля, а также латеральные потоки к соседним кристаллам модуля характеризуются матрицей тепловых импедансов  $Z_{Txy}(j\omega)$ :

$$\mathbf{T}_x(j\omega) = \mathbf{Z}_{Txy}(j\omega) \cdot \mathbf{P}_y(j\omega), \quad (1)$$

$$\text{где } \mathbf{T}_x = \begin{pmatrix} T_1 \\ \dots \\ T_m \end{pmatrix}, \quad \mathbf{P}_y = \begin{pmatrix} P_1 \\ \dots \\ P_n \end{pmatrix}, \quad \mathbf{Z}_{Txy} = \begin{pmatrix} Z_{T11} & \dots & Z_{T1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ Z_{Tm1} & \dots & Z_{Tmn} \end{pmatrix}.$$

Одномерные массивы  $T_x(j\omega)$  и  $P_y(j\omega)$  представляют собой частотно-зависимые характеристики температуры в точке  $X$  и рассеиваемой мощности в точке  $Y$ , а  $Z_{Txy}(j\omega)$  определяет тепловую связь между точками  $X$  и  $Y$ . Для определения тепловой связи между каждой парой элементов, входящих в состав системы, авторы работы [9] предложили использовать метод PRBS (Pseudorandom

Binary Sequence – псевдослучайная двоичная последовательность). PRBS – это специальный сигнал, который имеет практически постоянный спектр в широком диапазоне частот. Применяя PRBS в качестве входной мощности  $P_y(t)$  и измеряя температурный отклик  $T_x(t)$ , можно определить элементы матрицы тепловых импедансов:

$$Z_{Txy}(\omega) = \frac{\mathbf{F}(T_x(t))}{\mathbf{F}(P_y(t))} = \frac{T_x(\omega)}{P_y(\omega)},$$

где  $T_x(t)$  и  $P_y(t)$  – временные представления температуры в точке  $X$  и мощности, рассеиваемой в точке  $Y$ , а  $\mathbf{F}$  обозначает дискретное Фурье-преобразование.

Другой подход был использован в работе [10], где авторы для измерения элементов матрицы использовали модуляционный метод воздействия тепловой мощности на объект измерения. Для этого через транзисторы модуля пропускалась последовательность импульсов греющего тока с фиксированной амплитудой и периодом следования, но с изменяющейся по гармоническому закону длительностью [11]. Это вызывало периодическое изменение температуры кристаллов с той же частотой модуляции, что и у греющей мощности, но со сдвигом по фазе. Измерив амплитуду переменной составляющей температуры и фазовый сдвиг, можно определить элементы матрицы тепловых импедансов.

### 3. ТЕПЛОВАЯ МОДЕЛЬ СИЛОВОГО МОДУЛЯ

Объектом теплового моделирования является силовой модуль SK85MH10T, конструкция которого приведена на Рис. 1а. Модуль состоит из четырех мощных MOSFET-транзисторов, смонтированных на медно-керамическую плату DBC размерами  $b \times c \times h_p$ . Транзисторы сформированы в кремниевых кристаллах квадратного сечения  $a \times a \times h_c$ . Плата DBC расположена на радиаторе, поддерживающем температуру нижней поверхности постоянной.

Температурное поле в структуре силового модуля находится из решения нестационарного уравнения теплопроводности:

$$c_i(T_i) \rho_i(T_i) \frac{\partial T_i}{\partial t} = \nabla_{x,y,z} (\lambda_i(T_i) \nabla_{x,y,z} T_i), (i=1, \dots, 5) \quad (2)$$

где  $\lambda_i(T_i)$ ,  $c_i(T_i)$ ,  $\rho_i(T_i)$  – коэффициенты теплопроводности, удельной теплоемкости и плотности слоев структуры.

Начальные и граничные условия решения задачи будут:

$$T_i(x, y, z, 0) = T_0,$$

где  $T_0$  – температура окружающей среды. На верхней поверхности кристаллов транзисторов задается плотность рассеиваемой кристаллом транзистора тепловой мощности:

$$q_i(t) = -\lambda_i(T_i) \left. \frac{\partial T_i}{\partial z} \right|_{z=h_p+h_c}, (i = 1, \dots, 4). \quad (3)$$

На нижней границе модельной структуры, которая находится в зоне контакта с основанием модуля, задается условие растекания теплового потока:

$$-\lambda_5(T_5) \left. \frac{\partial T_5}{\partial z} \right|_{z=0} = \alpha_{sp}(T_5(x, y, 0, t) - T_0),$$

где  $\alpha_{sp} = 1/(b \times c \times R_{sp})$  – эффективный коэффициент теплообмена платы DBC с основанием силового модуля и радиатором, а  $R_{sp}$  – тепловое сопротивление растекания [12]. На всех остальных свободных поверхностях  $\Sigma$  структуры силового модуля теплообмен с внешней средой отсутствует:

$$\left. \frac{\partial T_i}{\partial n} \right|_{\Sigma} = 0.$$

Решение уравнения теплопроводности (2) производилось методом конечных элементов с использованием программной среды COMSOL Multiphysics. Размеры кристалла транзистора составляли  $a \times a \times h_c = 6 \times 6 \times 0.5 \text{ мм}^3$ , а прямоугольной платы DBC  $b \times c \times h_p = 40 \times 28 \times 1.0 \text{ мм}^3$ . Основные физические свойства материалов структуры исследуемого силового модуля представлены в **Таблице 1**. Используемые при решении тепловой задачи зависимости теплофизических характеристик кремния от температуры были взяты из

**Таблица 1**

Физические параметры элементов конструкции силового модуля

Элемент структуры	Материал	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$c_p$ , Дж/(кг·К)
Кристалл	Si	2330	$\lambda(T)$	$c_p(T)$
DBC плата	Cu	8700	400	385
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3900	27	776

библиотеки материалов COMSOL. Начальная температура  $T_0 = 300 \text{ К}$ .

Как и в работе [10], моделировался вариант нагрева модуля широтно-импульсно модулированными импульсами тока только двух транзисторов 1 и 2. В результате протекания через транзистор импульсов тока средняя за период следования греющая мощность изменялась по гармоническому закону:

$$P(t) = P_{av} + P_1 \sin(2\pi\nu t),$$

где  $P_{av}$  – среднее значение греющей мощности,  $P_1 = aP_{av}$  – амплитуда переменной составляющей греющей мощности,  $\nu$  – частота модуляции  $a$  – коэффициент модуляции. Амплитуда переменной составляющей греющей мощности, рассеиваемой в транзисторе 1,  $P_1 = 1.12 \text{ Вт}$ , в транзисторе 2 значение  $P_1 = 1.04 \text{ Вт}$ , при коэффициенте модуляции  $a = 0.5$ . При частоте  $\nu = 55 \text{ Гц}$  зависимости плотности мощности (3) от времени будут определяться выражением:

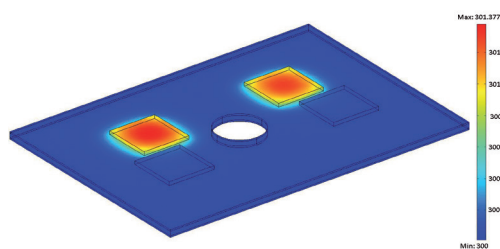
$$q_1(t) = 62222[1 + 0.5 \sin(2\pi 55t)],$$

$$q_2(t) = 57778[1 + 0.5 \sin(2\pi 55t)].$$

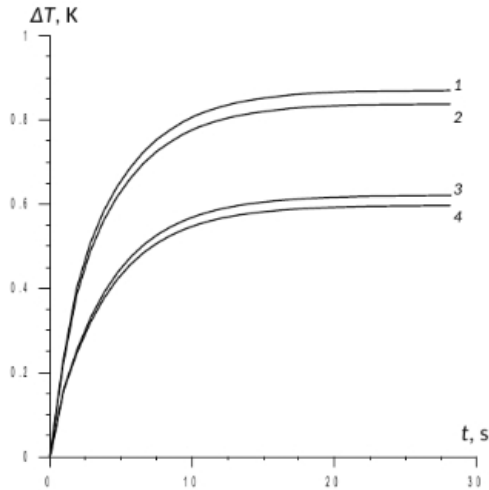
Эффективный коэффициент теплообмена  $\alpha_{sp}$  являлся параметром модели. Его значение вычислялось по представленной в работе [12] методике и уточнялось итерационным методом согласно экспериментальных данных температуры нагрева элемента структуры модуля. В представленном расчетном варианте такой температурой являлась температура перехода 1-го транзистора.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

Результаты расчета температурного поля, созданного нагретыми кристаллами модуля при протекании импульсов тока через транзисторы №1 и №2, представлены на **Рис. 2**. Справа



**Рис. 2.** Результаты расчета температурного поля силового модуля: 1...4 – кристаллы MOSFET-транзисторов, 5 – плата DBC.



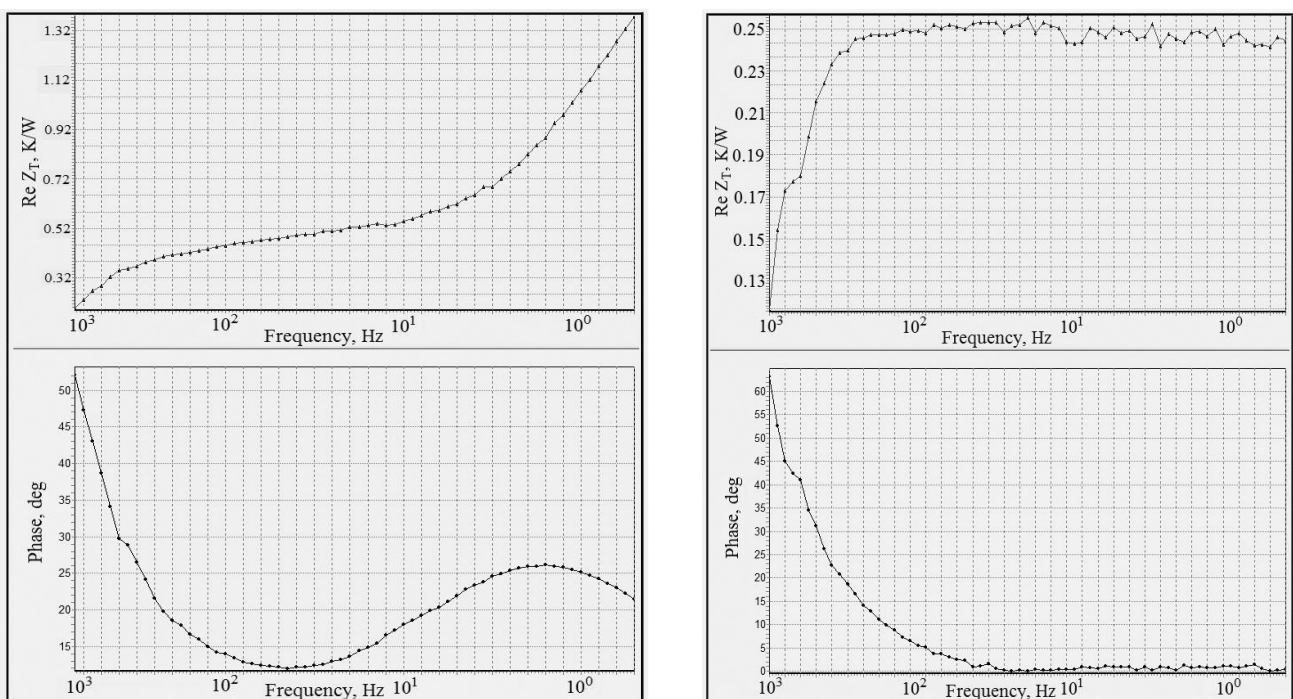
**Рис. 3.** Изменения температуры перегрева транзисторов при импульсном тепловом воздействии (номер кривой соответствует номеру кристалла транзистора).

приведена цветовая температурная шкала, позволяющая оценить температуру в различных точках модуля.

Поскольку силовые модули в основном работают в импульсном режиме, когда часть транзисторов открыта, а остальная часть закрыта, то представляет интерес динамика изменения температуры всех транзисторов, включая транзисторы в закрытом состоянии. Результаты расчета изменения температуры перегрева транзисторов при импульсном воздействии показаны на **Рис. 3**.

Результаты моделирования сравнивались с результатами экспериментальных исследований, представленных в работе [10]. Целью проведенных исследований было измерение элементов матрицы тепловых импедансов силового модуля SK85MH10T, состоящего из четырех мощных MOSFET-транзисторов, смонтированных на медно-керамическую плату. Для решения этой задачи использовался модуляционный метод измерения теплового сопротивления, использующий нагрев каждого транзистора модулированной по гармоническому закону мощностью и измерения переменной составляющей температуры всех остальных транзисторов силового модуля. Отношение амплитуд температуры перехода  $T_{j1}$  и рассеиваемой мощности  $P_1$  определяет модуль теплового импеданса  $Z_{T(\nu)}$  на частоте модуляции  $\nu$ , а отношение мнимой  $\text{Im } T_{j1}$  и вещественной  $\text{Re } T_{j1}$  Фурье-трансформант температуры перехода – тангенс фазы  $\varphi(\nu)$  теплового импеданса. Это позволило определить как диагональные, так и недиагональные элементы матрицы тепловых импедансов.

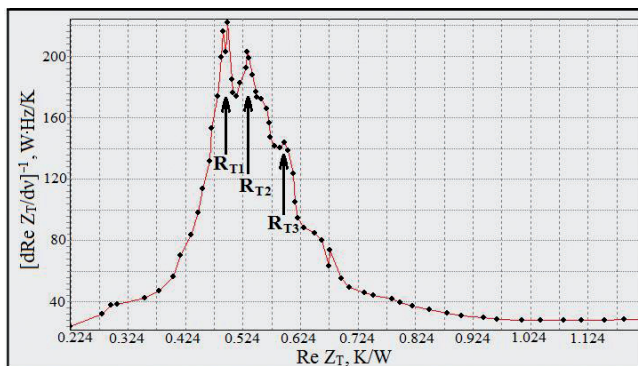
Если объект измерения имеет сложную конструкцию и тепловой поток распространяется по элементам этой конструкции от кристалла к основанию корпуса и далее через радиатор в окружающую среду, то полное тепловое



**Рис. 4.** Зависимость  $\text{Re } Z_{T(\nu)}$  (вверху) и  $\varphi(\nu)$  (внизу): а) для  $Z_{22}$ ; б) для  $Z_{13}$  [10].

сопротивление включает в себя несколько компонентов, например, "переход-корпус", "корпус-радиатор", "радиатор-окружающая среда". Их можно определить на основе измерения и анализа зависимости вещественной части  $\text{Re } Z_{T(\nu)}$  или фазы  $\varphi(\nu)$  теплового импеданса от частоты модуляции греющей мощности  $\nu$ . На **Рис. 4а** представлены результаты измерения таких зависимостей для одного из диагональных членов матрицы тепловых импедансов  $Z_{22}$ , когда импульсы греющего тока пропускались через транзистор № 2, и у него же измерялась температуры перехода  $T_{j1}$ . На **Рис. 4б** представлена аналогичная зависимость для элемента матрицы  $Z_{13}$ , когда тепловая мощность рассеивалась в транзисторе № 1, а температурный отклик измерялся у транзистора № 3. Видно, что характер зависимости  $\text{Re } Z_{T(\nu)}$  для  $Z_{13}$  отличается от аналогичной зависимости для  $Z_{22}$  – в ней не наблюдается рост теплового импеданса при уменьшении частоты модуляции до нескольких герц. Кроме того, в отличие от  $Z_{22}$ , не наблюдается минимум в частотной зависимости фазы  $\varphi(\nu)$  теплового импеданса, а само значение фазы в широком диапазоне частот составляет всего несколько угловых градусов.

При наличии нескольких компонент теплового сопротивления в зависимости  $\text{Re } Z_{T(\nu)}$  появляются особенности в виде пологих участков или точек перегиба. Для выявления этих особенностей производилось дифференцирование кривой  $\text{Re } Z_{T(\nu)}$  по частоте модуляции  $\nu$ . Результат обработки  $Z_{T(\nu)}$ , включающей в себя вычисление  $(d\text{Re } Z_{T(\nu)}/d\nu)^{-1}$  как функции  $\text{Re } Z_{T(\nu)}$ , представлен на **Рис. 5**. Компоненты теплового сопротивления проявляются в виде максимумов, положение



**Рис. 5.** Компоненты теплового сопротивления транзистора №2 силового модуля [10].

которых относительно оси абсцисс определяет их значения. Для транзистора № 2 значения этих компонент равны  $R_{T1} = 0.495$  К/Вт,  $R_{T2} = 0.532$  К/Вт и  $R_{T3} = 0.596$  К/Вт. Результаты аналогичных измерений для других транзисторов модуля отличаются между собой не более, чем на 3%.

Поочередный нагрев всех транзисторов модуля на разных частотах модуляции греющей мощности и измерение отклика на это воздействие позволили определить диагональные и недиагональные элементы матрицы тепловых импедансов  $Z_{Txy}$  [10]:

$$Z_{Txy} = \begin{pmatrix} 0.534+0.102j & 0.263 & 0.243 & 0.268 \\ 0.267 & 0.532+0.104j & 0.273 & 0.263 \\ 0.264 & 0.278 & 0.546+0.103j & 0.268 \\ 0.273 & 0.261 & 0.264 & 0.536+0.100j \end{pmatrix} \quad (4)$$

Диагональные члены матрицы являются комплексными величинами, вещественные части которых определяют компоненты теплового сопротивления "переход-основание модуля" всех транзисторов модуля. Для недиагональных членов матрицы, определяющих перекрестные тепловые связи между транзисторами, фаза не превышает  $2^\circ$ , поэтому мнимая часть недиагональных членов практически равна нулю.

Используя элементы матрицы  $Z_{Txy}$  (4), и зная мощность, рассеиваемую в тех или иных транзисторах, можно по формуле (1) рассчитать температуру кристалла любого транзистора силового модуля. Для проверки этого производился одновременный нагрев 1-го и 2-го транзисторов модулированной по гармоническому закону мощностью, и измерялись температуры перегрева  $\Delta T$  всех транзисторов модуля. Результаты приведены в первой строке Таблицы 1. Во второй строке **Таблицы 2** приведены результаты расчета температуры перегрева, опирающегося на измеренные значения элементов матрицы тепловых импедансов  $Z_{Txy}$  и мощность рассеяния в 1-м и 2-м транзисторах. В третьей

**Таблица 2.**

Результаты измерения и расчета температуры перегрева транзисторов модуля

	$\Delta T_r, K$	$\Delta T_g, K$	$\Delta T_{g'}, K$	$\Delta T_{g''}, K$
Эксперимент	0.87	0.82	0.63	0.61
Расчет на основе $Z_{Txy}$	0.87	0.84	0.62	0.60
Расчет на основе модели	0.88	0.86	0.59	0.58

строке приведены результаты моделирования, использующие численный метод решения уравнения теплопроводности. Видно, что значения температуры перегрева всех транзисторов силового модуля, полученные различными методами, хорошо согласуются между собой, что подтверждает корректность разработанной тепловой модели силового модуля.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для исследования теплоэлектрических процессов в силовом модуле, состоящим из четырех мощных MOSFET-транзисторов, предложена тепловая модель, основанная на решении уравнения теплопроводности методом конечных элементов с использованием программной среды COMSOL Multiphysics. В рамках модели был произведен расчет теплового поля при импульсном воздействии тепловой мощности на часть кристаллов модуля. Это позволило оценить степень теплового влияния кристаллов между собой и рассчитать температуры перегрева всех кристаллов модуля.

Для проверки достоверности полученных результатов моделирования производилось их сравнение с аналогичными результатами, полученными экспериментально. В качестве экспериментальных использовались результаты измерения элементов матрицы тепловых импедансов, полученных модуляционным методом, а также результаты непосредственных измерений температуры перегрева кристаллов при импульсном воздействии тепловой мощности на отдельные кристаллы модуля. Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о том, что расчетные и экспериментальные значения температуры перегрева кристаллов находятся в хорошем согласии друг с другом, следовательно, разработанная модель адекватно описывает тепловые процессы в рассматриваемом силовом модуле.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Верхулевский К.А. Новые силовые модули компании Microsemi на основе карбида кремния. *Компоненты и технологии*, 2013, 4:138-142.
2. Thermal Impedance Measurements for Vertical Power MOSFETs (Delta Source-Drain Voltage Method). JEDEC JESD24-3 standard.

3. Аронов В.А., Федотов Я.А. *Исследование и испытание полупроводниковых приборов*. М., Высшая школа, 1975, 325 с.
4. Вяхирев В.В. Измерение тепловых характеристик полупроводниковых электронных компонентов. *Технологии в электронной промышленности*, 2013, 3:90-92.
5. Brückner T, Bernet S. Estimation and Measurement of Junction Temperatures in a Three-Level Voltage Source Converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2007, 22:3-12.
6. Luo Z, Ahn H, Nokali M. A thermal model for insulated gate bipolar transistor module. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2004, 19:902-907.
7. Yun C, Malberti P, Ciappa M, Fichtner W. Thermal Component Model for Electrothermal Analysis of IGBT Module Systems. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 2001, 24:401-406.
8. Drogenik U, Kolar JW. Teaching Thermal Design of Power Electronic Systems with Web-Based Interactive Educational Software. *18th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2003, 1:1029-1036.
9. Davidson JN, Stone DA, Foster MP. Real-time prediction of power electronic device temperatures using PRBS-generated frequency-domain thermal cross-coupling characteristics. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30:2950-2961.
10. Смирнов В.И., Сергеев В.А., Гавриков А.А., Шорин А.М. Измерение перекрестных тепловых сопротивлений силовых модулей. *Журнал радиоэлектроники*, 2019, 7:1-15.
11. Smirnov VI, Sergeev VA, Gavrikov AA, Shorin AM. Modulation method for measuring thermal impedance components of semiconductor devices. *Microelectronics Reliability*, 2018, 80:205-212.
12. Sadeghi E, Bahrami M, Djilali N. Thermal Spreading Resistance of Arbitrary-Shape Heat Sources on a Half-Space: A Unified Approach. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 2010, 2:267-277.

**Смирнов Виталий Иванович**

*д.т.н., профессор*

УФ ИРЭ РАН

48/2, ул. Гончарова, Ульяновск 432071, Россия

E-mail: smirnov-vi@mail.ru

**Ходаков Александр Михайлович**

*к.т.н., с.н.с.*

УФ ИРЭ РАН

48/2, ул. Гончарова, Ульяновск 432071, Россия

E-mail: hod22am@mail.ru

**Гавриков Андрей Анатольевич**

*к.т.н., с.н.с.*

УФ ИРЭ РАН

48/2, ул. Гончарова, Ульяновск 432071, Россия

E-mail: a.gavrikoff@gmail.com.