

**Разработка металлгибридного термоинтерфейса:  
экспериментальное исследование и математическое моделирование**

*В. С. Кондратенко, А. А. Высоканов, Ю. И. Сакуненко, О. Н. Третьякова,  
А. А. Молотков, В. Н. Тикменов*

*В работе приведены результаты математического моделирования и экспериментальных испытаний теплоотвода от тепловыделяющих элементов к радиатору для выбора и оптимизации параметров нового металлгибридного термоинтерфейса (МГТИ), предложенного в работах [1–4]. МГТИ представляет собой каркас из двух тонких металлических перфорированных пластин, пространство между которыми заполнено тонким слоем теплопроводящей пасты. Проведен сравнительный анализ и показаны неоспоримые преимущества МГТИ перед традиционными термоинтерфейсами.*

*Ключевые слова:* термоинтерфейс, теплопроводящая паста, теплоотвод, «жидкий металл».

**Введение**

С каждым годом производительность компьютеров и других электронных приборов и устройств неуклонно растет, а вместе с производительностью увеличивается и количество тепла, выделяемого процессорами и другими компонентами. Проблема отвода тепла от теплогенерирующих устройств является наиболее актуальной для современной электроники. Крайне важным компонентом любой системы охлаждения является термоинтерфейс.

Термоинтерфейс – это слой теплопроводящего состава между охлаждаемой поверхностью тепловыделяющего устройства и отводящим, рассеивающим тепло устройством. В реальной технике соприкасающиеся поверхности тепловыделяющего элемента и радиатора не имеют плотного теплового контакта из-за наличия неровностей, что приводит к повышению теплового сопротивления и, как следствие, к перегреву тепловыделяющего элемента. Заполняющий зазор воздух является теплоизолятором и блокирует отвод тепла от тепловыделяющего элемента. Поскольку коэффициент теплопроводности воздуха составляет  $K = 0,025$  Вт/(м К), а для алюминия  $K = 220$  Вт/(м К), то воздушный зазор толщиной 0,1 мм блокирует теплоотвод так же, как лист алюминия толщиной 1 метр.

Хорошего теплового контакта можно достичь за счет удаления воздуха из имеющихся зазоров и заполнения их теплопроводящим материалом, т. е. за счет применения термоинтерфейса. Главная задача любого термоинтерфейса – обеспечение максимальной эффективности теплоотвода от тепловыделяющего элемента к рассеивающему тепло радиатору за счет создания максимального теплового контакта между их соприкасающимися поверхностями.

Самые распространенные виды термоинтерфейсов:

- теплопроводящие пасты;
- полимеризующиеся теплопроводные композиты;
- теплопроводящие клеящие составы;
- теплопроводящие прокладки;
- припои и жидкие металлы.

**Кондратенко Владимир Степанович**<sup>1</sup>, зав. кафедрой, профессор, д.т.н.

E-mail: vsk1950@mail.ru

**Высоканов Андрей Александрович**<sup>1</sup>, аспирант.

E-mail: maestro\_777@mail.ru

**Сакуненко Юрий Иванович**<sup>2</sup>, ген. директор, к.т.н.

E-mail: teplostok.plastic@gmail.com

**Третьякова Ольга Николаевна**<sup>3</sup>, профессор, к.т.н.

E-mail: tretiyakova\_olga@mail.ru

**Молотков Андрей Андреевич**<sup>3</sup>, магистрант.

**Тикменов Василий Николаевич**<sup>4</sup>, ген. директор, д.т.н.

E-mail: tikmenov@elins.ru

<sup>1</sup> Московский технологический университет МИРЭА.

Россия, 107996, Москва, ул. Стромьнка, 20.

<sup>2</sup> ООО «Инжиматику», резидент «Сколково».

Россия, 105484, Москва, Сиреневый б-р, 59, стр. 1.

<sup>3</sup> Московский авиационный институт

(национальный исследовательский университет) МАИ.

Россия, 125993, Москва, Волоколамское ш., 4.

<sup>4</sup> АО «Научно-технический центр «Элинс».

Россия, 124460, Москва, Зеленоград,

Панфиловский просп., 4-1.

Статья поступила в редакцию 1 марта 2018 г.

© Кондратенко В. С., Высоканов А. А., Сакуненко Ю. И., Третьякова О. Н., Молотков А. А., Тикменов В. Н., 2018

Термоинтерфейсы должны отвечать следующим требованиям:

- максимальная теплопроводность;
- стабильность свойств в течение рабочего времени и в период хранения;
- сохранение теплопроводных свойств во всем используемом диапазоне температур;
- практичность и легкость нанесения и удаления термоинтерфейса.

Каждый из перечисленных типов термоинтерфейсов имеет свои преимущества и недостатки. Однако новый металлогибридный термоинтерфейс (МГТИ), ранее предложенный в работах [1–4], сочетает в себе все преимущества традиционных видов термоинтерфейсов и лишен недостатков, присущих им.

Цель данной работы – подтвердить достоинства МГТИ и представить результаты математического моделирования и экспериментальных испытаний металлогибридного теплоотвода от тепловыделяющих элементов к радиатору для выбора и оптимизации параметров различных МГТИ.

## Преимущества МГТИ

МГТИ представляет собой каркас из двух тонких металлических перфорированных пластин, пространство между которыми заполнено тонким слоем теплопроводящей пасты. Основные достоинства МГТИ, определяющие его преимущества перед традиционными видами термоинтерфейса, состоят в следующем:

- высокая теплопроводность;
- надежность и долговечность работы;
- простота и удобство монтажа и демонтажа, вплоть до возможности автоматизации процесса;
- низкая себестоимость и цена;
- полностью российский продукт, позволяющий реализовать импортозамещение.

В табл. 1 приведены наиболее часто применяемые в современной полупроводниковой индустрии промышленные термоинтерфейсы. Для двух термопаст Arctic MX-4 и КПТ-8, приведённых в табл. 1, в ходе выполнения данной работы была проведена серия расчётов.

Таблица 1

Сравнительные характеристики различных термопаст

№	Вид термоинтерфейса/ Коммерческое название	Теплопроводность $K$ , Вт/(м К)	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
1	Термопаста/Arctic MX-4 [5]	8,7	2400
2	Термопаста/ КПТ-8 ГОСТ 19783–74 [6]	0,7	2600–3000
3	Жидкий металл/Coollaborator Liquid Pro [7]	82,0	6850
4	Термопаста/ Cooler Master MasterGel Maker Nano(MGZ-NDSG-N15M-R1) [8]	11,0	237
5	Термопрокладка/Arctic Thermal Pad ACTPD00001A [9]	6	3,2

Для оценки эффективности МГТИ были произведены его теоретические и экспериментальные исследования.

### Экспериментальные исследования

В ходе экспериментальных исследований были смоделированы испытания МГТИ на процессоре Intel i7. Реальные экспериментальные исследования и расчеты проводились для мощности 165 Вт.

Применялась следующая методика проведения испытаний и последовательность выполнения операций:

1. Монтаж исследуемого термоинтерфейса на охлаждаемую область стенда.
2. Запуск стенда и прогрев до рабочей температуры с фиксацией температуры.
3. Измерение температуры при максимальной нагрузке в течение 30 минут.
4. Сохранение графика измерений. Определение среднего значения температуры работы при максимальной нагрузке.

На рис. 1 приведен пример графика контролируемых параметров, в данном случае изменение температуры с течением времени.

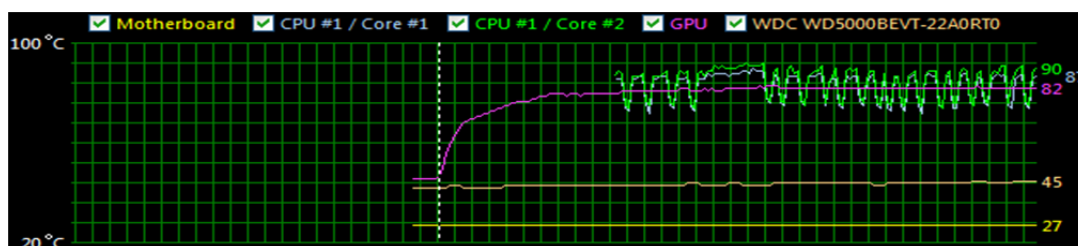


Рис. 1. Пример графика контролируемых параметров: зависимость температуры от времени.

Для увеличения точности полученных результатов каждый из типов конструкции (а именно, каркасы из меди и алюминия с использованием термопаст КППТ-8 и Arctic MX-4 в качестве основы МГТИ) был подвергнут 30-кратным испытаниям. После этого было определено среднее значение теплопроводности  $K_{\text{общ}}$  для каждого типа МГТИ.

На рис. 2 приведены результаты экспериментальных исследований по эффективности теплоот-

вода от процессора Intel i7 при использовании в качестве термоинтерфейса традиционных термопаст КППТ-8, Arctic MX-4, жидкого металла и работанных МГТИ.

Значения коэффициента теплопроводности  $K_{\text{общ}}$ , которые были получены в результате испытаний МГТИ с медными и алюминиевыми каркасами с использованием двух типов термопаст КППТ-8 и Arctic MX-4, приведены в табл. 2.

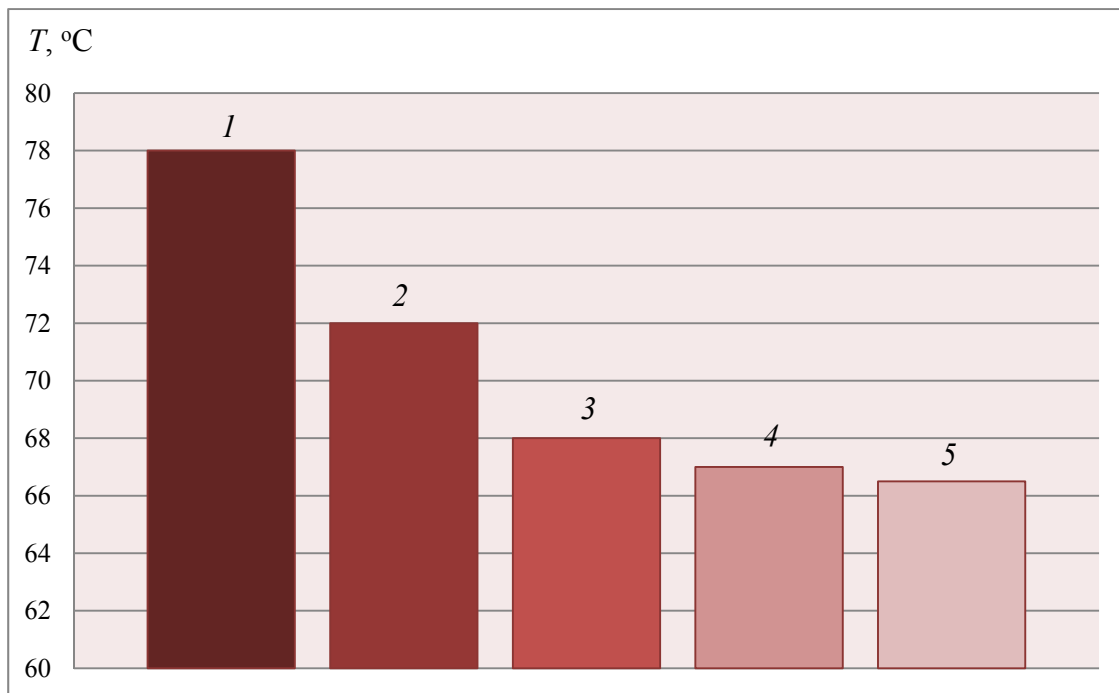


Рис. 2. Эффективность охлаждения процессора Intel i7 с применением различных термоинтерфейсов: 1 – термопаста КППТ-8 ГОСТ 19783–74 [6]; 2 – термопаста Arctic MX-4 [5]; 3 – МГТИ с алюминиевым каркасом и термопастой Arctic MX-4; 4 – жидкий металл Coollaborator Liquid Pro [7]; 5 – МГТИ с медным каркасом и термопастой Arctic MX-4.

Таблица 2

Теплопроводность  $K_{\text{общ}}$  различных типов МГТИ

Материал каркаса	Алюминий (Al)		Медь (Cu)	
	КППТ-8	Arctic MX-4	КППТ-8	Arctic MX-4
Теплопроводность $K_{\text{общ}}$ , Вт/(м К)	2,7	26,1	3,20	33,74

### Теоретические исследования

Для теоретической оценки эффективности МГТИ была построена математическая модель МГТИ с параметрами, соответствующими экспериментальным исследованиям.

Для обеспечения рабочей температуры процессора заданной мощности в рабочем диапазоне температур от 60 °С до 90 °С необходимо обеспечить теплофизические и геометрические характеристики термопасты и металлических пластин, которые позволили бы обеспечить отвод тепла от

тепловыделяющего элемента, в данном случае – процессора. Будем считать, что время выхода на рабочий режим (достижение максимальной температуры процессора) существенной роли не играет.

Для упрощения постановки задачи принимали, что распределение отводимой от процессора мощности по площади равномерное. Это позволяет перейти от трехмерной краевой задачи теплопроводности к одномерной. Для расчетов использовался пакет прикладных программ ANSYS, в котором трехмерная краевая задача теплопроводности решается методом конечных элементов.

Для моделирования теплоотвода использовалась упрощенная физическая модель, где МГТИ представлен слоистой структурой с различными теплофизическими свойствами (см. рис. 3). Слои выделены различными цветами.

В точке 0 находится поверхность процессора. В интервале 0– $l_1$  находится (первый слой) термо-

паста. В интервале  $l_1$ – $l_2$  (второй слой) находится первая медная пластина. В интервале  $l_2$ – $l_3$  (третий слой) находится термопаста. В интервале  $l_3$ – $l_4$  (четвертый слой) находится вторая медная пластина. В интервале  $l_4$ – $l_5$  (пятый слой) находится термопаста. В интервале  $l_5$ – $L$  (шестой слой) находится алюминиевый радиатор.

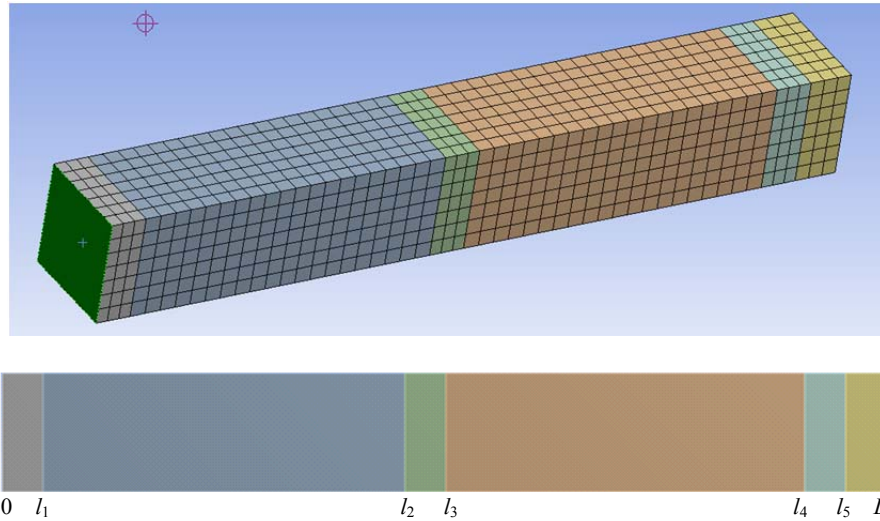


Рис. 3. Модель термоинтерфейса.

Примем следующие обозначения:

$l_p$  – толщина слоя термопасты в интерфейсе;

$l_{cu}$  – толщина слоя меди в интерфейсе;

$l_T$  – суммарная толщина термоинтерфейса;

$l_p = l_1 - 0 = l_3 - l_2 = l_5 - l_4$ ;

$l_{cu} = l_2 - l_1 = l_4 - l_3$ ;

$l_T = l_5 - 0 = 3l_p + 2l_{cu}$ .

$$K(l) = \begin{cases} \lambda_1, & l \leq l_1 \\ \lambda_2, & l_1 \leq l \leq l_2 \\ \lambda_1, & l_2 \leq l \leq l_3 \\ \lambda_2, & l_3 \leq l \leq l_4 \\ \lambda_1, & l_4 \leq l \leq l_5 \\ \lambda_3, & l_5 \leq l \leq L \end{cases}$$

Решается краевая задача теплопроводности:

$$K(l) \frac{\partial^2 T}{\partial l^2} + F(l, t) = \rho(l)c(l) \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$\rho(l) = \begin{cases} \rho_1, & l \leq l_1 \\ \rho_2, & l_1 \leq l \leq l_2 \\ \rho_1, & l_2 \leq l \leq l_3 \\ \rho_2, & l_3 \leq l \leq l_4 \\ \rho_1, & l_4 \leq l \leq l_5 \\ \rho_3, & l_5 \leq l \leq L \end{cases}$$

$$c(l) = \begin{cases} c_1, & l \leq l_1 \\ c_2, & l_1 \leq l \leq l_2 \\ c_1, & l_2 \leq l \leq l_3 \\ c_2, & l_3 \leq l \leq l_4 \\ c_1, & l_4 \leq l \leq l_5 \\ c_3, & l_5 \leq l \leq L \end{cases}$$

Начальные условия

$$T|_{t=0} = T_0.$$

Граничные условия

$$q(0, t) = q_0$$

$$q(L, t) = \alpha(T - T_{cp}),$$

где  $\rho(l)$  – плотность,  $c(l)$  – удельная теплоёмкость,  $K(l)$  – коэффициент теплопроводности соответствующих слоёв.

Наиболее характерными размерами для процессора считается  $37,5 \times 37,5$  мм, но в силу одномерности задачи с целью уменьшения объема вычислений будем задавать площадь сечения с размерами  $0,05 \times 0,05$  мм. Характерная толщина термоинтерфейса  $l_T = 350$  мкм. В процессе расчётов она варьировалась в соответствии с изменением толщины слоёв. Слева на границе  $l = 0$  идёт

нагрев интерфейса от процессора: поверхностная плотность теплового потока  $q_0 = 117333 \text{ Вт/м}^2$ , мощность 165 Вт. Справа на границе  $l = L$  осуществляется отвод тепла посредством конвекции. Для расчётов взята модель естественной конвекции с коэффициентом  $\alpha = 2000 \text{ Вт/м}^2$  [10].

Рассчитываемая толщина алюминиевого радиатора мала. Расчёт теплоотвода с радиатора для обеспечения указанного значения  $\alpha$  является самостоятельной задачей, решение которой зависит от конструкции радиатора. Предварительные оценки показывают, что в качестве простейшей модели радиатора может быть взят слой алюминия толщиной в несколько миллиметров.

Для расчёта выбрана равномерная сетка с постоянным шагом по толщине. При проведении расчетов использовался размер ячейки по толщине

7,5 мкм. Изменение расчётной сетки и шага по времени в ходе расчётов существенного влияния на результат не оказали.

На рис. 4 приведено рассчитанное распределение температуры для МГТИ с применением термопасты Arctic MX-4, толщины слоёв соответствуют данным рис. 2. Для этого случая была получена зависимость максимальной и минимальной температур от времени. В стационарном режиме максимальная температура установилась на уровне в  $79,5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Затем термоинтерфейс заменили однородным слоем термопасты Arctic MX-4 толщиной  $l_T = 350 \text{ мкм}$  и провели повторный расчёт. Результат расчёта представлен на рис. 5. В стационарном режиме максимальная температура установилась на уровне  $83,4 \text{ }^\circ\text{C}$ .

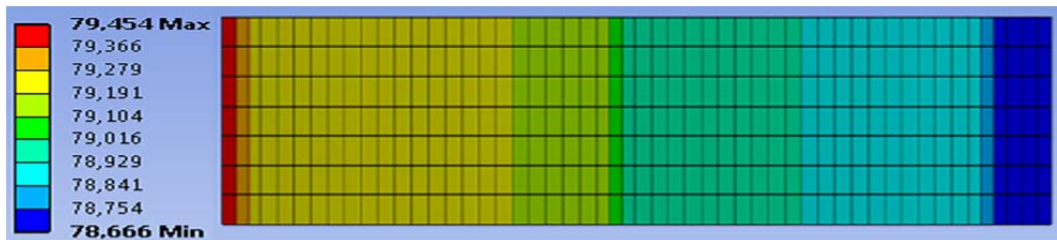


Рис. 4. Распределение температуры термоинтерфейса с пастой Arctic MX-4.

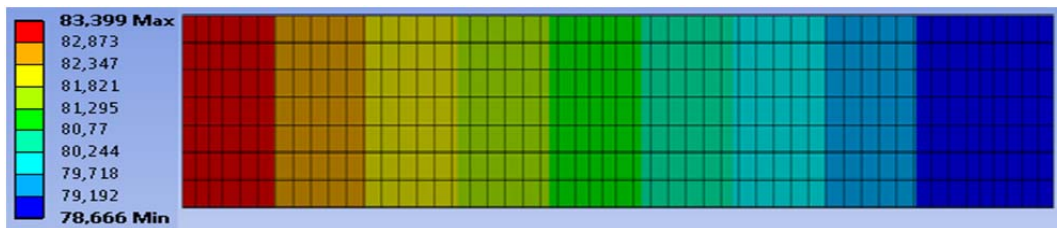


Рис. 5. Распределение температуры при замене интерфейса слоем термопасты Arctic MX-4.

Далее, поступили следующим образом: при фиксированных параметрах однородного слоя термопасты Arctic MX-4 варьировали её коэффициент теплопроводности  $K$  и подобрали его значение ( $K_{эф}$ ), при котором на поверхности процессора обеспечивается та же температура ( $79,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ), что и при использовании МГТИ.

Эффективной теплопроводностью  $K_{эф}$  назвали теплопроводность, которую должна иметь термопаста, для того чтобы она проводила тепло так же, как и термоинтерфейс  $K_{эф} = K_{общ}$ , т. е. обеспечивала ту же максимальную температуру на выходе процессора (на границе  $x = 0$ ), что и МГТИ в целом. Значение  $K_{эф}$  определяется по максимальной температуре в стационарном состоянии. Из рис. 6 видим, что после определённого момента времени температура модели перестаёт изменяться, т. е. достигается стационарное состояние.

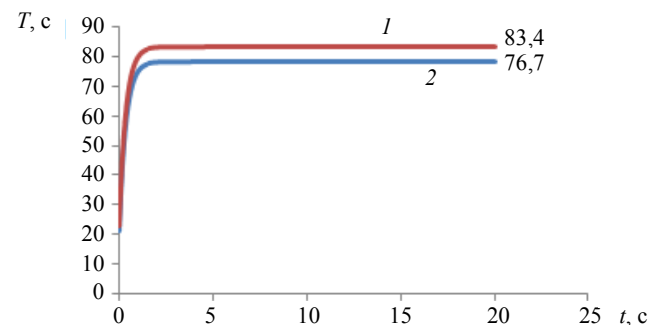


Рис. 6. График зависимости максимума (кривая 1) и минимума (кривая 2) температуры от времени для слоя пасты Arctic MX-4. Пример выхода на стационарное состояние.

Таким образом, для МГТИ с медными пластинами, заполненным термопастой Arctic MX-4 с коэффициентом теплопроводности  $K = 8,7 \text{ Вт/(м К)}$ , была получена максимальная температура на выходе процессора (на границе  $x = 0$ )  $79,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . При

замене МГТИ однородным слоем термопасты Arctic MX-4 была получена максимальная температура на выходе процессора 83,4 °С. При замене интерфейса пастой Arctic MX-4 с эффективной теплопроводностью  $K_{эф} = 53,0$  Вт/(м К) получена требуемая максимальная температура на выходе процессора 79,5 °С.

Были проведены аналогичные расчёты для пасты КПТ-8. При использовании такого же, как и в первом случае, МГТИ с медными пластинами, но заполненного термопастой КПТ-8 с коэффициентом теплопроводности  $K = 0,7$  Вт/(м К), была получена максимальная температура на выходе процессора (на границе  $x = 0$ ) 87,3 °С. При замене МГТИ однородным слоем термопасты КПТ-8 была получена максимальная температура на выходе процессора 137,3 °С. При замене интерфейса пастой КПТ-8 с эффективной теплопроводностью  $K_{эф} = 4,75$  Вт/(м К) получена требуемая максимальная температура на выходе процессора 87,3 °С.

Эффективностью термоинтерфейса  $EF$  назвали отношение эффективной теплопроводности и теплопроводности пасты  $EF = K_{эф}/K$ .

В результате анализа серии численных экспериментов, проведённых для двух термопаст Arctic MX-4 и КПТ-8, можно сделать вывод, что эффективная теплопроводность термоинтерфейса  $K_{эф}$  с пастой Arctic MX-4 превосходит теплопровод-

ность  $K$  пасты Arctic MX-4 в 6,1 раза ( $EF = 6,1$ ), а эффективная теплопроводность термоинтерфейса  $K_{эф}$  с пастой КПТ-8 превосходит теплопроводность  $K$  пасты КПТ-8 в 6,8 раз ( $EF = 6,8$ ). Таким образом, эффективность металлгибридного термоинтерфейса в обоих случаях увеличивается более, чем в 6 раз.

Далее была проведена серия расчётов, в которых варьировались значения плотности, а затем теплоёмкости используемой пасты. Установлено, что изменение плотности термопасты не приводит к сколько-нибудь существенным изменениям как температуры, так и эффективной теплопроводности (см. табл. 3). Увеличение (уменьшение) теплоёмкости приводит к увеличению (уменьшению) времени, необходимого для достижения стационарного распределения температуры. Влияние изменения теплоёмкости на значение максимальной температуры и эффективной теплопроводности также мало (см. табл. 3). При увеличении теплоёмкости  $C$  в 15 раз максимальная температура изменилась с 79,5 °С на 79,4 °С.

Анализ данных, полученных в результате проведенных численных экспериментов, приведенных в табл. 3–5 и на рис. 6, рис. 7, позволил с достаточной степенью точности оценить эффективность МГТИ и предложить формулу для инженерных расчетов.

Таблица 3

Параметры термопаст

Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Удельная теплоёмкость $C$ , Дж/(кг К)	Теплопроводность $K$ , Вт/(м К)	Эффективная теплопроводность $K_{эф}$ , Вт/(м К)
2500	700	0,5	3,41
2500	700	1	6,75
2500	700	10	59,8
1000	700	0,5	3,40
25000	700	0,5	3,41
2500	300	1	6,75
2500	7000	1	6,75

Таблица 4

Линейные размеры металлгибридного термоинтерфейса

Толщина слоя термопасты $l_p$ , мм	Толщина слоя меди $l_{cu}$ , мм	Теплопроводность $K$ Вт/(м К)	Эффективная теплопроводность $K_{эф}$ Вт/(м К)
0,017	0,15	1	6,75
0,017	0,1	1	4,85
0,017	0,3	1	12,45
0,01	0,15	1	10,8
0,1	0,15	1	2

Таблица 5

Сравнение экспериментальных и теоретических результатов значений теплопроводности для МГТИ с медными пластинами

Приведённые расчёты	Математическая модель		Эксперимент	
	КПТ-8	Arctic MX-4	КПТ-8	Arctic MX-4
Теплопроводность $K_{эф}$ Вт/(м К)	4,75	53	3,20	33,74



Приведенные в табл. 5 сравнительные данные по результатам теоретического и экспериментального определения теплопроводности МГТИ с медными пластинами позволяют говорить об их соответствии. Расхождение в числовых значениях результатов можно объяснить тем, что была выбрана достаточно простая математическая модель, пригодная для оценки в первом приближении.

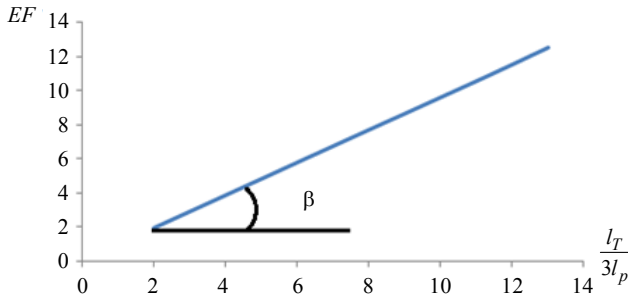


Рис. 7. График зависимости эффективности термоинтерфейса  $EF$  от относительной толщины МГТИ (отношения суммарной толщины термоинтерфейса  $l_T$  к суммарной толщине слоев термопасты  $l_p$ ).

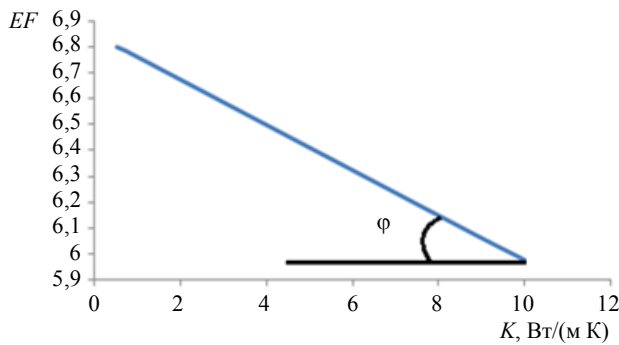


Рис. 8. График зависимости эффективности термоинтерфейса  $EF$  от коэффициента теплопроводности термопасты  $K$ .

Графики рис. 7 и рис. 8 построены с использованием данных из табл. 3 и табл. 4. Из графиков на рис. 7 и рис. 8 видно, что зависимости эффективности термоинтерфейса  $EF$  от относительной толщины МГТИ (рис. 7) и коэффициента теплопроводности термопасты (рис. 8) близки к линейным.

В результате выполненных расчетных и экспериментальных исследований предложена эмпирическая формула зависимости эффективной теплопроводности термоинтерфейса  $K_{эф}$  от теплопроводности термопасты  $K$  и линейных размеров термоинтерфейса:

$$K_{эф} = \left[ \operatorname{tg}\beta \frac{l_T}{3l_p} - (K - 1)\operatorname{tg}\varphi \right] K,$$

где  $K_{эф}$  – эффективная теплопроводность,  $l_p$  – толщина слоя термопасты в интерфейсе,  $l_{cu}$  – толщина

слоя меди в интерфейсе,  $l_T$  – суммарная толщина термоинтерфейса  $l_T = 3l_p + 2l_{cu}$ ,  $K$  – теплопроводность термопасты.

Поясним полученную формулу на примере анализа графиков рис. 7 и рис. 8 с использованием данных из табл. 3 и табл. 4.

Например, по данным из первой строки табл. 4 вычисляем отношение  $l_T/3l_p = (3l_p + 2l_{cu})/3l_p = 1 + 2l_{cu}/3l_p = 1 + 2 \times 0,15/3 \times 0,0167 = 7$  и  $EF = \frac{K_{эф}}{K} = 6,75$ . В этом случае вводим поправочный

коэффициент  $\operatorname{tg}\beta$  (рис. 7). Вычислим его при помощи третьей и пятой строк табл. 4. Пятая строка соответствует точке (2; 2) на графике, вторая строка – точке (13; 12,45). По определению,  $\operatorname{tg}\beta = \frac{12,45 - 2}{13 - 2} = 0,95$ . Таким образом, получили

значение  $EF$  при  $K = 1$ , назовём его  $EF_1$ ,  $EF_1 = \operatorname{tg}\beta(l_T/3l_p)$ . Разницу  $\Delta EF$  между значениями  $EF$  для двух разных значений  $K$  (назовём их  $K_1$  и  $K_2$ ) видим из рис. 8.  $\Delta EF$  можем вычислить при помощи выражения  $\Delta EF = -(K_2 - K_1)\operatorname{tg}\varphi$ , где  $\operatorname{tg}\varphi = 0,08$ , (рис. 8).  $K_1$  и  $K_2$  – коэффициенты теплопроводности термопасты взяты из табл. 3. В результате, если положим  $K_1 = 1$  придём к формуле для вычисления  $K_{эф}$ .

$$K_{эф} = (EF_1 + \Delta EF)K = \left[ \operatorname{tg}\beta \frac{l_T}{3l_p} - (K - 1)\operatorname{tg}\varphi \right] K.$$

Предложенная эмпирическая формула может использоваться в инженерных расчётах при проектировании МГТИ.

## Заключение

Выполненный комплекс экспериментальных и расчетных работ по разработке и оптимизации конструкции нового типа термоинтерфейсов, а именно, металлгибридного термоинтерфейса показал его неоспоримое преимущество перед всеми известными традиционными типами термоинтерфейсов: теплопроводными пастами, теплопроводящими прокладками, теплопроводящими клеящими составами, припоями и жидкими металлами.

Эффективность разработанного металлгибридного термоинтерфейса увеличивается более, чем в 6 раз, по сравнению с используемыми теплопроводными пастами.

Получена эмпирическая зависимость между основными параметрами термоинтерфейса, позволяющая проводить инженерные расчеты при создании металлгибридных термоинтерфейсов с заданными теплофизическими характеристиками.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кондратенко В. С., Сакуненко Ю. И. РФ Патент № 2015129660. 21.07.2015.
2. Кондратенко В. С., Сакуненко Ю. И. // Полупроводниковая светотехника. 2015. № 6. С. 72.
3. Кондратенко В. С., Сакуненко Ю. И., Высоканов А. А. Металлогридные термоинтерфейсы (МГТИ). В сборнике: Оптические технологии, материалы и системы. Сборник научных трудов Всероссийской научно-технической конференции. Московский технологический университет, Физико-технологический институт. 2016. С. 116–118.
4. Кондратенко В. С., Сакуненко Ю. И., Высоканов А. А. // Прикладная физика. 2017. № 1. С. 85.
5. Arctic Silver Incorporated – Arctic Silver. – URL: <http://www.arcticsilver.com/as5.htm>.
6. ГОСТ 19783–74. Паста кремнийорганическая теплопроводная. Технические условия. – Введ. 1975-01-01.
7. Coollaboratory Liquid Pro – Coollaboratory. – URL: <http://www.coollaboratory.com/product/coollaboratory-liquid-pro>.
8. Cooler Master. MasterGel Maker. – URL: <http://www.coolermaster.com/cooling/thermal-compound/mastergel-maker>
9. Thermal Pad – Thermal Compound – Cooling – Products. – URL: [https://www.arctic.ac/worldwide\\_en/thermal-pad](https://www.arctic.ac/worldwide_en/thermal-pad)
10. Мартыненко О. Г., Соковишин Ю. А. Свободно-конвективный теплообмен. Справочник. – Минск: Наука и техника, 1982.

PACS: 85.60.Gz

## Development of metal-hybrid thermal interface: experimental research and mathematical modeling

*V. S. Kondratenko<sup>1</sup>, A. A. Visakanov<sup>1</sup>, Yu. I. Sakunenko<sup>2</sup>, O. N. Tretiyakova<sup>3</sup>,  
A. A. Molotkov<sup>3</sup>, and V. N. Tikmenov<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>Moscow Technological University MTU MIREA  
20 Stromynka str., Moscow, 107996, Russia  
E-mail: [vsk1950@mail.ru](mailto:vsk1950@mail.ru)

<sup>2</sup>Engimatik, LLC  
Bld. 1, 59 Sirenevyyi boulv. Moscow, 105484, Russia

<sup>3</sup>Moscow Aviation Institute (National Research University)  
4 Volokolamskoe shosse, Moscow, 125993, Russia

<sup>4</sup>Elins Science-Technical Center, JSC  
4-1 Panfilovskii av., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia

*Received March 1, 2018*

***Consideration is given to the new metal-hybrid thermal interface (MGTI). The results of mathematical modeling and experimental tests of MGTI permit to select parameters of a thermal interface to remove efficiently a heat from fuel elements to the radiator. MGTI is a frame of two thin metal perforated plates, the space between them is filled with a thin layer of heat-conducting paste. Comparative analysis and demonstration of the undeniable advantages of MGTI over traditional thermal interfaces are carried out.***

***Keywords:*** thermointerface, heat conducting paste, heat removal, «liquid metal».

## REFERENCES

1. Yu. I. Sakunenko and V. S. Kondratenko, RF Patent No. 2015129660. July 21, 2015.
2. V. S. Kondratenko and Yu. I. Sakunenko, *Poluprov. Svetotekhnika*, No. 6, 72 (2015).
3. V. S. Kondratenko, Yu. I. Sakunenko, and A. A. Vysokanov, *Metallo-hybrid thermal interfaces (MGTI)*, in *Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference “Optical technologies, materials and systems”*. (Moscow Technological University, Institute of Physics and Technology. 2016). P. 116–118.
4. V. S. Kondratenko, Yu. I. Sakunenko, and A. A. Vysokanov, *Prikl. Fiz.* No. 1, 85 (2017).
5. Arctic Silver Incorporated – Arctic Silver. (URL: <http://www.arcticsilver.com/as5.htm>)
6. GOST 19783–74. Silicone-organic heat conducting paste. Technical conditions. – Enter. 1975-01-01.
7. Coollaboratory Liquid Pro – Coollaboratory. (URL: <http://www.coollaboratory.com/product/coollaboratory-liquid-pro>).
8. Cooler Master. MasterGel Maker. (URL: <http://www.coolermaster.com/cooling/thermal-compound/mastergel-maker>).
9. Thermal Pad – Thermal Compound – Cooling – Products. (URL: [https://www.arctic.ac/worldwide\\_en/thermal-pad](https://www.arctic.ac/worldwide_en/thermal-pad)).
10. O. G. Martynenko and Yu. A. Sokovishin, *Free convection heat transfer. Handbook*. (Minsk: Science and Technology, 1982) [in Russian].