

DOI: 10.17725/rensit.2024.16.215

## Моделирование и анализ распределений температуры и термомеханических напряжений в многокристальном электронном модуле

<sup>1</sup>Ходаков А.М., <sup>1,2</sup>Смирнов В.И., <sup>1</sup>Сергеев В.А., <sup>3</sup>Тарасов Р.Г., <sup>1</sup>Гавриков А.А.<sup>1</sup>УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, <http://www.ulireran.ru/>

Ульяновск 432071, Российская Федерация

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

Ульяновск 432027, Российская Федерация

<sup>3</sup>Научно-производственное предприятие "Завод Искра", <https://www.zavod-iskra.ru/>

Ульяновск 432030, Российская Федерация

E-mail: [ln23al@yandex.ru](mailto:ln23al@yandex.ru), [smirnov-vi@mail.ru](mailto:smirnov-vi@mail.ru), [sva@ulstu.ru](mailto:sva@ulstu.ru), [rgtarasov@mail.ru](mailto:rgtarasov@mail.ru), [a.gavrikoff@gmail.com](mailto:a.gavrikoff@gmail.com)

Поступила 21.02.2024, рецензирована 25.02.2024, принята 29.02.2024, опубликована 25.04.2024

**Аннотация:** Рассмотрена математическая термомеханическая модель многокристального электронного модуля (МЭМ), содержащего три кремниевых кристалла мощных транзисторов, закрепленных токопроводящим адгезивом на медной пластине, размещенной на радиаторе, в виде системы уравнений теплопроводности и термоупругости с заданными граничными условиями. В результате расчетных исследований модели в программной среде COMSOL Multiphysics получены распределения температуры и термомеханических напряжений в элементах конструкции МЭМ в зависимости от греющей мощности, толщины адгезива и размера модельного дефекта контактного соединения одного из кристаллов МЭМ с медной пластиной в виде пустот в слое адгезива. Показано, что пустоты в слое адгезива приводят к резко неоднородному распределению температуры по площади кристалла и термомеханическим напряжениям сдвига в контактном слое, превышающим предельно допустимые значения для адгезива. Установлено, что термомеханические напряжения уменьшаются с увеличением толщины слоя адгезива и возрастают с увеличением размера дефекта (пустот) в этом слое. Результаты моделирования хорошо согласуются с результатами измерения теплового импеданса кристаллов мощных транзисторов модуляционным методом, что говорит о корректности и адекватности разработанной модели.

**Ключевые слова:** многокристальный электронный модуль, термомеханическая модель, контактное соединение, дефект, распределение температуры, термомеханические напряжения, тепловое сопротивление, модуляционный метод

УДК 621.382.32

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

**Для цитирования:** Ходаков А.М., Смирнов В.И., Сергеев В.А., Тарасов Р.Г., Гавриков А.А. Моделирование и анализ распределений температуры и термомеханических напряжений в многокристальном электронном модуле. РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2024, 16(2):215-222. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.215.

## Modeling and analysis of temperature and thermomechanical stress distributions in a multi-chip electronic module

Alexander M. Khodakov, Viacheslav A. Sergeev, Andrey A. Gavrikov

Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Ulyanovsk Branch, <http://www.ulireran.ru/>  
Ulyanovsk 432071, Russian FederationE-mail: [ln23al@yandex.ru](mailto:ln23al@yandex.ru), [sva@ulstu.ru](mailto:sva@ulstu.ru), [a.gavrikoff@gmail.com](mailto:a.gavrikoff@gmail.com)

Vitaliy I. Smirnov

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

Ulyanovsk 432027, Russian Federation

E-mail: [smirnov-vi@mail.ru](mailto:smirnov-vi@mail.ru)

## Ruslan G. Tarasov

NPP "Zavod Iskra", <https://www.zavod-iskra.ru/>

Ulyanovsk 432030, Russian Federation

E-mail: [rgtarasov@mail.ru](mailto:rgtarasov@mail.ru)

Received February 21, 2024, peer-reviewed February 25, 2024, accepted February 29, 2024, published April 25, 2024

**Abstract:** A mathematical thermomechanical model of a multi-chip electronic module (MEM) containing three silicon dies of high-power transistors fixed with a conductive adhesive on a copper plate placed on a radiator is considered in the form of a system of equations of thermal conductivity and thermoelasticity with specified boundary conditions. As a result of computational studies of the model in the COMSOL Multiphysics software environment, distributions of temperature and thermomechanical stresses in the MEM structural elements were obtained depending on the heating power, the thickness of the adhesive and the size of the model defect in the contact connection of one of the MEM crystals with a copper plate in the form of voids in the adhesive layer. It is shown that voids in the adhesive layer lead to a sharply non-uniform temperature distribution over the crystal area and thermomechanical shear stresses in the contact layer that exceed the maximum permissible values for the adhesive. It has been established that thermomechanical stresses decrease with increasing thickness of the adhesive layer and increase with increasing size of the defect (voids) in this layer. The simulation results are in good agreement with the results of measuring the thermal impedance of power transistor crystals using the modulation method, which indicates the correctness and adequacy of the developed model.

**Keywords:** multi-chip electronic module, thermomechanical model, contact connection, defect, temperature distribution, thermomechanical stress, thermal resistance, modulation method

UDC 621.382.32

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

**For citation:** Alexander M. Khodakov, Vitaliy I. Smirnov, Viacheslav A. Sergeev, Ruslan G. Tarasov, Andrey A. Gavrikov. Modeling and analysis of temperature and thermomechanical stress distributions in a multi-chip electronic module. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2024, 16(2):215-222e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.215.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (216)
  2. ОПИСАНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ (217)
  3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ  
ОБСУЖДЕНИЕ (218)
  4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА РЕЗУЛЬТАТОВ  
МОДЕЛИРОВАНИЯ (219)
  5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (221)
- ЛИТЕРАТУРА (222)

### 1. ВВЕДЕНИЕ

При рассеивании мощности в активных элементах многокристальных электронных модулей (МЭМ), представляющих собой несколько полупроводниковых кристаллов, смонтированных на общей теплопроводящей подложке (например, силовые модули мощных биполярных, MOSFET- или IGBT-транзисторах на медной пластине) кристаллы и элементы конструкции МЭМ нагреваются, при этом из-за

разницы коэффициентов теплового расширения материалов конструкции МЭМ в них возникают термомеханические напряжения и деформации. Критические значения температурного перегрева и термомеханических напряжений являются основными причинами отказов элементов МЭМ. Эти факторы приводят к ускорению деградации контактных соединений кристаллов с подложкой и, как следствие, к увеличению теплового сопротивления и ухудшению теплоотвода, что в свою очередь, ведет к дальнейшему увеличению температуры, механических напряжений и деформации элементов конструкции МЭМ, что в конечном итоге приводит к ухудшению эксплуатационных характеристик и отказам МЭМ [1–3].

Одним из наиболее важных факторов надежности МЭМ является качество клеевого соединения кристалла с подложкой. Наличие пустот в слое адгезива между кристаллом и

подложкой в МЭМ является одной из основных причин ускоренной деградации контактных соединений в результате термомеханических деформаций и сокращения срока службы приборов [4]. Исследование этих процессов требует учета многих факторов и стимулирует разработку новых теплоэлектрических и термомеханических моделей МЭМ. За последнее время задачи, связанные с нагревом силовых и СВЧ МЭМ при эксплуатации решаются с использованием методов компьютерного моделирования в различных программных средах – ABAQUS, ANSYS Workbench, COMSOL Multiphysics [5–7], однако влияние дефектов в области контакта кристалла с подложкой в этих моделях не рассматривается. Целью данной работы является создание термомеханической модели и проведение с ее помощью исследований, возникающих в элементах конструкции МЭМ термомеханических напряжений в зависимости от параметров дефекта.

В качестве объекта исследования был выбран многокристальный силовой электронный модуль, состоящий из трех кристаллов кремниевых мощных биполярных транзисторов (Рис. 1). Кристаллы с помощью токопроводящего адгезива закреплены на медной подложке, которая через слой термопасты размещалась на радиаторе. Для оценки влияния качества контактного слоя на распределения температуры и термомеханических напряжений в конструкции МЭМ в контактный слой одного из кристаллов искусственно вводился дефект в виде пустот или неполного заполнения адгезивом контактного соединения кристалла с подложкой.

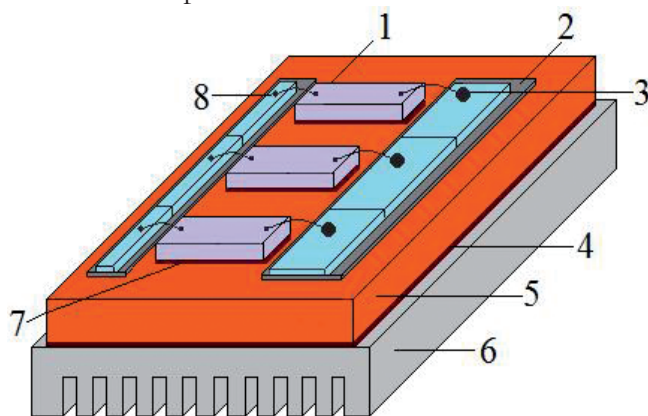


Рис. 1. Конструкция МЭМ: 1 – кристалл; 2 – диэлектрик; 3 – вывод эмиттера; 4 – термопаста; 5 – медная подложка; 6 – радиатор; 7 – адгезив; 8 – вывод базы.

## 2. ОПИСАНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Расчетные температурные и термомеханические исследования МЭМ проводились для упрощенной модельной конструкции, геометрия которой представлена на Рис. 2. В области клеевого соединения третьего кристалла с подложкой моделировался дефект, который характеризовался коэффициентом относительного размера дефекта  $K_D = S_D - S_0$ , где  $S_D$ ,  $S_0$  – площади дефектной области и нижней поверхности кристалла соответственно.

Температурное поле  $T_i(x, y, z)$  в структуре многокристальной системы и деформационные перемещения её слоев  $\vec{u}_i(x, y, z, t)$  определяются из совместного решения уравнений термоупругости и теплопроводности [8]:

$$\mu_i \nabla^2 \vec{u}_i + (\lambda_i + \mu_i) \nabla (\nabla \vec{u}_i) - (3\lambda_i + 2\mu_i) \alpha_i \nabla (T_i - T_0) = 0, \quad i = 1, \dots, 8, \quad (1)$$

$$\nabla (k_i(T_i) \nabla T_i) = 0, \quad (2)$$

где  $T_0$  – температура окружающей среды;  $\lambda_i = \frac{\nu_i E_i}{(1 + \nu_i)(1 - 2\nu_i)}$ ,  $\mu_i = \frac{E_i}{2(1 + \nu_i)}$  – коэффициенты Ламе;  $E_i(T_i)$ ,  $\nu_i(T_i)$ ,  $\alpha_i(T_i)$  – модуль упругости, коэффициент Пуассона и коэффициент теплового расширения материалов структуры;  $k_i(T_i)$  – коэффициенты теплопроводности материалов структуры.

Все внешние поверхности элементов МЭМ считаются свободными. Температура нижней поверхности основания подложки принимается равной температуре радиатора  $T_r$ . На верхних поверхностях каждого из трех полупроводниковых кристаллов МЭМ задается плотность мощности

$$q = -\lambda_i(T_i) \left. \frac{\partial T_i}{\partial z} \right|_{z=h} = \frac{W}{S_{ar}}, \quad (3)$$

где  $W$  – рассеиваемая кристаллом тепловая мощность,  $S_{ar}$  – площадь активной области

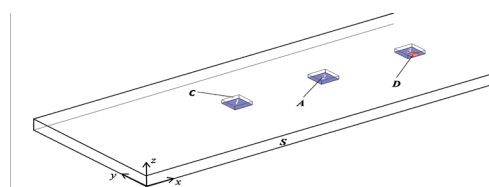


Рис. 2. Геометрия расчетной модели МЭМ: С – кремниевый кристалл; А – слой адгезива; D – дефект; S – медная подложка.

кристалла;  $h = \sum_{k=1}^3 h_k$  – высота МЭМ,  $h_k$  толщина  $k$ -го слоя конструкции МЭМ. Все внешние поверхности  $S_i$  конструкции МЭМ находятся в условиях естественного теплообмена:

$$\lambda_i T_{i,z}|_{S_i} + \alpha_n (T_0 - T_i|_{S_i}) = 0, \quad (4)$$

где  $\alpha_n$  – коэффициент теплообмена естественной конвекцией, значение которого лежит в пределах  $5 \div 25$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) и является параметром модели. В процессе расчета оно уточняется итерационным методом согласно экспериментальных данных температуры нагрева выбранного элемента структуры модели МЭМ. В дальнейшем, в представленном расчетном варианте, такой температурой являлась температура  $p$ - $n$  перехода 3-го кристалла.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Решение модельной задачи (1) – (4) находилось численным методом. Разработанная программа включала в себя обращение к программной среде COMSOL Multiphysics.

В экспериментальном модельном макете МЭМ, рассмотренном в данной статье, размеры медной пластины составляли –  $85 \times 17 \times 1.5$  мм; а в качестве кремниевых кристаллов использовались кристаллы транзистора КТ504 с размерами  $2 \times 2 \times 0.45$  мм. В качестве адгезива использовался клей марки ХН9960-1 фирмы NAMICS [9] с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_A = 75$  Вт/м·К; толщина слоя адгезива при расчетах изменялась в пределах  $\delta = 5 \div 50$  мкм; в качестве дефекта в слое адгезива рассматривались воздушные пустоты с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_D = 0.022$  Вт/м·К, а коэффициент относительного размера дефекта изменялся в пределах  $K_S = 0.05 \div 0.2$ . Рассеиваемая кристаллами мощность составляла  $W = 10$  Вт, что является максимально допустимой мощностью для данного типа транзистора.

Расчетные исследования показали, что максимальное значение температуры в структуре достигается на верхней поверхности 3-го кристалла ( $z = 1.98$  мм) в области, расположенной над центром дефекта ( $z = 1.53$  мм) (Рис. 3).

Анализ профилей показывает, что вблизи границ дефекта (пустот) в слое адгезива градиент температуры резко возрастает, что в свою

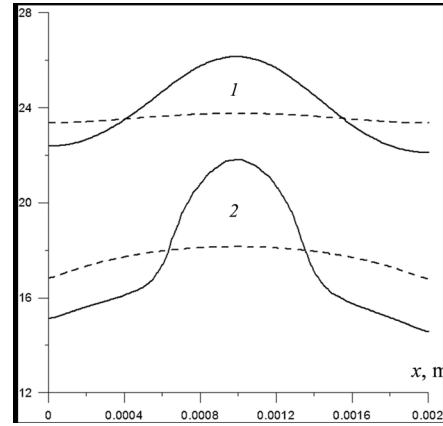


Рис. 3. Распределение температуры на верхней (1) и нижней (2) поверхностях кристаллов (вдоль оси симметрии кристалла) при толщине слоя адгезива  $\delta = 30$  мкм и относительном размере дефекта  $K_S = 0.2$ : (сплошная линия – кристалл № 3, пунктир – кристалл № 2).

очередь приводит к резкому возрастанию термомеханических напряжений сдвига (Рис. 4).

Значения механического напряжения на графике указаны в относительных единицах, приведенных к предельному значению сдвигового напряжения для данного типа адгезива, равному  $\sigma_{SC} = 13$  МПа [9]. Как видно из представленной зависимости для транзистора с дефектом в контактом соединении, работающего на максимально допустимой мощности, напряжения сдвига вблизи границ дефекта достигают предельного значения  $\sigma_S/\sigma_{SC} \approx 1$ , то есть возможен сдвиг кристалла с последующим его отрывом от подложки.

На Рис. 5 представлены результаты расчетных исследований зависимости напряжения сдвига от относительного размера дефекта  $K_S$  и от толщины слоя адгезива  $\delta$ .

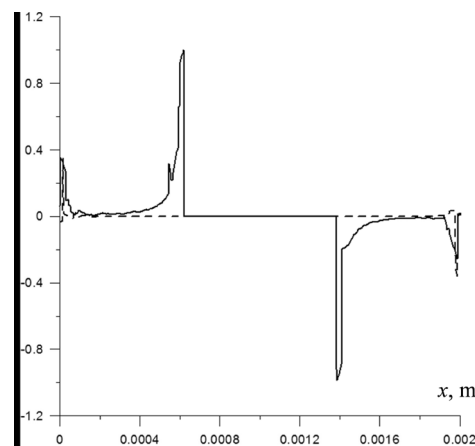


Рис. 4. Распределение термомеханического напряжения сдвига в слое адгезива с дефектом на границе с кристаллом № 3:  $z = 1.53$  мм,  $K_S = 0.2$ ,  $\delta = 30$  мкм.



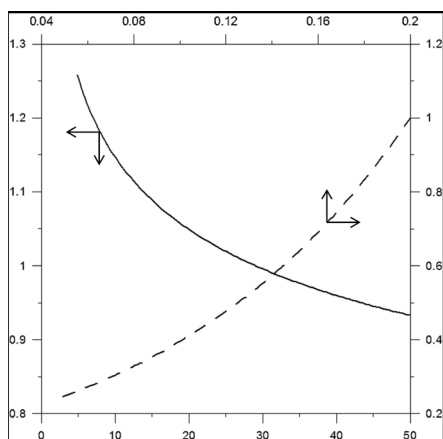


Рис. 5. Зависимости термомеханического напряжения сдвига от параметров модели,  $\sigma_{sc} = 13$  МПа.

Анализ полученных результатов показывает, что термомеханическое напряжение сдвига уменьшается с ростом толщины адгезива. При значениях  $\delta \ll 10$  мкм наблюдается быстрый рост сдвигового напряжения. Так для представленного расчетного варианта структуры уменьшение толщины клеевого слоя в три раза приводит к возрастанию значения сдвигового напряжения до значения  $1.2\sigma_{sc}$ . С увеличением размера дефекта  $K_s$  максимальное значение термомеханического напряжения сдвига растет, что как уже отмечалось, ведет к ускорению деградации контактного соединения. Полученные результаты с использованием известных моделей разрушения (деградации) контактных соединений [10] позволяют количественно оценить влияние размера дефекта (пустот) в слое адгезива на его надежность.

#### 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для оценки приращения температуры кристаллов  $\Delta T_j$  (температуры перехода транзисторов) при рассеянии в них заданной мощности производились измерения теплового сопротивления между  $p$ - $n$ -переходом транзистора и подложкой, на которой монтировались кристаллы. Согласно стандартам, тепловое сопротивление транзистора  $R_{Tjc}$  относительно его корпуса определяется приращением температуры  $p$ - $n$ -перехода транзистора при рассеивании в нем единичной тепловой мощности [11]:

$$R_{Tjc} = \frac{T_j - T_c}{P} = \frac{\Delta T_j}{P}, \quad (5)$$

где  $T_j$  — температура перехода транзистора;  $T_c$  — фиксированная температура корпуса или

подложки, на которой смонтирован кристалл;  $P$  — мощность, рассеиваемая в транзисторе.

Измерения теплового сопротивления осуществлялись модуляционным методом [12], в котором через каждый транзистор пропускалась последовательность импульсов греющего тока с постоянным периодом следования и изменяющейся по гармоническому закону длительностью. Такая широтно-импульсная модуляция греющей мощности вызывала периодическое изменение температуры перехода транзисторов  $T_j(t)$ , сдвинутой по фазе относительно мощности  $P(t)$  на некоторый угол  $\varphi$ . Измерив амплитуду переменной составляющей температуры перехода  $T_{j1}$  по изменению температурочувствительного параметра (ГЧП), линейно зависящего от  $T_j$ , и зная амплитуду переменной составляющей рассеиваемой мощности  $P_1$ , можно определить модуль  $Z_T$  и фазу  $\varphi$  теплового импеданса на частоте модуляции  $\nu$ :

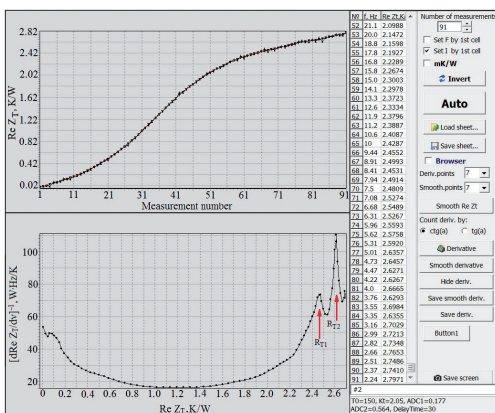
$$Z_T = \frac{T_{j1}}{P_1}, \quad \varphi = \arctg \frac{\text{Im} T_j}{\text{Re} T_j}, \quad (6)$$

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

Модуляционный метод позволяет измерять компоненты теплового сопротивления, определяемые особенностями конструкции объекта, по которому распространяется тепловой поток от активной области кристалла в подложку и далее в радиатор и окружающую среду [13]. Для этого производится измерение зависимости модуля  $Z_T(\nu)$ , фазы  $\varphi(\nu)$  и вещественной части  $\text{Re} Z_T(\nu)$  теплового импеданса от частоты модуляции  $\nu$  греющей мощности. В этих зависимостях имеются особенности в виде пологих участков и точек перегиба, которые связаны с компонентами теплового сопротивления. Для выявления этих особенностей производится сглаживание  $\text{Re} Z_T(\nu)$  и последующее дифференцирование по частоте модуляции. Сглаживание осуществляется с помощью сплайн-интерполяции зависимости  $\text{Re} Z_T(\nu)$ , а вычисление производной производится на основе расчета коэффициентов линейной регрессии в каждой точке графика  $\text{Re} Z_T(\nu)$ . Количество точек для сглаживания и вычисления производной задает оператор.

Измерения компонент теплового сопротивления производились с помощью аппаратно-программного комплекса, в котором реализован модуляционный метод [14]. Транзистор подключался по схеме с общей базой. В качестве ТЧП использовалось прямое напряжение на эмиттере транзистора при измерительном токе 10 мА. Амплитуда импульсов греющего тока устанавливалась равной 1000 мА, период следования импульсов – 480 мкс, частота модуляции греющей мощности варьировалась в диапазоне от 2 до 400 Гц. Результаты измерения частотной зависимости вещественной части  $Re Z_T(\nu)$  теплового импеданса для транзистора № 2 представлены на **Рис. 6**.

В верхнем графическом окне показана сглаженная зависимость  $Re Z_T(\nu)$  с установленным оператором количеством точек для сглаживания равным 7. В нижнем окне показана зависимость  $[d(Re Z_T)/d\nu]^{-1}$  как функция переменной  $Re Z_T$ . Положение локальных максимумов относительно оси абсцисс позволяет определить компоненты теплового сопротивления  $R_T$ . Первый максимум соответствует компоненте теплового сопротивления  $R_{T1}$  «переход-подложка», второй максимум – компоненте  $R_{T2}$  «переход-радиатор». Значения  $R_{T1}$  и  $R_{T2}$  для транзистора № 2 равны соответственно 2.45 и 2.62°K/Вт. Результаты измерения  $R_{T1}$  и  $R_{T2}$  у транзистора № 1 отличаются от значений для транзистора № 1 не более чем на 3% и далее не рассматривались. Аналогичные измерения компонент теплового сопротивления, проведенные для кристалла № 3 с дефектом монтажа к подложке, дали значения  $R_{T1} = 2.63^\circ\text{K}/\text{Вт}$  и  $R_{T2} = 2.84^\circ\text{K}/\text{Вт}$ .



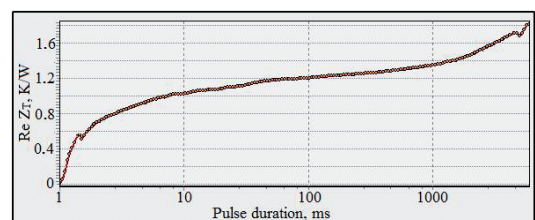
**Рис. 6.** Частотная зависимость вещественной части теплового импеданса (вверху) и результат ее обработки (внизу).

Вт. При рассеивании в обоих транзисторах мощности 10 Вт приращение температуры перехода  $\Delta T_j$  относительно подложки составит для 2-го кристалла 24.5°С, а для 3-го кристалла – 26.3°С. Полученные экспериментально значения перегрева обоих кристаллов хорошо согласуются с результатами моделирования (23.8°С и 26.1°С соответственно).

Другой способ проверки результатов моделирования основан на измерении теплового излучения от нагретого кристалла с биполярным транзистором. Нагрев кристалла осуществлялся пропусканием через транзистор импульсов тока с увеличивающейся по логарифмическому закону длительностью. Скважность импульсов, устанавливаемая оператором, равна 1. Это означает, что нагрев кристалла осуществлялся постоянным током с кратковременными переключениями из режима нагрева в режим измерения ТЧП – прямого падения напряжения на эмиттерном переходе. Продолжительность процесса нагрева, по окончании которого измерялось тепловое излучение кристалла, оценивалась на основе анализа переходной тепловой характеристики (ПТХ), представляющей собой зависимость теплового импеданса от длительности импульсов греющего тока. Тепловой импеданс  $Z_T(t)$  определялся согласно выражению:

$$Z_T(t) = \frac{T_j(t) - T_j(t=0)}{I_{ht} \cdot U_{ht}}, \quad (7)$$

где  $T_j(t)$  – температура перехода в произвольный момент времени  $t$ ;  $T_j(t=0)$  – температура перехода в начальный момент времени;  $I_{ht}$  – амплитуда импульсов греющего тока;  $U_{ht}$  – напряжение на транзисторе. Результат измерения ПТХ транзистора №2 представлен на **Рис. 7**. Из графика  $Z_T(t)$  видно, что при длительности импульсов греющего тока в диапазоне от 40 до 800 мс, значение теплового импеданса увеличивается относительно слабо. Это указывает на то, что



**Рис. 7.** Переходная тепловая характеристика.

в этом диапазоне длительностей импульсов происходит нагрев кристалла, а температура подложки изменяется незначительно. Поэтому измерение теплового поля от нагретых кристаллов производилось после того, как длительность греющих импульсов достигала 800 мс. Амплитуда импульсов устанавливалась равной 8.0 А, что обеспечивало выделение в транзисторе мощности 9.1 Вт.

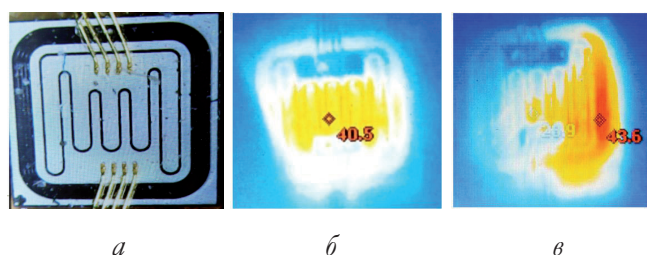
Измерение температурных полей производилось тепловизором Testo 876 с ИК-матрицей тепловизора 160×120 пикселей, температурной чувствительностью менее 80 мК, спектральным диапазоном от 8 до 14 мкм. Поскольку для исследуемых кристаллов фокусное расстояние объектива у Testo 876 слишком большое, то была установлена дополнительная германиевая линза с фокусным расстоянием 9 мм [15]. Термограммы кристаллов № 2 и № 3 биполярных транзисторов представлены на **Рис. 8**. Для удобства восприятия температурного поля на **Рис. 8а** приведено увеличенное изображение кристалла № 3. В контактное соединение этого кристалла с подложкой искусственно введен дефект в виде не полностью заполненной адгезивом области контакта кристалла с подложкой.

С помощью тепловизора Testo 876 на полученных термограммах можно определить температуру максимально нагретой области кристалла. У кристалла № 2, слой адгезива которого не содержит дефектов, температурное поле активной области кристалла однородное. Температура кристалла по всей поверхности примерно одинакова и равна  $T_2 = 40.5^\circ\text{C}$ . Для кристалла № 3 с дефектом в слое адгезива распределение температуры по площади кристалла существенно неоднородно. В

области дефекта максимальная температура кристалла равна  $T_3 = 43.6^\circ\text{C}$ , что заметно выше, чем средняя температура по кристаллу. При этом следует учесть, что точное определение температуры поверхности кристалла требует знания излучательной способности кремния, которая, в свою очередь, зависит от температуры, состояния поверхности и наличия оксидной пленки на поверхности кристалла [16]. Поэтому при сравнении тепловых полей двух кристаллов можно корректно оценивать только их разность температур  $\Delta T_{32} = T_3 - T_2$ . При рассеиваемой в кристаллах тепловой мощности 9.1 Вт разность  $\Delta T_{32} = 3.1^\circ\text{C}$ , а при пересчете на 10 Вт рассеиваемой мощности –  $\Delta T_{32} = 3.4^\circ\text{C}$ . Полученное значение примерно в 1.5 раза превышает результат моделирования ( $\Delta T_{32} = 2.3^\circ\text{C}$ ). Учитывая, что для кристалла № 3 тепловое поле является существенно неоднородным, и средняя температура примерно на  $1^\circ\text{C}$  ниже максимальной, можно сделать вывод, что результаты измерения разности средних температур  $\Delta T_{32}$  для двух кристаллов достаточно хорошо согласуются между собой.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований была разработана термомеханическая модель многокристалльной системы, в которой присутствует дефект в области соединения посредством адгезива одного из кристаллов МКС с подложкой. Проведены расчеты температуры и соответствующих термонапряжений в различных слоях структуры объекта моделирования. Сделаны оценки термомеханических напряжений, возникающих в слое адгезива вследствие неоднородного распределения температуры, и исследовано влияние толщины адгезива и размера дефекта на величину напряжения сдвига. Показано, что при малых значениях толщины адгезива наблюдается резкий рост величины сдвигового напряжения. Для представленного расчетного варианта структуры уменьшение толщины слоя адгезива в три раза приводит к возрастанию значения сдвигового напряжения до значения, превышающего на 20% предельное значение сдвигового напряжения для данного типа адгезива. При увеличении относительного размера дефекта  $K_s$  напряжение сдвига



**Рис. 8.** Кристалл биполярного транзистора: а) внешний вид; б) тепловое поле кристалла № 2; в) тепловое поле кристалла № 3 (с дефектом адгезива).



монотонно возрастает и достигает предельного значения при условии, что размер дефекта составляет 0.2 от общей площади контакта кристалла с подложкой. Сравнение результатов моделирования и эксперимента показало, что они хорошо согласуются между собой, что подтверждает адекватность разработанной термомеханической модели.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Barbagallo C, Malgioglio GL, Petrone G, Cammarata G. Thermo-Mechanical Analysis of a Multi-Chip Power Module. *ASME-ATI-UIT 2015 Conference on Thermal Energy Systems: Production, Storage, Utilization and the Environment*, 2015:1-6.
2. Yayong Y, Yuxin G, Zhiqiang JW, Yong K. An Automated Electro-Thermal-Mechanical Co-Simulation Methodology Based on PSpice-MATLAB-COMSOL for SiC Power Module Design. *IEEE Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications in Asia (WiPDA Asia)*, 2021, 3:499-503.
3. Погалов АИ, Титов АЮ, Тимошенко СП. Термомеханическая прочность соединений элементов в микроэлектронных модулях. *Известия вузов. Электроника*, 2019, 24(6):565-572.
4. Yifei L, Fei X, Bo W, Binli L. Failure Analysis of Power Electronic Devices and Their Applications under Extreme Conditions. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 2016, 2(1):91-100.
5. Cheolgyu K, Chulmin O, Yunhwa C, Kyung-Oun J. Improvement in Thermomechanical Reliability of Power Conversion Modules Using SiC Power Semiconductors: A Comparison of SiC and Si via FEM Simulation. *J. Microelectronics Packaging Society*, 2018, 25(3):21-30.
6. Jibing C, Bowen L, Maohui H, Shisen H. Study of the Solder Characteristics of IGBT Modules Based on Thermal-Mechanical Coupling Simulation. *Materials*, 2023, 16(9):3504.
7. Матюхин СИ, Фроленков КЮ, Малый АО, Вишняков АС, Орлов ЕЮ, Санников МД. Компьютерное моделирование термомеханических деформаций, возникающих при производстве и эксплуатации силовых полупроводниковых модулей паяной конструкции. *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*, 2019, 4-1(336):35-41.
8. Боли Б, Уэйнер Д. *Теория температурных напряжений*. М., Мир, 1964, 512 с.
9. Namics Corporation XH9960-1. URL: <https://www.datasheets.com/en/part-details/xh9960-1-namics-corporation-416981819> (дата обращения: 31.08.2023).
10. Азин АВ, Марицкий НН, Пономарев СВ, Рикконен СВ. Прогнозирование долговечности паяных контактных соединений микросхем. *Вестник Томского гос. университета. Математика и механика*, 2022, 76:43-55; doi: 10.17223/19988621/76/4.
11. ГОСТ 19656.15-84. Диоды полупроводниковые СВЧ. Методы измерения теплового сопротивления переход-корпус и импульсного теплового сопротивления. М., Изд-во стандартов, 1984, 21 с.
12. Smirnov VI, Sergeev VA, Gavrikov AA, Shorin AM. Modulation method for measuring thermal impedance components of semiconductor devices. *Microelectronics Reliability*, 2018, 80:205-212.
13. Смирнов ВИ, Гавриков АА, Шорин АМ. Метод измерения компонент теплового сопротивления полупроводниковых приборов и его практическая реализация. *Автоматизация процессов управления*, 2017, 2(48):98-105.
14. Smirnov VI, Sergeev VA, Gavrikov AA, Shorin AM. Thermal impedance meter for power MOSFET and IGBT transistors. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33:6211-6216.
15. Сергеев ВА, Низаметдинов АМ, Фролов ИВ, Кузьмин НП. Оценка неоднородности токораспределения в структурах биполярных и гетеробиполярных ВЧ и СВЧ транзисторов по температурному профилю. *Автоматизация процессов управления*, 2023, 3(73):85-93.
16. Госсорг Ж. *Инфракрасная термография. Основы, техника, применения*. М., Мир, 1988, 416 с.

**Ходаков Александр Михайлович**

к.ф.-м.н., с.н.с.

УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

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

E-mail: ln23al@yandex.ru

**Смирнов Виталий Иванович**

д.т.н., проф.

УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

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

E-mail: smirnov-vi@mail.ru

**Сергеев Вячеслав Андреевич**

д.т.н., проф.

УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

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

E-mail: sva@ulstu.ru

**Тарасов Руслан Геннадьевич**

соискатель

НПП "Завод Искра"

75, пр. Нариманова, Ульяновск 432030, Россия

E-mail: rgtarasov@mail.ru

**Гавриков Андрей Анатольевич**

к.т.н., с.н.с.

УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

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

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