

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.11.5>

УДК: 681.518.3

## ТЕПЛОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В МНОГОКРИСТАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

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

<sup>1</sup> ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, Ульяновский филиал  
432071, г. Ульяновск, ул. Гончарова, д. 48/2  
<sup>2</sup> Ульяновский государственный технический университет  
432027, г. Ульяновск, ул. Северный венец, д. 32

Статья поступила в редакцию 15 августа 2023 г.

**Аннотация.** Представлены результаты исследований теплоэлектрических процессов в многокристалльных системах, частным случаем которых являются силовые модули на полевых или биполярных транзисторах. Для полного описания таких процессов необходимо знать тепловые связи между всеми транзисторами модуля, характеризуемые матрицей тепловых импедансов. Для измерения элементов матрицы предлагается использовать модуляционный метод, основанный на разогреве каждого транзистора модуля переменной тепловой мощностью и измерении температурного отклика на это воздействие всех остальных транзисторов. Предложена также тепловая модель многокристалльной системы и на основе решения уравнения теплопроводности в среде COMSOL Multiphysics произведен расчет температурного поля по подложке, на которой смонтированы кристаллы. Результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными результатами, что говорит об адекватности тепловой модели.

**Ключевые слова:** теплоэлектрические процессы, многокристалльная система, силовой модуль, матрица тепловых импедансов, модуляционный метод.

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

**Автор для переписки:** Гавриков Андрей Анатольевич, [a.gavrikoff@gmail.com](mailto:a.gavrikoff@gmail.com)

## Введение

Многокристалльные системы представляют собой совокупность полупроводниковых кристаллов, смонтированных на общей теплопроводящей подложке. Частным случаем таких систем являются силовые модули на мощных полевых или биполярных транзисторах. В процессе их функционирования транзисторы в открытом состоянии рассеивают довольно большое количество теплоты, что вызывает существенный нагрев кристаллов модуля. Поэтому важным является вопрос оценки качества отвода тепла от активной области кристалла в подложку и далее в радиатор и окружающую среду. Качества отвода тепла характеризуется тепловым сопротивлением «переход-корпус»  $R_{Tjc}$ , которое определяется приращением температуры  $p-n$  перехода транзистора при рассеивании в нем единичной тепловой мощности:

$$R_{Tjc} = \frac{T_j - T_c}{P} = \frac{\Delta T_j}{P} = \frac{\Delta T_j}{I_{heat} \cdot U},$$

где  $T_j$  – температура перехода транзистора;  $T_c$  – фиксированная температура корпуса;  $P$  – мощность, рассеиваемая в транзисторе;  $I_{heat}$  – греющий ток;  $U$  – напряжение.

В технической документации на силовые модули производители в основном указывают тепловое сопротивление  $R_{Tjc}$ , приходящееся на один транзистор, что не в полной мере отражает реальное распределение тепловых потоков между кристаллами и подложкой. Не учитывается, в частности, тот факт, что в процессе функционирования модуля в любой момент времени открытыми являются лишь часть транзисторов, что вызывает дисбаланс температур отдельных кристаллов и возникновение латеральных потоков тепла между кристаллами модуля. Учесть взаимные тепловые связи между кристаллами модуля можно, используя частотно-зависимую матрицу тепловых

импедансов  $Z_{T_{xy}}(\nu)$ , связывающую температуру различных кристаллов  $T_x(\nu)$  с рассеиваемой в них тепловой мощностью  $P_y(\nu)$ :

$$T_x(\nu) = Z_{T_{xy}}(\nu) \cdot P_y(\nu),$$

$$\text{где } \mathbf{T}_x = \begin{pmatrix} T_1 \\ \dots \\ T_m \end{pmatrix}, \mathbf{P}_y = \begin{pmatrix} P_1 \\ \dots \\ P_n \end{pmatrix}, \mathbf{Z}_{T_{xy}} = \begin{pmatrix} Z_{T_{11}} & \dots & Z_{T_{1n}} \\ \dots & \dots & \dots \\ Z_{T_{m1}} & \dots & Z_{T_{mn}} \end{pmatrix}.$$

Знание матрицы тепловых импедансов дает возможность при проектировании силовых модулей оптимизировать их конструкцию, включая выбор материала подложки, относительное расположение кристаллов на подложке и способ их монтажа. Однако следует отметить, что экспериментальное измерение недиагональных элементов матрицы  $Z_{T_{xy}}(\nu)$  по ряду причин затруднено. Большинство стандартных методов измерения теплового сопротивления полупроводниковых транзисторов основано на нагреве объекта импульсом греющего тока  $I_{гр}$  и измерении отклика на это воздействие – изменения температуры перехода  $\Delta T_j$  [1]. При измерении недиагональных элементов матрицы  $Z_{T_{xy}}(\nu)$  необходимо учитывать тот факт, что температурный отклик от нагретого импульсом тока транзистора в результате дисперсии приходит к соседним транзисторам сильно искаженным, что затрудняет точное определение их изменений температуры [2]. Для ослабления влияния дисперсии авторы работы [3] предложили воздействовать на объект измерения специальным сигналом PRBS (Pseudorandom Binary Sequence – псевдослучайная двоичная последовательность), который имеет практически постоянный спектр в широком диапазоне частот. Измерив температурный отклик  $T_x(t)$ , и определив с помощью Фурье-преобразования частотный спектр  $T_x(\nu)$ , удалось определить все элементы матрицы тепловых импедансов.

Альтернативой является метод, использующий воздействие на объект измерения тепловой мощности, модулированной по гармоническому закону, и измерении температурного отклика объекта на такое воздействие при различной частоте модуляции [4]. Используя сканирование по частоте модуляции греющей мощности, можно выявить особенности в частотной зависимости теплового

импеданса  $Z_{Txy}(v)$ , и определить, тем самым, недиагональные элементы матрицы тепловых импедансов.

Для определения элементов матрицы  $Z_{Txy}(v)$  часто используют анализ схемы замещения объекта, представляющей собой совокупность RC-цепочек, соединенных между собой определенным образом в соответствии с его конструкцией [5, 6]. Расчет тепловых потоков в этом случае сводится к расчету электрических токов в схеме замещения. Исследование теплоэлектрических процессов в многокристальных системах возможно также на основе решения уравнения теплопроводности. Расчет тепловых потоков в таких системах производится либо с использованием метода конечных элементов [7], либо метода дифференциальных разностей [8].

## 1. Объект и задачи исследования

Объектом исследования являлась многокристальная система, представляющая собой силовой модуль из трех биполярных транзисторов, сформированных в кремниевых кристаллах (рис. 1). Кристаллы посредством специального адгезива монтировались к медной подложке, которая, в свою очередь, с помощью термопасты крепилась к радиатору. Радиатор предназначен для фиксации температуры нижней плоскости подложки. Чтобы оценить влияние качества монтажа на процесс отвода тепла в подложку, у одного из кристаллов модуля специально создавался дефект монтажа, а именно, адгезив наносился только на часть поверхности соприкосновения кристалла с подложкой.

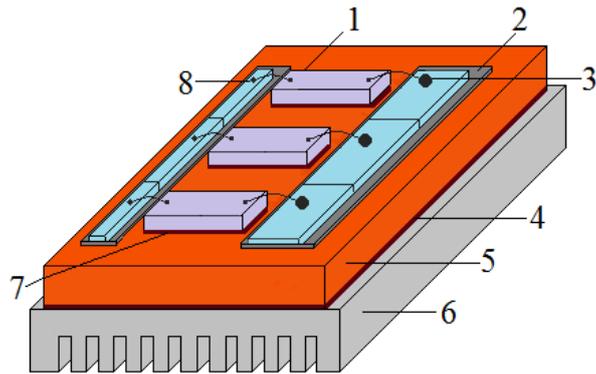


Рис. 1. Объект исследования: 1 – кристалл; 2 – диэлектрик; 3 – вывод эмиттера; 4 – термопаста; 5 – медная подложка; 6 – радиатор; 7 – адгезив; 8 – вывод базы

Исследование теплоэлектрических процессов в силовом модуле включало в себя экспериментальную часть, задачей которой являлось измерение матрицы тепловых импедансов  $Z_{T_{xy}}(\nu)$ , включая ее диагональные и недиагональные элементы, а также теоретический анализ тепловой модели силового модуля. Измерение элементов матрицы тепловых импедансов осуществлялось модуляционным методом [9], основанным на нагреве объекта переменной тепловой мощностью. Для этого через каждый транзистор модуля пропускалась последовательность импульсов греющего тока  $I_{гр}$  с постоянным периодом следования и изменяющейся по гармоническому закону длительностью. Такая широтно-импульсная модуляция греющей мощности вызывала периодическое изменение температуры всех кристаллов модуля  $T_j(t)$ , сдвинутой по фазе относительно мощности  $P(t)$  на некоторый угол  $\varphi$ . Измерив амплитуду переменной составляющей температуры перехода  $T_{j1}$ , и зная амплитуду переменной составляющей рассеиваемой мощности  $P_1$ , можно определить модуль  $Z_T$  и фазу  $\varphi$  теплового импеданса на частоте модуляции  $\nu$ :

$$Z_T = \frac{T_{j1}}{P_1}, \quad \varphi = \arctg \frac{\text{Im } T_j}{\text{Re } T_j},$$

где  $\text{Im } T_j$  и  $\text{Re } T_j$  – мнимая и вещественная Фурье-трансформанты температуры перехода  $T_j(t)$  на частоте модуляции  $\nu$ .

Анализ тепловых процессов в силовом модуле производился в среде COMSOL Multiphysics на основе решения уравнения теплопроводности тепловой

модели методом конечных элементов. Для оценки адекватности полученных результатов моделирования производилось их сравнение с результатами, полученными экспериментально.

## 2. Аппаратно-программный комплекс для измерения $Z_{Txy}(v)$

Измерение элементов матрицы тепловых импедансов  $Z_{Txy}(v)$  объекта исследования производилось с помощью аппаратно-программного комплекса (АПК), в котором реализован модуляционный метод измерения теплового сопротивления. Функциональная схема АПК представлена на рис. 2. Информация о режимах измерения и рабочих параметрах, установленных оператором, посредством USB-интерфейса поступает из компьютера в микроконтроллер, который совместно с источником греющего тока формирует модулированные по длительности импульсы с гармоническим законом модуляции. Источник греющего тока с жесткими требованиями по точности и стабильности выходного тока выполнен по схеме, изложенной в работе [10]. Амплитуда импульсов устанавливается с помощью цифрового потенциометра ЦП. Изменение температуры кристалла транзистора (температуры перехода  $\Delta T_j$ ), вызванное протеканием через него импульсов  $I_{heat}$ , определяется на основе измерения в паузах между импульсами температурочувствительного параметра (ТЧП), линейно зависящего от температуры кристалла. В качестве ТЧП для биполярных транзисторов используют напряжение  $U_{BE}$  между базой и эмиттером транзистора при протекании через эмиттерный переход фиксированного измерительного тока  $I_{meas}$ . Электронные ключи, управляемые микроконтроллером, обеспечивают протекание импульсов  $I_{heat}$  от коллектора к эмиттеру, а в паузах между импульсами – протекание  $I_{meas}$  от базы к эмиттеру.

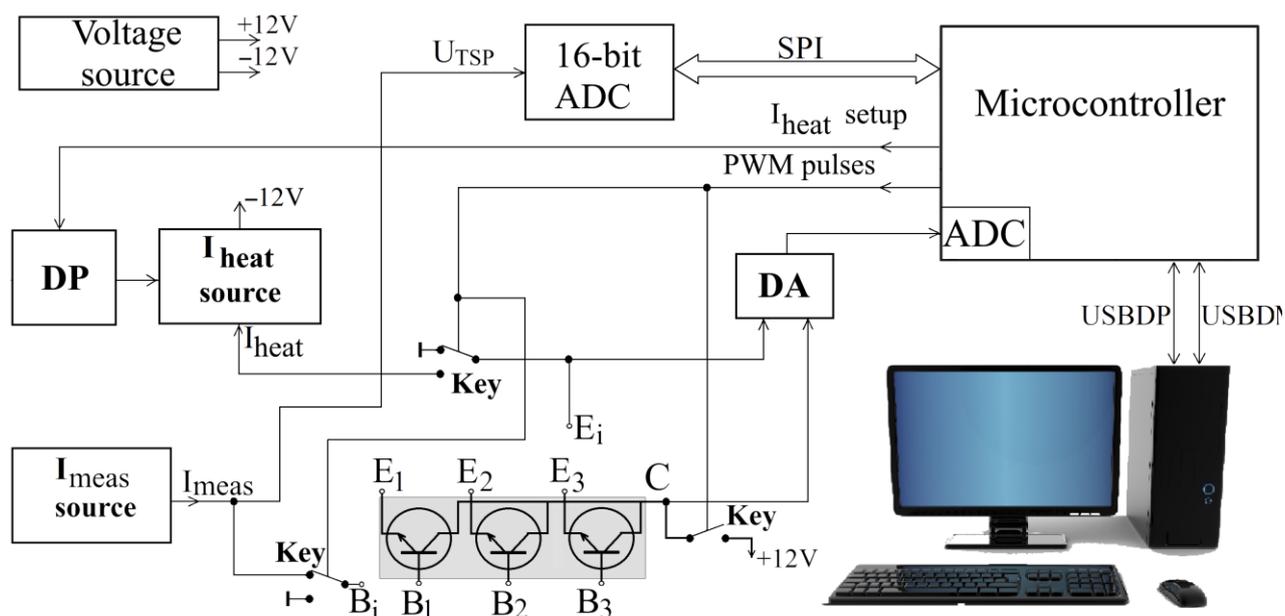


Рис. 2. Функциональная схема аппаратно-программного комплекса.

Для измерения рассеиваемой в транзисторе тепловой мощности напряжение  $U_{CE}$  через дифференциальный усилитель (DA) поступает на вход встроенного в микроконтроллер аналого-цифрового преобразователя (ADC). Напряжение  $U_{BE}$  измеряется внешним 16-разрядным АЦП, взаимодействующим с микроконтроллером посредством последовательного периферийного интерфейса SPI (Serial Peripheral Interface).

Для измерения элементов матрицы тепловых импедансов  $Z_{Txy}(v)$  импульсы  $I_{heat}$  поочередно пропускались через каждый транзистор модуля, и определялся температурный отклик как нагреваемого транзистора, так и всех остальных. При этом нагреваемые транзисторы подключались к АПК по схеме с общей базой, как это рекомендует стандарт [1]. Температурный отклик, представляющий собой изменение температуры кристалла, вызванное воздействием греющего импульса, измерялся с некоторой временной задержкой относительно окончания импульса, необходимой для завершения переходных электрических процессов, возникающих при переключении транзистора из режима нагрева в режим измерения ТЧП.

В случае измерения диагональных членов матрицы  $Z_{Txy}(v)$  регистрировался температурный отклик у нагреваемых транзисторов, для недиагональных членов – температурный отклик у всех соседних транзисторов.

Следует учесть, что в обоих случаях пути, по которым распространяются тепловые потоки, различны. В первом случае тепловой поток распространяется от нагретого кристалла ( $p$ - $n$  перехода транзистора) к подложке и далее в радиатор и окружающую среду. Поэтому общее тепловое сопротивление должно содержать несколько компонент теплового сопротивления, в частности, «переход-подложка» и «подложка-радиатор». В случае измерения перекрестных тепловых сопротивлений тепловой поток распространяется по подложке в горизонтальном направлении и компонента «подложка-радиатор» не должна наблюдаться.

Чтобы определить компоненты теплового сопротивления «переход-подложка» и «подложка-радиатор», производилось измерение зависимости вещественной части  $\text{Re } Z_T(\nu)$  и фазы  $\varphi(\nu)$  теплового импеданса от частоты модуляции  $\nu$  греющей мощности. Указанные зависимости  $\text{Re } Z_T(\nu)$  и  $\varphi(\nu)$  имеют особенности в виде пологих участков и точек перегиба, которые связаны с компонентами теплового сопротивления. Для выявления этих особенностей производилось их сглаживание методом скользящего среднего с последующим дифференцированием по частоте модуляции на основе расчета в каждой точке коэффициентов линейной регрессии.

### 3. Результаты измерения элементов матрицы тепловых импедансов

Зависимость вещественной части  $\text{Re } Z_T(\nu)$  теплового импеданса от частоты модуляции греющей мощности для одного из транзисторов модуля представлена в верхнем окне на рис. 3. Сканирование по частоте осуществлялось с равномерным шагом по логарифмической шкале частот в диапазоне от 2 до 100 Hz (40 измерений на декаду). Измеренная зависимость  $\text{Re } Z_T(\nu)$  имеет особенности, не явно выраженные в виде относительно пологих участков, которые можно выявить путем дифференцирования зависимости  $\text{Re } Z_T(\nu)$  по частоте модуляции  $\nu$  и вычисления  $(d\text{Re } Z_T/d\nu)^{-1}$  как функции  $\text{Re } Z_T$ . Результат такой математической обработки показан в нижнем окне рис. 3.

На графике отчетливо проявляются два локальных максимума, положение которых относительно оси абсцисс определяет два компонента теплового сопротивления. Первый компонент  $R_{T1}$ , равный 2.14 K/W и проявляющийся на частоте модуляции около 8 Hz, соответствует теплового сопротивлению «переход-подложка» силового модуля. Второй компонент  $R_{T2}$  представляет собой тепловое сопротивление «переход-радиатор». Его значение равно 2.32 K/W, а соответствующая частота модуляции примерно равна 4 Hz. Для других транзисторов модуля измерения дали следующие результаты: для 2-го транзистора  $R_{T1} = 2.40$  K/W и  $R_{T2} = 2.60$  K/W; для 3-го транзистора  $R_{T1} = 2.63$  K/W и  $R_{T2} = 2.84$  K/W. Таким образом, у 3-го транзистора с дефектом монтажа кристалла к подложке компоненты теплового сопротивления имеют более высокие значения, чем у других транзисторов модуля. Вместе с тем, отличие относительно невелико, что не позволяет надежно идентифицировать данный дефект.

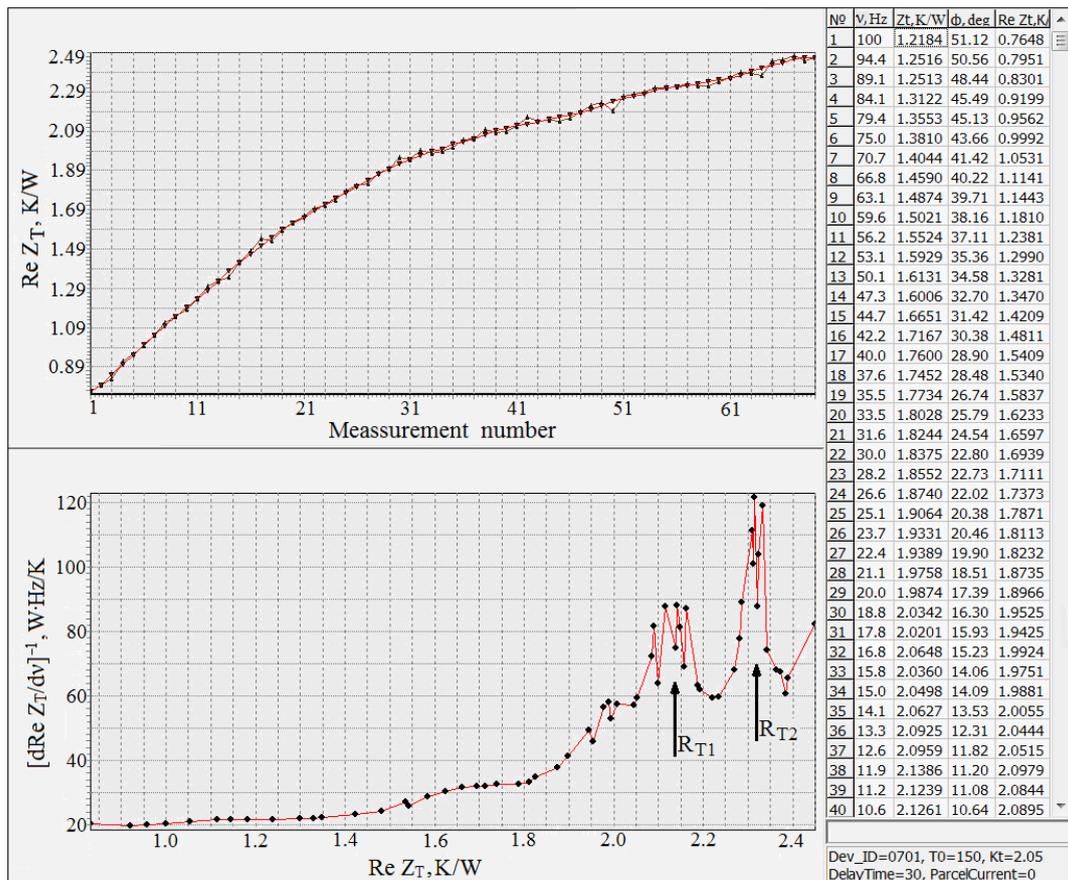


Рис. 3. Частотная зависимость  $Re Z_T(v)$  и результат ее обработки.

Принципиально иной характер имеет частотная зависимость  $\text{Re } Z_T(\nu)$  при измерении перекрестных тепловых импедансов, когда нагревают один из транзисторов, а температурный отклик регистрируют у остальных транзисторов. В этом случае температурный отклик формирует тепловой поток, распространяющийся от нагретого кристалла в горизонтальном направлении по подложке к остальным кристаллам, при этом тепловой поток не проходит через границу раздела «подложка-радиатор». В результате никаких особенностей в зависимости  $\text{Re } Z_T(\nu)$ , измеренной в диапазоне частот модуляции от 200 до 5 Hz, не наблюдается (рис. 4). Значение  $\text{Re } Z_T$  плавно растет с уменьшением частоты и при достижении  $\nu = 12 \text{ Hz}$  выходит на горизонтальный участок, соответствующий тепловому сопротивлению  $R_T = 0.58 \text{ K/W}$ .

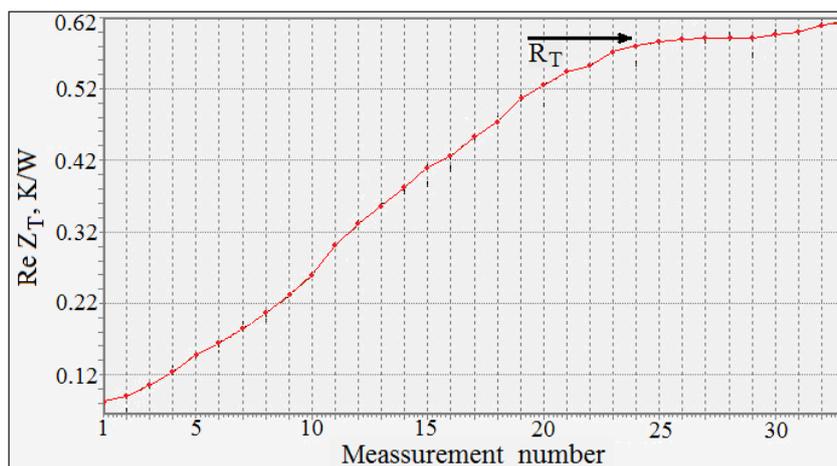


Рис. 4. Результат измерения перекрестного теплового сопротивления.

Частотные зависимости  $\text{Re } Z_T(\nu)$  перекрестных тепловых импедансов для всех транзисторов модуля представлены на рис. 5. Каждая кривая на рисунке обозначена двумя цифрами: первая соответствует номеру нагреваемого транзистора, вторая – транзистору, у которого измеряется температурный отклик.

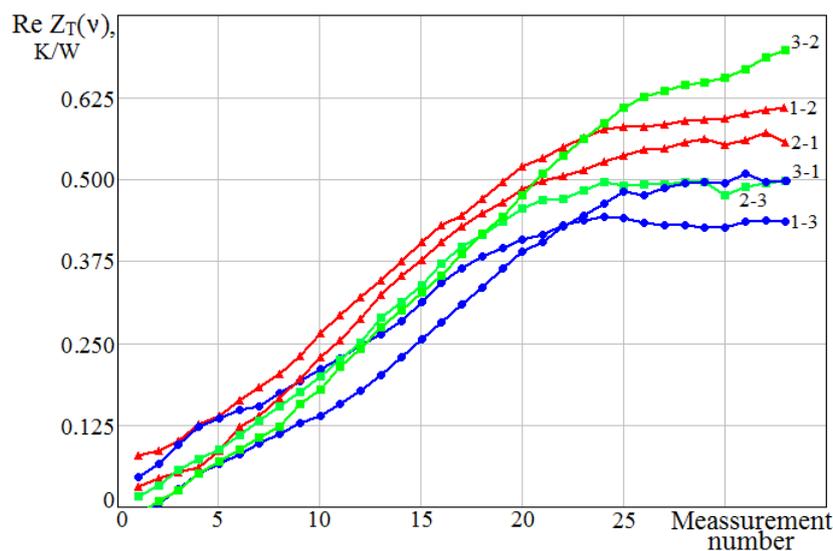


Рис. 5. Результаты измерений перекрестных тепловых сопротивлений силового модуля.

Все полученные частотные зависимости имеют одинаковый характер. С уменьшением частоты модуляции от 200 до 12 Hz тепловой импеданс  $\text{Re } Z_T(v)$  плавно увеличивается, после чего значение  $\text{Re } Z_T(v)$  становится примерно постоянным, слабо зависящим от частоты. Эти значения  $\text{Re } Z_T(v)$  на пологом участке определяют перекрестные тепловые сопротивления  $R_{Tmn}$  между отдельными кристаллами силового модуля. Вместе с тепловыми сопротивлениями «переход-подложка» всех транзисторов модуля они образуют частотно-независимую матрицу тепловых сопротивлений  $R_{Tmn}$ :

$$R_{Tmn} = \begin{pmatrix} 2.14 & 0.58 & 0.44 \\ 0.56 & 2.40 & 0.50 \\ 0.50 & 0.64 & 2.63 \end{pmatrix}.$$

Следует отметить, что полученные результаты указывают на то, что матрица не является симметричной, т.е. для недиагональных элементов матрицы  $R_{Tmn} \neq R_{Tnm}$ . Это можно объяснить некоторым технологическим разбросом толщины адгезива, посредством которого кристаллы монтируются на медную подложку.

#### 4. Тепловая модель многокристальной системы

Моделирование тепловых потоков в многокристальной системе и расчет температурных полей проводились с помощью тепловой модели, схема которой представлена на рис. 6. Расчет температурных полей производился на основе решения уравнения теплопроводности:

$$\nabla_{x,y,z} (\lambda_i(T) \nabla_{x,y,z} T_i(x, y, z)) = 0, \quad i = 1 \dots 6,$$

где  $\lambda_i$  – коэффициенты теплопроводности материалов модели. На верхних поверхностях кристаллов задавалась плотность мощности  $P=W/S_{ar}$ , где  $W$  – рассеиваемая кристаллом тепловая мощность,  $S_{ar}$  – площадь активной области кристалла. Температура нижней поверхности подложки принималась равной температуре радиатора  $T_0$ . Все остальные внешние поверхности структуры многокристальной системы находились в условиях естественного теплообмена с коэффициентом  $\alpha_n$ , являющегося параметром модели. Значение его величины лежит в пределах  $5\text{--}25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . В процессе расчета оно уточнялось итерационным методом согласно экспериментальных данных температуры нагрева выбранного элемента структуры модели. В представленном расчетном варианте такой температурой являлась температура  $p$ - $n$  перехода 3-го кристалла.

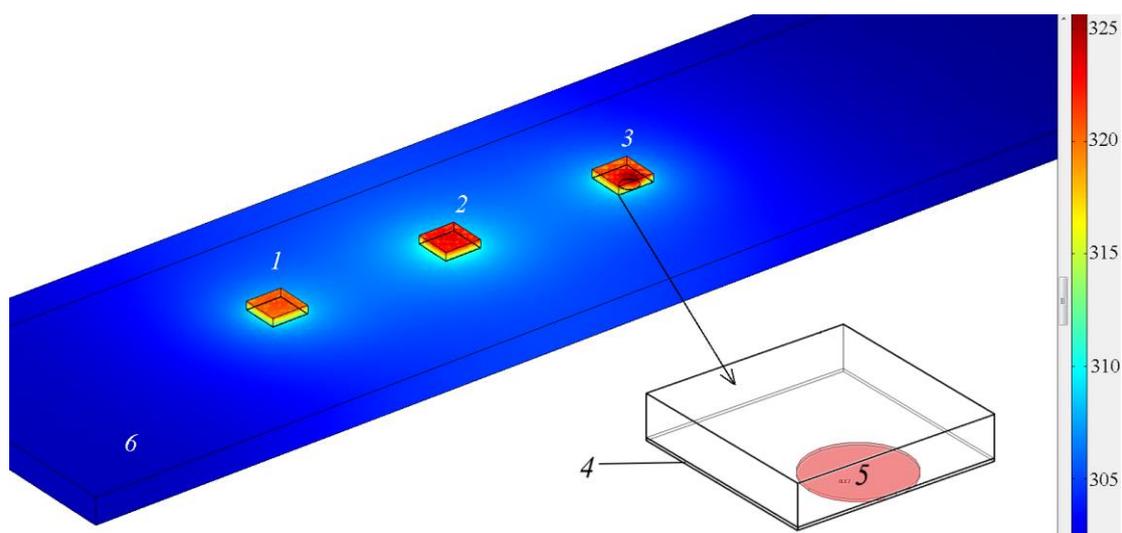


Рис. 6. Тепловая модель многокристальной системы:  
1, 2, 3 – кристаллы; 4 – слой адгезива; 5 – дефект; 6 – основание.

Решение модельной задачи проводилось с помощью программной среды COMSOL Multiphysics. Размеры подложки из меди составляли  $85 \times 17 \times 1.5$  mm, а кристаллов из кремния  $2 \times 2 \times 0.45$  mm. Толщина слоя адгезива, посредством которого кристаллы монтировались к подложке, принималась равной  $30 \text{ }\mu\text{m}$ . В качестве дефекта рассматривалось наличие некоторого воздушного объема в слое адгезива с теплопроводностью  $\lambda_5 = 0.022 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , теплопроводность адгезива  $\lambda_5 = 75 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ . Рассеиваемая кристаллом мощность составляла  $10 \text{ W}$ .

Результаты расчета температурного поля в структуре многокристалльной системы представлены на рис. 6. На рис. 7 показаны распределения температуры перегрева верхних поверхностей кристаллов в области  $p$ - $n$  перехода, причем значения координат  $u_i$  взято в тех точках, где перегревы кристаллов максимальны и составляют:  $\Delta T_1=20.9 \text{ K}$ ,  $\Delta T_2=23.8 \text{ K}$ ,  $\Delta T_3=26.1 \text{ K}$ . Было проведено сравнение расчетных значений температур перегрева с результатами, полученными с использованием диагональных элементов матрицы тепловых сопротивлений  $R_{Tmn}$ . При рассеивании в каждом кристалле тепловой мощности  $10 \text{ W}$  перегрев кристаллов модуля составил:  $\Delta T_1=21.4 \text{ K}$ ,  $\Delta T_2=24.0 \text{ K}$ ,  $\Delta T_3=26.3 \text{ K}$ . Хорошее согласие между собой значений температур перегрева, полученных в результате моделирования и расчета на основе измеренных элементов матрицы  $R_{Tmn}$ , подтверждает адекватность разработанной тепловой модели многокристалльной системы.

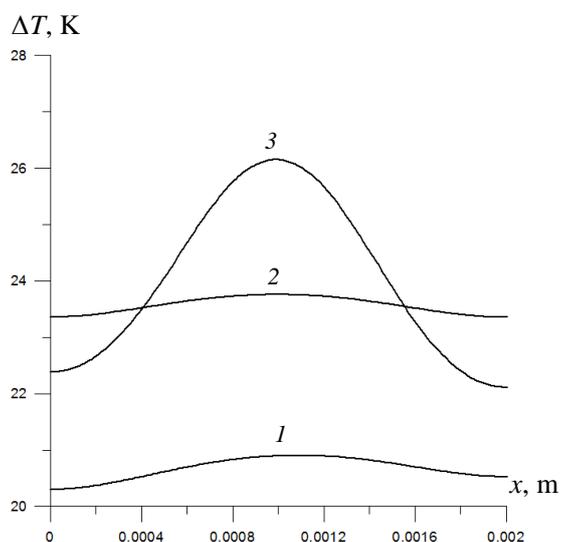


Рис. 7. Температура перегрева верхней поверхности кристалла:  $z = 1.98 \text{ mm}$ : 1, 2 – бездефектный, 3 – дефектный.

## Заключение

Проведенные исследования показали, что для полного описания тепловых процессов в силовом модуле, состоящем из нескольких транзисторов на теплопроводящей подложке, необходимо знать их взаимные тепловые связи, характеризуемые матрицей тепловых импедансов. Измерение элементов данной матрицы возможно при использовании модуляционного метода, основанного на нагреве отдельных транзисторов переменной мощностью и измерении температурного отклика всех остальных транзисторов. Эксперименты показали, что характер зависимости теплового импеданса от частоты модуляции греющей мощности для диагональных и недиагональных элементов матрицы различен. Для диагональных элементов матрицы тепловое сопротивление включает в себя две компоненты – «переход-подложка» и «переход-радиатор», в то время как для недиагональных элементов – только тепловое сопротивление между кристаллами соседних транзисторов.

Матрица тепловых сопротивлений, характеризующая взаимные тепловые связи между кристаллами системы, является несимметричной, что выражается в неравенстве  $R_{Tmn} \neq R_{Tnm}$ . Причиной такого неравенства является технологический разброс толщины адгезива, посредством которого кристаллы монтируются на теплопроводящую подложку. Эксперименты показали, что у кристаллов, у которых адгезив наносился только на часть нижней поверхности, тепловое сопротивление выше, чем у остальных кристаллов. Тем не менее, отличие это находится в пределах технологического разброса, что не позволяет надежно идентифицировать дефект данного типа.

Моделирование теплоэлектрических процессов в силовом модуле, проведенное на основе решения уравнения теплопроводности в программной среде COMSOL Multiphysics, позволило рассчитать температурное поле в исследуемой многокристальной системе. Оценки температуры перегрева кристаллов, полученные в результате анализа тепловой модели, хорошо согласуются с аналогичными результатами, полученными экспериментально. Это указывает на то, что тепловая модель адекватно описывает теплофизические

процессы, происходящие в многокристальной системе. Это позволяет использовать тепловую модель для систем с произвольным количеством кристаллов.

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

### Литература

1. ОСТ 11 0944-96. Микросхемы интегральные и приборы полупроводниковые. Методы расчета, измерения и контроля теплового сопротивления. Москва, ГУП НПП Пульсар. 1997. 110 с.
2. Пономарев С.В., Мищенко С.В., Дивин А.Г. Теоретические и практические аспекты теплофизических измерений (Изд-во Тамбовского гос. техн. ун-та, 2006).
3. Davidson J.N., Stone D.A., Foster M.P. Real-Time Prediction of Power Electronic Device Temperatures Using PRBS-Generated Frequency-Domain Thermal Cross Coupling Characteristics. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, V.30, No.6, P.2950-2961. <http://dx.doi.org/10.1109/TPEL.2014.2331285>
4. Смирнов В.И., Сергеев В.А., Гавриков А.А., Шорин А.М. Измерение перекрестных тепловых сопротивлений силовых модулей. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 7. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jul19/6/text.pdf>, <http://dx.doi.org/10.30898/1684-1719.2019.7.6>
5. Luo Z., Ahn H., Nokali M. A thermal model for insulated gate bipolar transistor module. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2004, V.19, No.4, P.902-907. <http://dx.doi.org/10.1109/TPEL.2004.830089>

6. Brückner T., Bernet S. Estimation and Measurement of Junction Temperatures in a Three-Level Voltage Source Converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2007, V.22, No.1, P.3-12. <http://dx.doi.org/10.1109/TPEL.2006.886651>
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, V.24, No.3, P.401-406. <http://dx.doi.org/10.1109/6040.938309>
8. Drogenik U., Kolar J.W. Teaching thermal design of power electronic systems with web-based interactive educational software. *18th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (Miami Beach, FL, USA)*, 2003, V.2, P.1029-1036. <http://dx.doi.org/10.1109/APEC.2003.1179343>
9. Smirnov V.I., Sergeev V.A., Gavrikov A.A., Shorin A.M. Modulation method for measuring thermal impedance components of semiconductor devices. *Microelectronics Reliability*. 2018. V.80, P.205-212. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2017.11.024>
10. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники (Бином, М., 2014).

**Для цитирования:**

Смирнов В.И., Ходаков А.М., Гавриков А.А. Теплоэлектрические процессы в многокристальных системах. // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №. 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.11.5>