

УДК 621.315.592:536.2
EDN: WLOPLD

PACS: 66.70.-f, 81.05.-t, 85.35.-p

Конформные тепловые метаматериалы – новые возможности управления тепловыми потоками в электронике© Ю. И. Сакуненко^{1,*}, В. С. Кондратенко², А. А. Трофимов³¹ ООО «Термоинтерфейсы», фонд Сколково, Москва, 121205 Россия

* E-mail: teplostok.plastic@gmail.com

² МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия³ АО «НПО «Орион», Москва, 111538 Россия

Статья поступила в редакцию 13.10.2025; после доработки 2.11.2025; принята к публикации 11.12.2025
Шифр научной специальности: 1.3.8

Представлены результаты разработки и валидации нового класса материалов – конформных тепловых метаматериалов (КТМ), обладающих уникальной триадой свойств: выраженной анизотропией теплопроводности ($\lambda_{xy}/\lambda_z \approx 20-30$, где $\lambda_{xy} = 60-80$ Вт/(м·К), $\lambda_z = 2-4$ Вт/(м·К)), обеспечивающей «тепловой разворот»; конформностью – способностью точно воспроизводить рельеф поверхностей и изгибаться до 180° для «геометрического» управления потоками; автоэффектом улучшения теплового контакта за счет микроэкструзии внутренней теплопроводящей пасты. КТМ занимают промежуточное положение между жесткими анизотропными пластинами и тепловыми трубами, сочетая их преимущества при меньшей стоимости. Валидационные эксперименты на светодиодных лентах, точечных LED-источниках и мощных резисторах показали снижение температуры кристалла на $28-45^\circ\text{C}$, что эквивалентно увеличению срока службы в $2-3$ раза. Доказана возможность замены традиционных Ш-образных радиаторов на покрытия КТМ и связанного с этим радикального улучшения массогабаритных характеристик электронных устройств.

Ключевые слова: тепловые метаматериалы; анизотропия теплопроводности; конформные материалы; тепловая маршрутизация; светодиоды.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-6-21-25

Введение

Проблема утилизации избыточного тепла сопровождает развитие любой техники, но в электронике она особенно критична. С ростом удельной мощности (например, в светодиодных системах до $10-15$ Вт/мм² и в процессорах до 200 Вт/см²) растет и тепловыделение, что приводит к перегреву, снижению эффективности и надежности компонентов. Традиционные решения – массивные изотропные радиаторы и термоинтерфейсы – исчерпали свой потенциал, сталкиваясь с ограничениями по неполному контакту, жесткой

геометрии и изотропной теплопроводности. Поэтому поиск альтернативных материалов для отвода тепла стал одной из главных задач индустрии. Одним из таких перспективных решений по отводу тепла является применение синтетических алмазов, выращенных методом химического осаждения из углеродной плазмы с последующим полированием до идеальной кристаллической структуры, что позволяет им максимально плотно прилегать к поверхности кристалла и эффективно отводить тепло от горячих зон [1]. Однако, стоимость такого решения остаётся высокой из-за сложности производства. Параллельно ведут-

ся разработки гибридных решений – алмазно-медных радиаторов [2]. В условиях, когда ведущие мировые производители осваивают выпуск чипов по технологическим нормам 2 нм и внедряют все более сложные упаковки чипов, поиск новых решений, обеспечивающих эффективное теплоотведение и управление тепловыми потоками становится актуальной задачей [3].

Одним из таких принципиально новых подходов является применение тепловых метаматериалов [4], свойства которых определяются не химическим составом, а специально спроектированной микроархитектурой. Такие материалы обладают особыми свойствами, которые невозможно получить, используя природные вещества [5], и состоят из множества элементарных ячеек определенной формы и размера, расположенных в периодическом узоре [6].

В настоящей работе представлены результаты создания и экспериментальной валидации конформных тепловых метаматериалов (КТМ) – нового класса материалов, сочетающих сильную анизотропию теплопроводности с геометрической гибкостью и технологичностью.

Материалы и методы

Основу КТМ составляет [7, 8] металлическая матрица-каркас, представляющая собой совокупность особым образом скрепленных микропрофилированных и микроперфорированных листов алюминиевой фольги (см. рис. 1). Эта матрица полностью пропитана высоковязкой теплопроводящей пастой на основе оксидов цинка. Толщина листовых образцов составляет 1–1,5 мм.

Представленные на рис. 1 КТМ обладают уникальной триадой характеристик, отсутствующей в природных материалах.

Одной такой характеристикой тепловых свойств КТМ является анизотропия теплопроводности. Разработанная архитектура обеспечивает технически значимую анизотропию. Поперечная теплопроводность (λ_z) составляет 2–4 Вт/(м·К) (измерения проводились в лабораториях LG и Foxconn), а продольная (λ_{xy}) – 60–80 Вт/(м·К) (измерения проводились в лабораториях в Швеции и Германии). Коэффициент

анизотропии достигает 20–30, что позволяет эффективно реализовывать эффект «разворота» теплового потока и его транспортировку в плоскости материала.

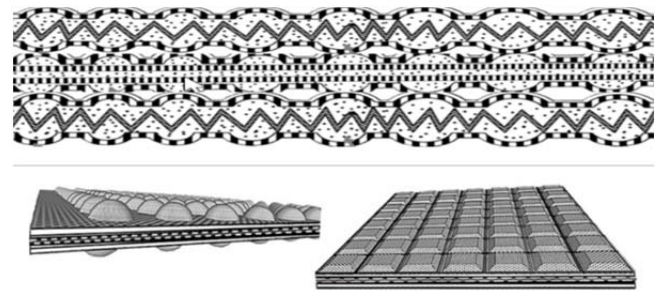


Рис. 1. Варианты топологии конформных тепловых метаматериалов

Другой ключевой характеристикой (механической) является конформность и гибкость представленного КТМ. Наличие множества микроячеек и использование тонкой пластичной фольги позволяет КТМ при минимальном давлении принимать и точно копировать (реплицировать) форму практически любых контактирующих с ними поверхностей – от прямоугольного чипа на поверхности печатной платы до цилиндрического лазера. Материал легко изгибается в любом направлении (вплоть до 180°), что открывает принципиально новые возможности геометрического управления тепловыми потоками, например, обход препятствий простым сгибом КТМ, что недостижимо для жестких графеновых пластин.

Третья особенность (технологическая) заключается в автоэффекте улучшения теплового контакта (автотермоконтакт). При монтаже теплопроводящая паста выдавливается через микроперфорацию на поверхность (реализуется «эффект пчелиных сот»), что приводит к вытеснению воздуха – основного врага теплопередачи – и обеспечивает в сочетании с пластичностью матрицы практически идеальный контакт.

Если рассматривать КТМ с точки зрения способности манипуляции тепловыми потоками (сбор тепла в области А (коллектор), его концентрация, транспортировка и выгрузка в области В (эмиттер)), то для систематизации возможностей КТМ можно ввести понятие тепловой маршрутизации, которое позволяет

классифицировать существующие решения по следующим уровням:

- L0 (отсутствие маршрутизации) – изотропные материалы (металлы, пластмассы, керамика), где направление потоков диктуется внешними градиентами;

- L1 (жесткая планарная 2D маршрутизация) – анизотропные материалы (графены), проводящие тепло вследствие их жёсткости прямолинейно;

- L2 (3D маршрутизация) – тепловые трубы, эффективно перебрасывающие тепло из точки А в точку В, но дорогие и требующие дополнительно громоздких коллекторов и радиаторов.

КТМ занимают в такой классификации промежуточное положение, обозначаемое как L1+ (гибкая планарная 2D+ маршрутизация). Они не только собирают и транспортируют тепло, как графены, но и, благодаря конформности и гибкости, способны легко изменять траекторию и конечный пункт доставки тепла, обходя препятствия и адаптируясь к реальной трехмерной геометрии устройства.

Экспериментальная валидация тепловых характеристик КТМ проводилась на светодиодных лентах, точечных LED-модулях и мощных резисторах. Температурные поля регистрировались тепловизором Testo 873 в режиме Super Resolution.

Экспериментальная часть

Для оценки эффективности КТМ для распределенных тепловых источников проводился эксперимент по охлаждению светодиодной (LED) ленты. Лента была закреплена в пластиковом профиле: одна половина охлаждалась пассивно, другая – со вставкой из КТМ (англ. СТММ) (см. рис. 2).

Как видно из рис. 2 светодиодная лента при напряжении 15 В нагрелась до 126 °С при пассивном охлаждении и до 86 °С при охлаждении со вставкой из КТМ. Таким образом, разница температур на линзах (индикатор температуры кристалла) составила ~ 40 °С в пользу участка с КТМ. Снижение температуры на 40 °С может увеличить срок службы LED в несколько раз или позволить существенно повысить световой поток.

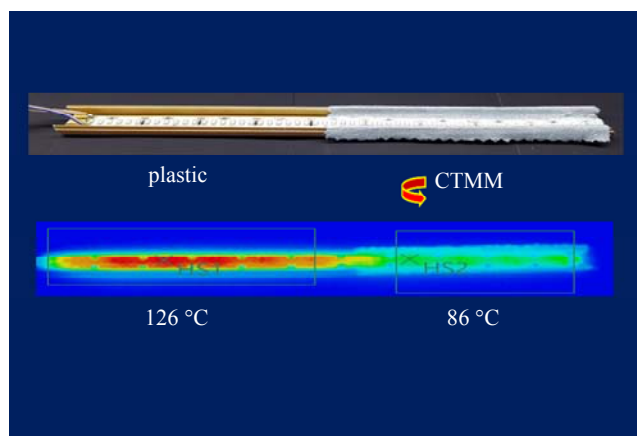


Рис. 2. Сравнение температурных полей светодиодной ленты при стандартном охлаждении (пластиковый профиль) и с применением КТМ (англ. СТММ)

Для демонстрации эффекта «теплого разворота» показана возможность перенаправления теплового потока на 180° на мощных точечных светодиодах. Один LED охлаждался традиционным Ш-образным радиатором, второй – «тюльпаном» из КТМ, охватывающим боковые и тыльную стороны и перенаправляющим тепло вперед (рис. 3).

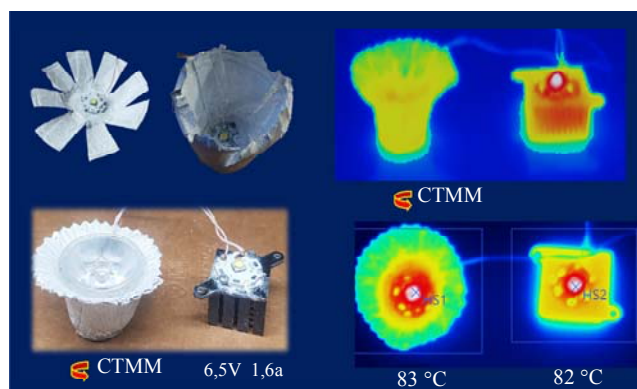


Рис. 3. Сравнение температур мощных точечных светодиодов при традиционном (тыловом) охлаждении (Ш-образный алюминиевый радиатор) и с применением КТМ (СТММ) «тюльпана» (фронтальное охлаждение)

Установившиеся температуры кристаллов, как показано на рис. 3, оказались практически идентичными, что подтверждает возможность реализации фронтального охлаждения и разворота теплового потока.

Для сравнения эффективности КТМ со стандартными радиаторами проводился эксперимент по охлаждению мощных резисторов. Применено несколько вариантов охлаждения (рис. 4): базовый, в котором охлаждение

реализовано только теплопроводящей пастой; традиционный, в котором для охлаждения применялся Ш-образный радиатор; а также

вариант с применением КТМ, в котором двумя пластинами КТМ сформирована замкнутая «кокон»-оболочка вокруг резистора.

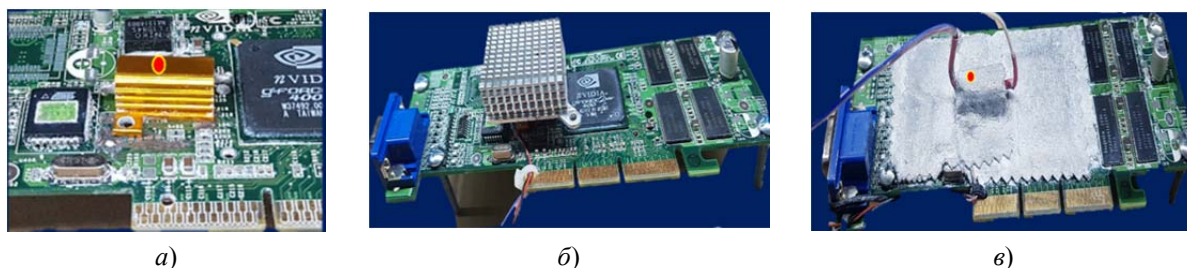


Рис. 4. Варианты охлаждения мощного резистора: а) – только термопаста; б) – стандартный алюминиевый радиатор; в) – охлаждение КТМ (конфигурация «кокон»)

Зависимость температуры мощных резисторов от рассеиваемой электрической мощности для всех трех вариантов охлаждения приведена на рис. 5.

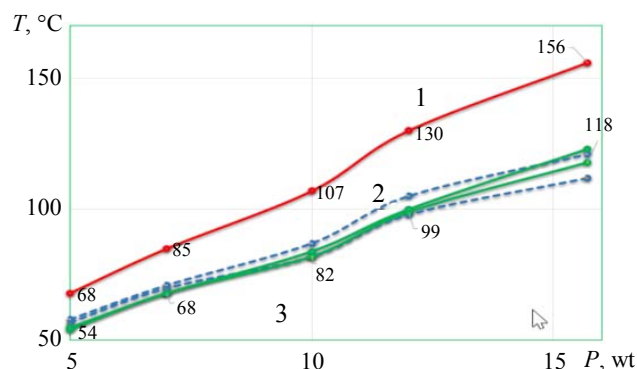


Рис. 5. Зависимость температуры мощных резисторов от рассеиваемой электрической мощности при охлаждении: 1 – только термопастой; 2 – стандартным алюминиевым радиатором; 3 – КТМ (конфигурация «кокон»)

Как видно из графика на рис. 5, во всем диапазоне нагрузок до 16 Вт применение КТМ в конфигурации «кокон» (линия 3) обеспечило эффективность, эквивалентную применению стандартного алюминиевого радиатора (пунктирная линия 2), и значительно превзошла вариант с одной термопастой (линия 1). Таким образом, подтверждается возможность превращения печатной платы по существу в эффективный плоский радиатор при применении КТМ.

Заключение

Разработанные конформные тепловые метаматериалы представляют собой пол-

нофункциональное решение для управления тепловыми потоками в современной электронике. КТМ демонстрируют уникальную триаду свойств: анизотропию ($\lambda_{xy}/\lambda_z \approx 20-30$), конформность (изгиб до 180°) и автотермоконттакт, что обеспечивает беспрецедентную гибкость в управлении теплом. Экспериментально подтверждено снижение температуры кристаллов LED на $28-45^\circ\text{C}$, что эквивалентно росту срока службы в 2–3 раза. По охлаждающей способности КТМ эквивалентны в ряде случаев традиционным радиаторам, но при этом обеспечивают значительное сокращение габаритов и массы устройств, открывая путь к созданию плоских, безрадиаторных конструкций. Реализована концепция тепловой маршрутизации уровня L1+ позволяющая с помощью КТМ полноценно манипулировать теплом — собирать, концентрировать, транспортировать и адресно отдавать тепло, включая его разворот на 180° . Перспективы применения КТМ включают охлаждение устройств с импульсным тепловыделением (лазеры, лидары) и использование КТМ для элементов электромагнитного экранирования печатных плат.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. www.nytimes.com/2025/10/08/science/diamonds-computer-chips-ai.html
2. <https://www.techpowerup.com/331456/element-six-introduces-copper-diamond-composite-material-to-enhance-cooling-of-advanced-semiconductor-devices>
3. <https://asia.nikkei.com/business/tech/semiconductors/applied-materials-says-chipmaking-is-entering-the-atomic-era>
4. Cahill D. G., Ford W. K., Goodson K. E. et al. / Journal of Applied Physics. 2003. Vol. 93. P. 793–818.

5. Семченко И., Хахомов С., Самофалов А., Балмаков А. / Наука и инновации. 2020. № 8. С. 23–27. <https://doi.org/10.29235/1818-9857-2020-8-23-27>

6. Yan Zhao et al. / New J. Phys. 2010. Vol. 12. P. 103045. doi: 10.1088/1367-2630/12/10/103045

7. Сакуненко Ю. И. Устройство отвода тепла от тепловыделяющих объектов. Патент RU 217975 U1 РФ; заявл. 06.03.2023 № 2023105094.

8. Кондратенко В. С., Сакуненко Ю. И., Высоканов А. А. / Прикладная физика. 2017. № 1. С. 85–89.

PACS: 66.70.-f, 81.05.-t, 85.35.-p

Conformal thermal metamaterials – new opportunities for managing heat flows in electronics

Yu. I. Sakunenko^{1,*}, V. S. Kondratenko² and A. A. Trofimov³

¹LLC “Termointerfeisy”, Skolkovo Foundation, Moscow, 121205 Russia

²MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

³RD&P Center ORION, JSC, Moscow, 111538 Russia

Received 13.10.2025; revised 2.11.2025; accepted 11.12.2025

Overheating is a fundamental barrier to the development of electronics due to the rapid increase in heat flux density (up to 200 W/cm² in processors). The paper presents the results of the development and validation of a new class of materials – Conformal Thermal Metamaterials (CTM), possessing a unique triad of properties: pronounced thermal conductivity anisotropy ($\lambda_{xy}/\lambda_z \approx 20\text{--}30$, where $\lambda_{xy} = 60\text{--}80$ W/(m·K), $\lambda_z = 2\text{--}4$ W/(m·K)), enabling "heat flow turning"; conformality – the ability to precisely replicate surface topography and bend up to 180° for geometric flow control; auto-effect of thermal contact improvement due to micro-extrusion of internal thermal paste. CTMs occupy an intermediate position (level L1+ "flexible planar routing") between rigid anisotropic plates and heat pipes, combining their advantages at a lower cost. Validation experiments on LED strips, point LED sources, and power resistors showed a reduction in crystal temperature by 28–45 °C, equivalent to a 2–3 times increase in service life. The efficiency of CTMs, comparable to aluminum radiators, has been proven, with the potential to create completely flat, radiator-free devices.

Keywords: thermal metamaterials; thermal conductivity anisotropy; conformal materials; thermal routing; LEDs.

REFERENCES

1. www.nytimes.com/2025/10/08/science/diamonds-computer-chips-ai.html
2. <https://www.techpowerup.com/331456/element-six-introduces-copper-diamond-composite-material-to-enhance-cooling-of-advanced-semiconductor-devices>
3. <https://asia.nikkei.com/business/tech/semiconductors/applied-materials-says-chipmaking-is-entering-the-atomic-era>
4. Cahill D. G., Ford W. K., Goodson K. E. et al., J. Appl. Phys. **93**, 793–818 (2003).
5. Semchenko I., Nahomov S., Samofalov A. and Balmakov A., Nauka i innovacii, № 8, 23–27 (2020) [in Russian]. <https://doi.org/10.29235/1818-9857-2020-8-23-27>
6. Yan Zhao et al., New J. Phys. **12**, 103045 (2010). doi:10.1088/1367-2630/12/10/103045
7. Sakunenko Yu. I. Heat removal device for heat-generating objects: Pat. RU 217975 U1 Russian Federation; filed 06.03.2023 № 2023105094 [in Russian].
8. Kondratenko V. S., Sakunenko Yu. I. and Vysokanov A. A., Applied Physics, № 1, 85–89 (2017) [in Russian].

Об авторах

Сакуненко Юрий Иванович, к.т.н., генеральный директор, ООО «Термоинтерфейсы» (121205, Россия, Москва, ул. Нобеля, 7). E-mail: teplostok.plastic@gmail.com

Кондратенко Владимир Степанович, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник ИЦ, советник ректората, МИРЭА – Российский технологический университет (119454, Москва, просп. Вернадского, 78). E-mail: vsk1950@mail.ru AuthorID: 497953, Orcid ID 0000-002-2559-535X, Scopus Author ID 15834985700

Трофимов Александр Александрович, к.т.н., заместитель начальника серийного производства, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9). E-mail: aa-trofimov@yandex.ru SPIN-код: 3716-5536, AuthorID: 818356