

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА НАНЕСЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДЯЩЕГО КОМПАУНДА

© 2020 г. А.А. Солдатов^{1,2,*}, А.А. Дементьев^{3,**}, А.И. Солдатов^{1,2,***}, И.М. Васильев^{1,3}

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия 634050 Томск, пр-т Ленина, 30

²Томский университет систем управления и радиоэлектроники, Россия 634050 Томск, пр-т Ленина, 40

³АО «НПЦ «Полус», Россия 634050 Томск, пр-т Кирова, 56в

E-mail: *soldatov.88@bk.ru; **daa024@mail.ru; ***asoldatof@mail.ru

Поступила в редакцию 01.10.2019; после доработки 17.01.2020

Принята к публикации 03.02.2020

Предложена математическая модель для определения качества нанесения теплопроводящего компаунда и приведены результаты моделирования. Модель основана на теории теплопереноса в твердом теле. Верификация модели выполнена с помощью экспериментальных данных, полученных измерением температуры в точках соприкосновения двух тел с помощью термопар. Показано, что данные, полученные с помощью термопар, совпадают с данными, полученными с помощью термоэда.

Ключевые слова: термоэдс, эффект Зеебека, тепловое сопротивление, термоинтерфейс, теплопередача.

DOI: 10.31857/S0130308220030082

ВВЕДЕНИЕ

Перегрев полупроводниковых приборов может привести к негативным последствиям, например, снижению производительности, надежности работы прибора или же его отказу. На сегодняшний день большинство мощной полупроводниковой техники используется в паре с радиатором, позволяющем отвести от полупроводникового прибора часть выделяемой мощности в виде тепла. Наличие шероховатости поверхностей радиатора и корпуса мощного полупроводникового прибора является следствием появления воздушных полостей между соприкасаемыми поверхностями. Поэтому корпус полупроводникового прибора крепится к радиатору через слой теплопроводящего компаунда, так называемого термоинтерфейса, который обладает теплопроводящими свойствами на порядок выше, чем воздух, и, вытесняя его из воздушных полостей двух соединенных поверхностей, увеличивает теплопроводность от полупроводникового прибора к радиатору.

Вклад термоинтерфейса в суммарное значение теплового сопротивления «кристалл—радиатор» R_{thcs} составляет от 20 до 65 % [1]. При малой толщине слоя воздушные полости не будут на 100 % заполнены термоинтерфейсом, поэтому тепловое сопротивление велико, что видно на рис. 1 (красный участок). По мере заполнения воздушных полостей термоинтерфейсом тепловое сопротивление уменьшается. На границе красного и зеленого участков величина слоя термоинтерфейса такова, что воздушные полости полностью заполнены термоинтерфейсом, поэтому тепловое сопротивление минимально. По мере увеличения толщины слоя термоинтерфейса тепловое сопротивление плавно увеличивается (см. рис. 1).

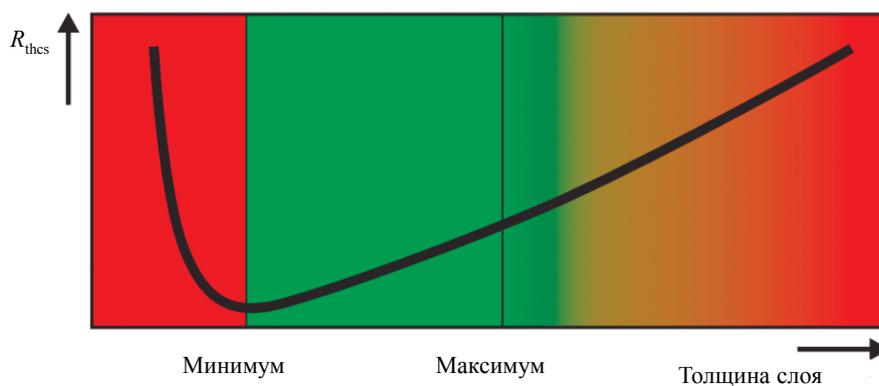


Рис. 1. Зависимость теплового сопротивления корпус—радиатор от толщины слоя термоинтерфейса.

Отсутствие или неправильное нанесение термоинтерфейса приводит к неэффективной работе системы охлаждения, перегреву прибора и в конечном итоге сокращению срока службы изделия или выходу его из строя, часто в технических данных на выпускаемый полупроводниковый прибор, имеющий возможность крепления к радиатору, производитель дает рекомендации по выбору радиатора и нанесению теплопроводящего компаунда. В настоящее время существуют следующие методы обеспечения качества нанесения термоинтерфейса:

определение минимального количества термоинтерфейса путем его взвешивания на прецизионных весах. Погрешность данного метода зависит от погрешности прецизионных весов. Масса термоинтерфейса напрямую связана с толщиной слоя. Чем больше масса, тем больше объем, тем толще слой при неизменной площади покрытия. Современные весы, позволяющие измерять с точностью до 1 мг, имеют погрешность 0,01 %, что практически исключает погрешность измерений [1]. Однако использование этого метода не гарантирует хорошее качество нанесения термоинтерфейса, т. к. качество нанесения зависит не только от количества теплопроводящего компаунда, но и от его распределения между радиатором и корпусом прибора;

нанесение термоинтерфейса через трафарет с отверстиями. Используя данный метод, количество термоинтерфейса определяется через отношение толщины слоя трафарета и суммарной площади отверстий в нем, через которые наносится термоинтерфейс на теплосток [3, 4]. Данный метод имеет низкую погрешность и обеспечивает высокую повторяемость, т. к. параметры трафарета не зависят от внешних факторов, что позволяет автоматизировать процесс нанесения термоинтерфейса подобным образом;

некоторые компании поставляют свои приборы потребителям с уже нанесенным термоинтерфейсом [5, 6], что увеличивает стоимость прибора по сравнению с аналогами. При этом компании не дают информацию о методе нанесения термоинтерфейса. Кроме того, данная мера не исключает возможности нарушения нанесенного слоя термоинтерфейса при транспортировке или монтаже прибора на радиатор без дополнительного визуального осмотра перед установкой;

использование механических толщиномеров [6]. Устройство данного приспособления представлено на рис. 2.

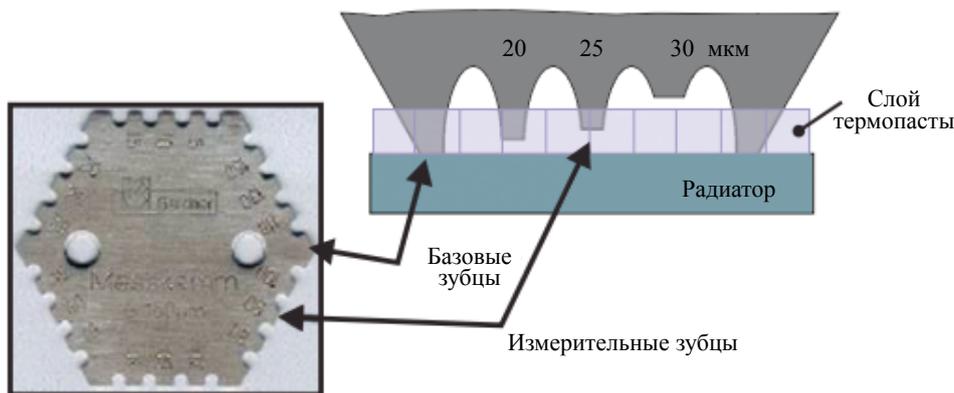


Рис. 2. Механический толщиномер гребенчатого типа.

Принцип действия механического толщиномера заключается в том, что толщиномер устанавливается на проверяемую поверхность с нанесенным термоинтерфейсом базовыми зубцами и перемещается параллельно исследуемой поверхности, опираясь на базовые зубцы. Так как измерительные зубцы находятся на известном расстоянии от базовых зубцов, оставленный ими след на слое термоинтерфейса будет говорить о том, что толщина термоинтерфейса превышает его. Зубец, не оставляющий следа на термоинтерфейсе, характеризует толщину термоинтерфейса, которая может быть и меньше. К недостатку данного способа можно отнести повреждение слоя в зоне контроля, и обязательный визуальный контроль после каждого измерения, что увеличивает время проверки и вносит влияние человеческого фактора на точность измерений [4].

Все вышеперечисленные методы определения качества нанесения термоинтерфейса имеют один общий недостаток, а именно — отсутствие возможности контроля качества после завершения монтажа прибора к радиатору.

Качество нанесения термоинтерфейса характеризуется тепловым сопротивлением R_s между корпусом и радиатором. При нагреве полупроводникового прибора появляется тепловой поток от его корпуса к радиатору через термоинтерфейс. При наличии теплового сопротивления появится разность температур на границе раздела радиатор-термоинтерфейс и термоинтерфейс—корпус силового прибора [7]. Таким образом, чем меньше тепловое сопротивление термоинтерфейса, тем больше радиатор охлаждения отведет тепла от полупроводникового прибора. Информацию о тепловом сопротивлении нанесенного термоинтерфейса между соединенными полупроводниковым прибором и радиатором охлаждения дает разница температур на границах слоя термоинтерфейса при известных значениях площади соприкосновения полупроводникового прибора и радиатора охлаждения, удельной теплопроводности термоинтерфейса и теплового потока. Тепловое сопротивление между корпусом полупроводникового прибора и радиатором охлаждения определяется по формуле [8]:

$$R_s = \frac{\Delta T}{P} = \frac{h}{\lambda \times S}, \quad (1)$$

где ΔT — разность температур; P — тепловой поток; h — толщина термоинтерфейса; λ — коэффициент теплопроводности термоинтерфейса; S — площадь соприкасаемых поверхностей прибора и радиатора.

Корпуса полупроводниковых приборов изготавливают из токопроводящего материала, состав которого отличается от токопроводящего материала радиатора, поэтому в месте соединения полупроводникового прибора и радиатора возникнет термоэдс, величина которого определяется по формуле [9, 10]:

$$E = \Delta T \times \alpha, \quad (2)$$

где ΔT — разность температур корпуса полупроводникового прибора и радиатора в месте соприкосновения; α — коэффициент Зеебека.

Выразив ΔT из формулы (2) и подставив в формулу (1), получим:

$$R_s = \frac{E}{P \times \alpha}. \quad (3)$$

Как видно из формулы (3), величина теплового сопротивления прямо пропорциональна величине термоэдс между корпусом прибора и радиатором охлаждения. При известном потоке мощности через тело P , измерив термоэдс между корпусом прибора и радиатором охлаждения, можно получить значение теплового сопротивления. Метод термоэлектрического контроля в настоящее время активно развивается [11—15]. Однако для контроля теплового сопротивления он до сих пор не применялся.

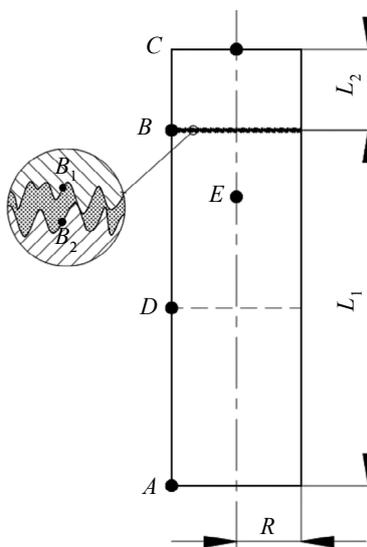


Рис. 3. Схематическое изображение модели.

Для исследования предложенного способа контроля теплового сопротивления с помощью термоэда была разработана математическая модель, которая включала два алюминиевых цилиндра радиусом R и высотой L_1 и L_2 , соединенных между собой, как показано на рис. 3. Первый цилиндр от точки A до точки D помещается в кипящую воду, второй цилиндр и верхняя часть первого (от точки D до точки B) охлаждаются воздухом. В точке контакта цилиндров находится теплопроводящий слой толщиной l_s .

При разработке математической модели были приняты следующие допущения: контакт между цилиндрами идеальный, коэффициенты теплопроводности веществ не зависят от температуры и являются постоянными, температура кипящей воды постоянна и равна 100°C и тепловое сопротивление, возникающее в зоне контакта двух цилиндров, полностью описывается эффективным сопротивлением контактного слоя.

С учетом сделанных предположений, математическая модель в размерной постановке может быть записана в следующем виде [16]:

$$c_1\rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} - \frac{2\alpha_{\text{H}_2\text{O}}(T_1 - T_{\text{H}_2\text{O}})}{R} \Big|_{A \leq x \leq D} - \frac{2\alpha_{\text{возд}}(T_1 - T_{\text{возд}})}{R} \Big|_{D < x \leq C}; \quad (4)$$

$$c_2\rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} - \frac{2\alpha_{\text{возд}}(T_2 - T_{\text{возд}})}{R}; \quad (5)$$

$$c_s\rho_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2}. \quad (6)$$

С начальными условиями [17]:

$$T(x, 0) = T_{\text{возд}}. \quad (7)$$

Формула (7) означает, что температура всех объектов в любой точке на плоскости X равна температуре воздуха.

С граничными условиями [18]:

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1(0, t)}{\partial x} = \alpha_{\text{H}_2\text{O}}(T_1(0, t) - T_{\text{H}_2\text{O}}); \quad (8)$$

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_1(0, t)}{\partial x} = \lambda_{\text{возд}}(T_1(0, t) - T_{\text{возд}}(0, t)); \quad (9)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial T(B_1^-, t)}{\partial x} = -\lambda_s \frac{\partial T(B_1^+, t)}{\partial x}; \quad (10)$$

$$-\lambda_s \frac{\partial T(B_2^-, t)}{\partial x} = -\lambda_2 \frac{\partial T(B_2^+, t)}{\partial x}. \quad (11)$$

В системе уравнений (4)—(10) приняты следующие обозначения: c — удельная теплоемкость; ρ — плотность; λ — теплопроводность; R — радиус; T — температура; x — координата; t — время; α — коэффициент температуропроводности; B_1, B_2 — координаты верхней и нижней границы теплопроводящего слоя. Индексы: H_2O — вода; возд — воздух; 0 — начальное условие; 1 — первый цилиндр; 2 — второй цилиндр; s — теплопроводящий слой.

Система уравнений (4)—(10) решается численно по неявной разностной схеме. Для определения значений температуры на $n+1$ временном слое находим решение этой системы уравнений, используя метод прогонки.

Для верификации модели были проведены экспериментальные исследования на установке, содержащей два алюминиевых цилиндра, с отверстиями в точках E и C (см. рис. 4), в которых запресовали медные проводники и закрепили с помощью теплопроводящего клея платинородий—платинородиевые термопары фирмы «Элемер». В ходе эксперимента на исследуемый образец воздействовали кипящей дистиллированной водой и наблюдали изменение температуры в точках E и C с помощью термопар, одновременно фиксируя значение дифференциальной термоэдс, возникающей между алюминиевыми образцами и медными проводниками в точках E и C соответственно. Полученные данные о значениях температуры в точках E и C приведены на рис. 5.

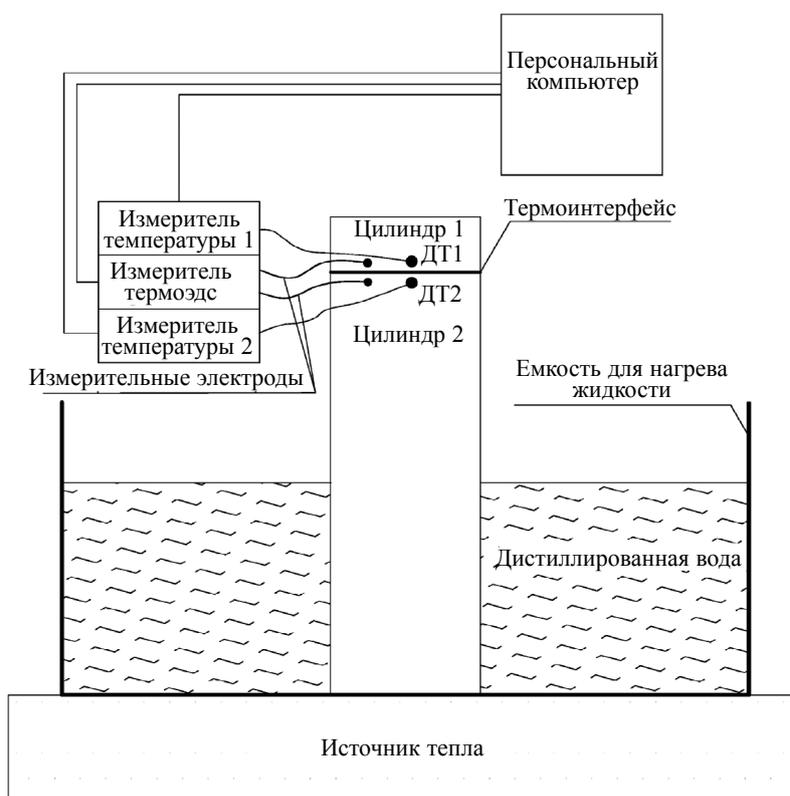
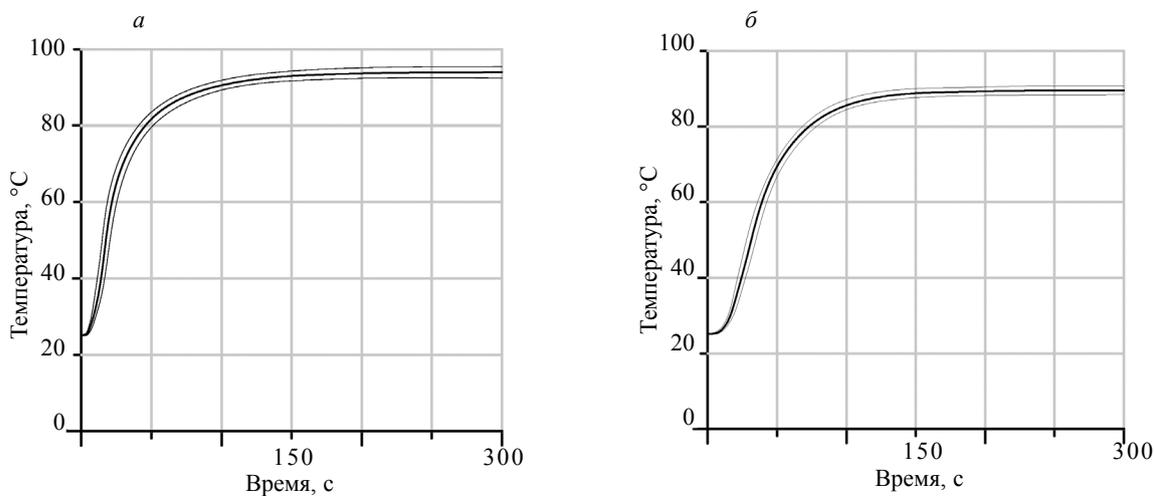


Рис. 4. Схема эксперимента.

Рис. 5. График зависимости температуры от времени (тонкие линии — область погрешностей, толстая линия — расчетные значения): в точке *C* (*a*); в точке *E* (*б*).

Как видно из рис. 5, отличия расчетной и экспериментальной диаграмм изменения температуры составляют не более 7 %, что может быть объяснено неидеальными условиями измерений и допущениями математической модели, а также сложностью точного определения исходных данных для расчета. Разница температур в этих точках приведена на рис. 6.

Для получения измеренного значения теплового сопротивления по формуле (3) приведем тепловую модель к аналогу в виде электрической цепи методом электротепловой аналогии [20] (рис. 7).

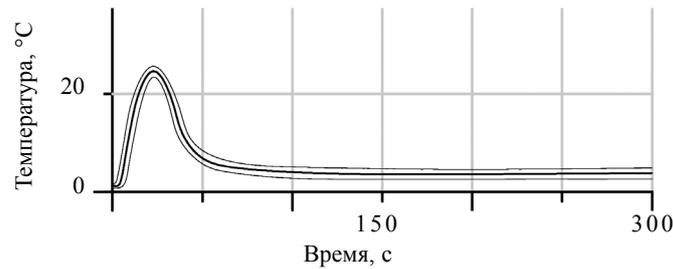


Рис. 6. График зависимости разности температур в точках E и C от времени (тонкие линии — область погрешностей, толстая линия — расчетные значения).

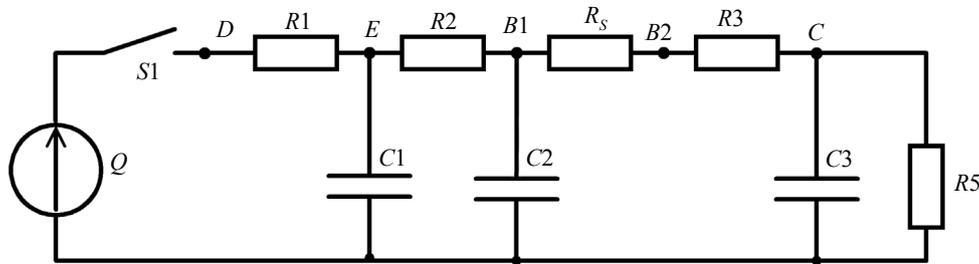


Рис. 7. Электрический аналог тепловой схемы.

В электрическом аналоге тепловой модели приняты следующие обозначения: источник питания Q — источник тепла в виде кипящей воды; R_1, R_2, R_S, R_3, R_5 — тепловые сопротивления цилиндра в координатах от точки D до точки E , от точки E до точки B , на границах теплопроводящего слоя, от точки B до точки C и между гранью цилиндра в точке C и окружающей средой соответственно; C_1, C_2, C_3 — теплоемкости цилиндра в координатах от точки D до точки E , от точки E до точки B и от точки B до точки C соответственно; B_1, B_2 — координаты верхней и нижней границы теплопроводящего слоя.

Согласно электрическому аналогу цепи, приведенной на рис. 7, тепловой поток — это ток резистора R_S , который будет определяться из выражения:

$$I_{R_S} = \frac{U_1 - U_2}{R_1}, \quad (12)$$

где U_1, U_2 — напряжение в точках D и E соответственно.

следовательно, зная тепловые сопротивления R_2 и R_3 можно найти тепловое сопротивление R_S :

$$R_S = \frac{U_2 - U_3}{I_{R_S}} - I_{R_S} \times R_2 - I_{R_S} \times R_3. \quad (13)$$

где U_3 — напряжение в точке C .

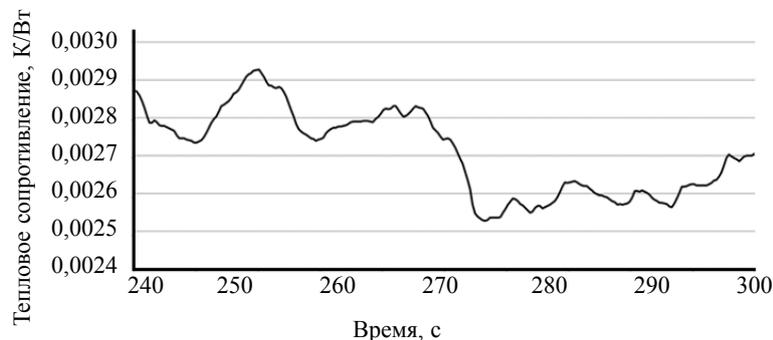


Рис. 8. Тепловое сопротивление R_S , определенное по экспериментальным данным в установившемся режиме.

Результаты расчета теплового сопротивления R_s по формуле (13) приведены на рис. 8. Для расчета использовались экспериментальные данные, полученные в установившемся режиме (интервал времени от 240 до 300 с) (см. рис. 6). При этом использовалось усреднение из 50 измерений методом линейной фильтрации. Доверительный интервал не превышает 5 %.

Анализ графика на рис. 8 показал, что разброс значений теплового сопротивления составляет $\pm 7,5$ %. Вариации теплового сопротивления характеризуются случайной погрешностью, вызванной флуктуациями температуры в процессе эксперимента. Измеренное среднее значение теплового сопротивления термоинтерфейса составляет $(0,002721 \pm 0,0002)$ К/Вт, что очень близко совпадает с расчетным значением $0,0025429$ К/Вт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный способ контроля теплового сопротивления позволяет с погрешностью не более ± 10 % проводить контроль качества нанесения термоинтерфейса. Использование термоэлектрического метода позволяет существенно упростить процедуру контроля, получая при этом объективную информацию. С помощью разработанной математической модели можно проводить исследования теплового сопротивления не только термоинтерфейса, но и любых соприкасающихся поверхностей. Следует отметить, что предложенный способ может быть применен для контроля готовых изделий на стадии заключительных испытаний.

Работа выполнена в рамках Программы повышения конкурентоспособности ТПУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hhh Drexhage P., Beckedahl P.* Thermal Paste Application / Rev. 7. SEMIKRON INTERNATIONAL GmbH 2018.
2. *Dieter E.* Thermal Paste Application / Rev. 7. SEMIKRON INTERNATIONAL GmbH 2010.
3. *Schulz M.* Thermal Interface — An Inconvenient Truth // Article Bodo's Power Systems. 2010. № 6.
4. *Смирнов М.* Применение теплопроводящей пасты. Производство Электроники // Технологии, оборудование, материалы. 2013. № 3. С. 119—123.
5. *Колпаков А.* Силовые модули SEMITOR как альтернатива дискретным корпусам ТО // Силовая Электроника. 2004. № 2. С. 32—35.
6. *Дитер Э., Штрубе М., Колпаков А.* Теплопроводящая паста — это действительно важно // Компоненты и технологии. 2010. № 6. С. 88—90э.
7. *Кутателадзе С.С.* Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979. С. 120—123.
8. *Коротких А.Г.* Теплопроводность материалов. Томск: ТПУ, 2011. 97 с.
9. *Лившиц Б.Г., Крапоткин В.С., Линецкий Я.Л.* Физические свойства металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1980. 320 с.
10. *Путилов К.А.* Курс физики. Том II. Учение об электричестве / Учебное пособие. М.: Изд. Физ.-мат. лит., 1963. 583 с.
11. *Soldatov A.I., Soldatov A.A., Sorokin P.V., Abouellail A.A., Kostina M.A.* Thermoelectric method of plastic deformation detection // Materials Science Forum. 2018. V. 938. P. 112—118.
12. *Obach I.I., Abouellail A.A., Soldatov A.I., Sorokin P.V., Shinyakov Y.A., Sukhorukov M.P.* Monitoring of power supply / SIBCON 2019. P. 8729572.
13. *Abouellail A., Obach I., Soldatov A., Soldatov A.* Surface inspection problems in thermoelectric testing // MATEC Web of Conferences, 2017. V. 102. P. 01001.
14. *Soldatov A.I., Soldatov A.A., Sorokin P.V., Loginov E.L., Abouellail A.A., Kozhemyak O.A., Bortalevich S.I.* Control system for device «thermotest» / SIBCON 2016. P. 7491869.
15. *Yavuz C., Yilma, S., Kaya M.* The design of computer controlled cold and hot therapy device with thermoelectric module // Journal of Medical Imaging and Health Informatics. 2013. V. 3. № 2. P. 221—226.
16. *Крайнов А.Ю., Рыжих Ю.Н., Тимохин А.М.* Численные методы в задачах теплопереноса / Учебно-методическое пособие. Томск: ТГУ, 2009. 114 с.
17. *Тихонов А.Н., Самарский А.А.* Уравнения математической физики. М.: Наука, 1977. 736 с.
18. *Рихтмайер Р., Мортон К.* Разностные методы решения краевых задач. М.: Изд-во «Мир», 1972. 420 с.
19. *Краус А.Д.* Охлаждение электронного оборудования. М.: Энергия, 1979. 70 с.
20. *Мальцев И.А.* Экспресс-контроль теплового сопротивления полупроводниковых приборов в режиме докритических тепловых воздействий / Автореферат дис. Казань: КНИТУ—КАИ, 2016.