

Квантовая, твердотельная, плазменная и вакуумная электроника

УДК 536.2.02

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2020-23-3-53-61>

Исследование распространения теплового потока в теплопроводящих оксидных подложках с различной теплопроводностью методом линейного источника тепла

И. А. Врублевский¹, К. В. Чернякова², Е. Н. Муратова^{3✉}, Н. В. Лушпа¹

¹ Учреждение образования "Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники", Минск, Республика Беларусь

² Государственный научный институт Центр физических наук и технологий, Вильнюс, Литва

³ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ sokolovaeknik@yandex.ru

Аннотация

Введение. Для контролируемого управления тепловыми процессами устройств силовой электроники важной задачей является повышение эффективности отвода тепла от активных компонентов.

Цель работы. Представление нового подхода к размещению линейного источника тепла контактного типа на поверхности тонких образцов с целью исследования особенностей распространения тепловых потоков в оксидных подложках из материалов с различной теплопроводностью.

Методы. Представлены результаты исследований особенностей распространения тепловых потоков в оксидных подложках с различной теплопроводностью (ситалл и поликор). Для генерации теплового потока использовался линейный источник тепла, в качестве которого применялась электропроводящая углеродная нить.

Результаты. Получены термограммы и профили распределения температуры в различные промежутки времени нагрева на поверхности подложки с элементом нагрева и на ее обратной стороне. Показано, что размещение линейного источника тепла на основе электропроводящей углеродной нити на поверхности исследуемых образцов и мониторинг во времени термограмм с двух противоположных поверхностей позволяют получить данные для оценки эффективности тепловых свойств оксидных подложек. Распространение теплового потока в однородном материале вблизи места генерации имеет вид конуса тепловой трубы с основанием на поверхности с источником тепла. Тепловой конус для керамики имеет больший угол наклона, чем в случае ситалла.

Заключение. Полученные результаты позволили предложить способ снижения теплового сопротивления теплопроводящей подложки за счет создания условий для увеличения площади теплопроводящего сечения.

Ключевые слова: оксидная керамика, поликор, ситалл, тепловой поток, теплопроводность, термограммы, линейный источник тепла

Для цитирования: Исследование распространения теплового потока в теплопроводящих оксидных подложках с различной теплопроводностью методом линейного источника тепла / И. А. Врублевский, К. В. Чернякова, Е. Н. Муратова, Н. В. Лушпа // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 3. С. 53–61. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-3-53-61

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-2268.2020.8 и проекта БРФФИ № Ф19В-010.

Статья поступила в редакцию 31.03.2020; принята к публикации после рецензирования 10.05.2020; опубликована онлайн 29.06.2020

© Врублевский И. А., Чернякова К. В., Муратова Е. Н., Лушпа Н. В., 2020



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License

Investigation of Heat Flux Propagation in Heat-Conducting Oxide Substrates with Different Heat Conductivity by the Linear Heat Source Method

Igor A. Vrublevsky¹, Katsiaryna V. Chernyakova²,
Ekaterina N. Muratova³✉, Nikita V. Lushpa¹

¹ Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

² Center for Physical Science and Technology, Vilnius, Lithuania

³ Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ sokolovaeknik@yandex.ru

Abstract

Introduction. For controlled thermal management of power electronics devices, an important task is to increase the efficiency of heat removal from active components.

Aim. To introduce a new approach to placing a linear contact-type heat source on the surface of thin samples in order to study the features of propagation of heat fluxes in oxide substrates from materials with different thermal conductivities.

Methods and materials. The paper presents the results of studies of the propagation of heat fluxes in oxide substrates with different thermal conductivity (glassceramic and aluminum oxide ceramic - polycor). To generate the heat flux, a linear heat source was used, for which an electrically conductive carbon fiber was applied.

Results. Thermograms and temperature distribution profiles were obtained at different periods of heating time on the surface of the substrate with a heating element and on its reverse side. It was shown that the placement of the linear heat source, implemented using an electrically conductive carbon filament, on the surface of the studied samples and time monitoring of thermograms from two opposite surfaces of the samples allowed to obtain data for evaluating the thermal properties of oxide substrates. The distribution of the heat flux in a homogeneous material near the generation point had the form of a cone of a heat pipe with a base on the surface with a heat source. The thermal cone for an aluminum oxide ceramic substrate had a larger angle of inclination than that in the case of glassceramic.

Conclusion. The results obtained allowed to propose a method for reduction of thermal resistance of a heat-conducting substrate by creating conditions for increasing the area of heat-conducting section.

Keywords: oxide ceramics, aluminum oxide ceramic, glassceramic, heat flux, thermal conductivity, thermograms, linear heat source

For citation: Vrublevsky I. A., Chernyakova K. V., Muratova E. N., Lushpa N. V. Investigation of Heat Flux Propagation in Heat-Conducting Oxide Substrates with Different Heat Conductivity by the Linear Heat Source Method. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2020, vol. 23, no. 3, pp. 53–61. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-3-53-61

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

Acknowledgments. This work was supported by a grant from the President of the Russian Federation MK-2268.2020.8 and the project BRFFR No. F19V-010.

Submitted 31.03.2020; accepted 10.05.2020; published online 29.06.2020

Введение. Для управления мощными электрическими процессами в устройствах силовой электроники необходимо использовать эффективные решения для отвода тепла от активных компонентов, расположенных на монтажных диэлектрических подложках [1–7]. Одним из таких решений является использование теплопроводящих подложек с высокой теплопроводностью [8, 9].

Информация о тепловых свойствах подложки и особенностях отвода тепла в ее объеме необходима для управления режимами работы устройств мощной силовой электроники.

В реальных условиях распределение тепловых потоков внутри монтажной подложки не является равномерным. Это связано с наличием горячих точек на подложке, в которых происходит

повышенное тепловыделение. Оптимизация вопросов применения подложек в устройствах силовой электроники выводит на первый план задачу определения в их объеме реальной формы тепловых потоков [10], которые генерируются активными полупроводниковыми компонентами на поверхности.

Для регистрации температуры поверхности используются оптические методы контроля, в частности тепловизионные [11–14]. Они позволяют визуализировать процессы распространения тепла на поверхности подложки и оценить ее тепловые характеристики. Достоинством таких методов является относительная простота проведения эксперимента и возможность регистрации тепловой картины в реальном масштабе времени.

Целью настоящей статьи является изучение процессов распространения тепловых потоков в теплопроводящих оксидных подложках с различной теплопроводностью (ситалл и поликор), создаваемых с помощью линейного источника тепла на их поверхности.

Материалы и методы. В экспериментах по исследованию тепловых свойств использовались два типа теплопроводящих подложек: алюмооксидная керамика марки ВК100 (поликор) из поликристаллического Al_2O_3 (99.6 %) с коэффициентом теплопроводности $30 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ и толщиной 0.5 мм и ситалл марки СТ50-1 толщиной 0.5 мм с оксидным составом SiO_2 (60.5 %), Al_2O_3 (13.5 %), CaO (8.5 %), MgO (7.5 %) и TiO_2 (10.0 %), в котором микрокристаллы рутила ($\alpha\text{-TiO}_2$) и кордиерита ($2\text{MgO}-2\text{Al}_2\text{O}_3-5\text{SiO}_2$) являются основным компонентом, с коэффициентом теплопроводности $1.4 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Из подложек вырезались образцы размером $60 \times 24 \text{ мм}$. На поверхности образцов размещался линейный источник, выделявший тепло при прохождении электрического тока. В качестве элемента нагрева использовалась углеродная электропроводящая нить (вискозная техническая нить) [9, 15]. Подготовленные отрезки нити из углеродного волокна размерами $110 \times 4 \times 0.06 \text{ мм}$ имели сопротивление 60 Ом . Концы нитей металлизировались слоем меди (толщина 30 мкм , гальваническое осаждение). Нить с металлизированными концами размещалась на поверхности подложки и фиксировалась специальной стеклотканью (стеклово-

локном, пропитанным эпоксидной смолой). Длина нагревателя позволяет изогнуть его, охватывая весь периметр прямоугольного исследуемого образца.

Для получения термограмм с поверхности подложки использовалась тепловизионная камера MobIRМ4. После подачи питания на нагревательный элемент с интервалом в 5 с проводилась съемка термограмм поверхности подложки для получения картины температурного поля. Для получения сравнимых результатов экспериментов на подложку из керамики, имеющей больший коэффициент теплопроводности, подавалась большая мощность: 6.8 Вт по сравнению с 3.5 Вт , подаваемыми на подложку из ситалла. При этом во всех экспериментах фиксировались изотермические картины теплового поля температуры $30 \text{ }^\circ\text{C}$.

Распределение температур на поверхности подложки в различные промежутки времени нагрева использовалось для определения скорости распространения теплового потока в продольном направлении.

Результаты. В ходе исследований получены картины распространения теплового потока от линейного источника тепла в подложках из материалов с различной теплопроводностью. Снимались термограммы распределения температуры на стороне с линейным источником тепла и на обратной стороне в одинаковые промежутки времени нагрева. На рис. 1 представлены термограммы распределения температуры, снятые для двух поверхностей подложек из ситалла и керамики на пятой секунде нагрева.

Как известно, теплота, выделяемая линейным источником, расположенным на поверхности подложки, распространяется от источника одинаково во всех направлениях [16, 17]. Такой нагрев определяет характер распределения температур в подложке в различные промежутки времени. Термограммы, представленные на рис. 1, отчетливо демонстрируют отпечаток теплового профиля рисунка линейного нагревательного элемента на обратной стороне подложки. В то же время температура отпечатка профиля более низкая, чем температура источника нагрева на противоположной поверхности подложки (рис. 2). Штриховой линией показана изотерма $30 \text{ }^\circ\text{C}$, изменение положения которой со временем рассмотрено далее. На рис. 2, в ее нет, так как профиль температуры обратной стороны керамики проходит выше изотермы.

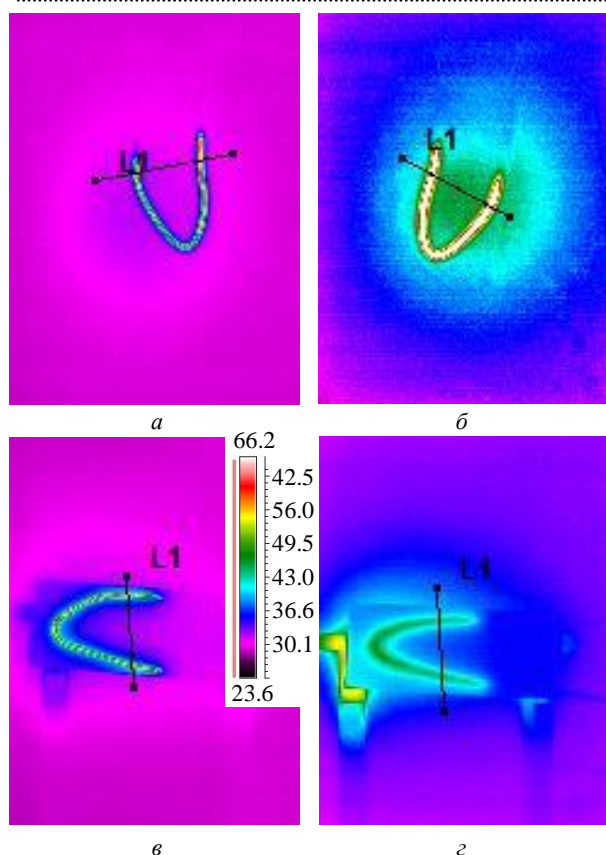


Рис. 1. Термограммы поверхности подложек на пятой секунде нагрева: а, в – сторона расположения линейного источника тепла; б, г – обратная сторона; а, б – подложка из ситалла; в, г – подложка из керамики

Fig. 1. Thermograms of the substrates surface at the fifth second of heating: а, в – side of the linear heat source location; б, г – the reverse side; а, б – sialon substrate; в, г – ceramic substrate

Можно отметить, что в случае ситалла СТ50-1 почти вся поверхность подложки в течение первых 5 с не успевает нагреться (сохраняет свою исходную температуру), за исключением участка, где расположен линейный источник тепла. Для керамики тепловая картина имеет другой вид: в результате нагрева большая часть поверхности подложки нагревается и приобретает температуру, значение которой выше исходной. Наблюдаемые различия в картине нагрева для времени 5 с хорошо согласуются с более низкой теплопроводностью подложки из ситалла СТ50-1 по сравнению с подложкой из керамики [18, 19], что в итоге и приводит к такому результату.

Для количественной оценки скорости распространения тепла в подложке необходимо определить температурное поле, создаваемое линейным источником тепла на двух поверхностях, в различные промежутки времени. На рис. 2 показаны кривые

такого поля на поверхностях из ситалла и керамики для нескольких моментов времени.

Вследствие изотропного распространения тепла в объеме материала при одностороннем нагреве отпечаток профиля элемента нагрева на обратной стороне подложки расплывается (расширяется). Кроме того, его температура меньше, чем на стороне с элементом нагрева. Например, в случае ситалла для левой петли нагревательного элемента на стороне подложки с элементом нагрева максимум температуры на пятой и двадцатой секундах составляет 60.8 и 93.5 °С, а на противоположной стороне подложки под этим элементом – 33.5 и 70 °С соответственно. Более выражен такой эффект для подложки из керамики, которая обладает более высоким коэффициентом теплопроводности.

Наглядное представление о распространении тепла в материале подложки можно получить из изотермических линий для различных интервалов нагрева. На рис. 3 показано изменение положения изотермических линий с температурой 30 °С относительно линейного источника тепла с увеличением длительности нагрева (τ) для подложки из ситалла и керамики. По горизонтальной оси отложено расстояние от точечного источника тепла в обоих направлениях. Толщина подложки представлена условно.

Как видно из рис. 3, в начальный период нагрева (5 с) как в ситалле, так и в керамике распространение теплового потока в материале подложки имеет вид конуса тепловой трубы [20] с основанием на поверхности с тепловым источником. С увеличением времени нагрева из-за отражения тепла от противоположной относительно теплового источника поверхности возникает взаимодействие падающих и отраженных тепловых волн в объеме подложки. Это является причиной исчезновения теплового конуса (для ситалла и керамики на пятнадцатой и десятой секундах соответственно), и дальше тепловой фронт распространяется с одинаковой скоростью во всем объеме подложки. Важно отметить, что тепловой конус в случае керамики (материала с большей теплопроводностью) имеет больший угол наклона, чем для ситалла (материала с меньшей теплопроводностью).

Анализ теплового рассеивания подложки из керамики, и в частности формы ее теплового конуса,

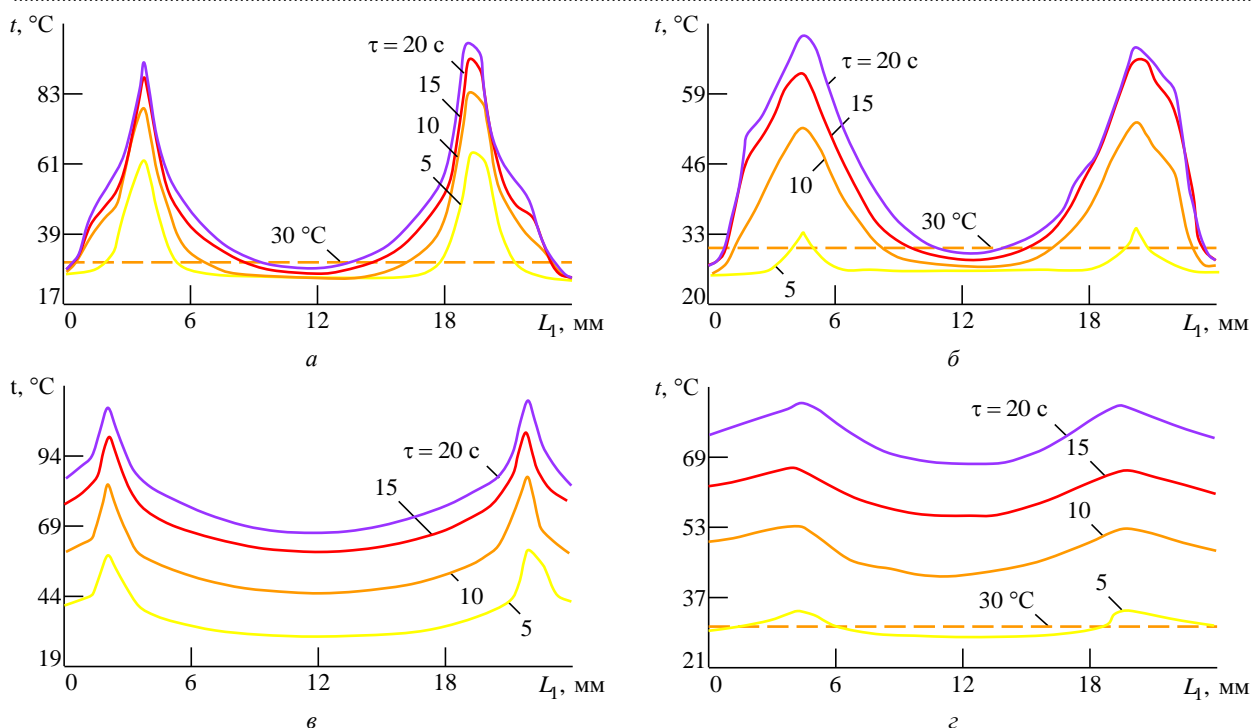


Рис. 2. Температурные профили поверхности подложки для различного времени нагрева: а, в – сторона расположения линейного источника тепла; б, г – обратная сторона; а, б – подложка из ситалла; в, г – подложка из керамики

Fig. 2. Temperature profiles of the substrate surface for different time heating: а, в – side of the linear heat source location; б, г – the reverse side; а, б – sapphire substrate; в, г – ceramic substrate

показал, что металлизация обратной стороны подложки может значительно улучшить тепловые характеристики за счет более быстрого нагрева обратной стороны и создания условий для равномерного распространения теплового потока в объеме без образования теплового конуса.

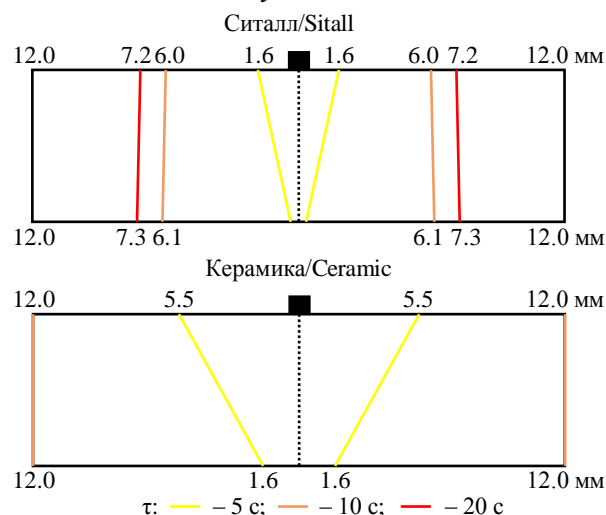


Рис. 3. Изменение положения изотерм плоского температурного профиля с температурой 30 °С относительно линейного источника тепла на поверхности с элементом нагрева (■) и на обратной стороне

Fig. 3. Change in the position of isotherms of a flat temperature profile with a temperature of 30 °С relative to a linear heat source on the surface with a heating element (■) and on the reverse side

Как наглядно показано на рис. 3, при увеличении теплопроводности материала скорость распространения теплового потока от источника тепла в материале в направлении, параллельном поверхности образца, заметно возрастает. Это позволяет предположить, что, если в качестве материала выбрать медь (материал металлизации, имеющий высокую теплопроводность), скорость распространения потока тепла в нем многократно возрастет. Поэтому если материал образца будет многослойным: один слой из материала с низкой теплопроводностью и второй – из материала с высокой теплопроводностью, то картина распространения тепла будет существенно отличаться от однослойного образца из материала с низкой теплопроводностью. Это является темой дальнейших исследований авторов.

Решение с применением металлизации обратной стороны подложки позволяет использовать весь объем подложки из керамики для теплового рассеивания, т. е. увеличить площадь теплопроводящего сечения, что в результате приводит к уменьшению теплового сопротивления. Подложки из керамики с металлизированной обратной стороной могут найти применение для улучшения тепловых режимов работы устройств силовой

электроники с активными элементами на монтажных подложках.

Заключение. В настоящей статье представлены результаты исследований распространения теплового потока в теплопроводящих оксидных подложках с различной теплопроводностью (ситалл и поликор). Для генерации теплового потока использовался линейный источник тепла, в качестве которого применялась электропроводящая углеродная нить.

Получены термограммы и профили распределения температуры в различные промежутки времени нагрева на поверхности подложки с элементом нагрева и на ее обратной стороне. Показано, что в формировании картины теплового поля важную роль играет коэффициент теплопроводности подложки. Распространение теплового потока в однородном материале вблизи точки генерации имеет вид конуса тепловой трубы с ос-

нованием на поверхности с источником тепла. Тепловой конус для подложки из керамики имеет больший угол наклона, чем в случае ситалла.

Анализ теплового рассеивания подложки из керамики, и в частности формы ее теплового конуса, показал, что металлизация обратной стороны подложки может значительно улучшить ее тепловые характеристики. В этом случае за счет более быстрого нагрева обратной стороны создаются условия для равномерного распространения теплового потока в объеме без образования теплового конуса, т. е. увеличивается площадь теплопроводящего сечения для эффективного теплоотвода.

Подложки из керамики с металлизированной обратной стороной могут найти применение для улучшения тепловых режимов работы устройств силовой электроники с активными элементами на монтажных подложках.

Авторский вклад

Врублевский Игорь Альфонсович – выработка концепции, разработка методологии, общее руководство, оценка результатов, написание рабочего варианта.

Чернякова Катерина Владимировна – предварительный анализ, проведение исследований, обработка результатов, подготовка специализированного программного обеспечения.

Муратова Екатерина Николаевна – оценка результатов, работа со списком литературы, редактирование и оформление статьи, взаимодействие с редакцией журнала.

Лушпа Никита Васильевич – изготовление образцов, обработка результатов, подготовка специализированного программного обеспечения, написание рабочего варианта.

Author's contribution

Igor A. Vrublevsky, concept development, methodology development, general management, assessment of results, writing a working version.

Katsiaryna V. Chernyakova, preliminary analysis, research, processing of results, preparation of specialized software.

Ekaterina N. Muratova, assessment of results, work with references, editing and design of an article, interaction with the editorial staff.

Nikita V. Lushpa, production of samples, processing of results, preparation of specialized software, writing a working version.

Список литературы

1. Yeh L. T. Review of Heat Transfer Technologies in Electronic Equipment // J. Electron. Packag. 1995. Vol. 117, iss. 4. P. 333–339. doi: 10.1115/1.2792113

2. Heat Transfer in Electronic Packages. Microelectronics Packaging Handbook / R. E. Simons, V. W. Antonetti, W. Nakayama, S. Oktay. Boston: Springer, 1997. P. 314–403. doi: 10.1007/978-1-4615-4086-1_4

3. Schelling P. K., Shi Li, Kenneth E. G. Managing heat for electronics // Materials Today. 2005. Vol. 8, iss. 6. P. 30–35. doi: 10.1016/S1369-7021(05)70935-4

4. Гриднев В. Н., Миронова Ж. А., Шахнов В. А. Обеспечение качества компоновки монтажных контактных площадок высокоплотной коммутационной

платы // Надежность и качество сложных систем. 2014. Т. 4, № 8. С. 19–25.

5. Семенцов С. Г., Гриднев В. Н., Сергеева Н. А. Тепловизионные методы оценки влияния температурных режимов на надежность электронной аппаратуры // Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2016. № 1. С. 3–14. doi: 10.18698/0236-3933-2016-1-3-14

6. Исследование распространения тепла в плате из алюминия с нанопористым анодным оксидом алюминия тепловизионным методом / Х. Т. Динь, Н. В. Лушпа, Е. В. Чернякова, И. А. Врублевский // Докл. БГУИР. 2019. № 1. С. 119.

7. Симин А., Холодняк Д., Вендик И. Многослойные интегральные схемы сверхвысоких частот на основе керамики с низкой температурой отжига // Компоненты и технологии. 2005. № 5. С. 190–196.

8. Теплопроводящие платы на основе алюминия с наноструктурированным слоем Al_2O_3 для изделий силовой электроники / Е. Н. Муратова, В. А. Мошников, В. В. Лучинин, А. А. Бобков, И. А. Врублевский, К. В. Чернякова, Е. И. Торуков // Журн. техн. физики. 2018. Т. 88, вып. 11. С. 1678. doi: 10.21883/JTF.2018.11.46629.2480

9. Investigation of the efficiency of the heat dissipation for the heat-conducting circuit boards made of aluminum with the nanoporous alumina layer / S. Andreev, K. Chemyakova, B. Tzaneva, V. Videkov, I. Vrublevsky // 40th Intern. Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). Sofia, Bulgaria, 10–14 May 2017. Piscataway: IEEE, 2017. P. 1–6. doi: 10.1109/ISSE.2017.8000899

10. Research on modeling of heat source for electron beam welding fusion-solidification zone/ Ya. Wang, P. Fu, Yo. Guan, Zh. Lu, Yi. Wei // Chinese J. of Aeronautics. 2013. Vol. 26, iss. 1. P. 217–223. doi: 10.1016/j.cja.2012.12.023

11. Applying infrared thermography to study the heating of 2024-T3 aluminium specimens under fatigue loading / M. Pastor, X. Balandraud, M. Grèdiac, J. Robert // Infrared Phys. Technol. 2008. Vol. 51, iss. 6. P. 505–515. doi: 10.1016/j.infrared.2008.01.001

12. Диагностика теплофизических свойств и контроль качества изделий из высокотеплопроводных материалов / В. В. Герасютенко, В. А. Кораблев, Д. А. Минкин, А. В. Шарков // Науч.-техн. вестн. информац. технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19, № 1. С. 82–86.

13. Корольков А. П., Ульяновский А. А., Печенова Н. Н. Тепловизионная диагностика микроэлектронных компонентов // Вестн. Санкт-Петерб. ун-та Государственной противопожарной службы МЧС России. 2014. Т. 4. С. 8–12.

14. Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing / R. Usamentiaga, P. Venegas, J. Guerediaga, L. Vega, J. Molleda, F. G. Bulnes // Sensors (Basel). 2014. Vol. 14, iss. 7. P. 12305–12348. doi: 10.3390/s140712305

15. Improvement of the thermal characteristics of the electric heater in the architecture with aluminum, nanoporous alumina and resistive component of carbon fiber/ I. Vrublevsky, K. Chernyakova, V. Videkov, A. Tuchkovsky // Nanoscience & Nanotechnology. 2016. № 1. P. 1–2. doi: 10.1016/B978-1-4557-3195-4.00001-1

16. Kim H. T. High Thermal Conductivity Ceramics and Their Composites for Thermal Management of Integrated Electronic Packaging // Book Chapter. 27 Jun 2018. Heat Transfer – Models, Methods and Applications. doi: 10.5772/intechopen.75798

17. Effect of alumina concentration on thermal and structural properties of mas glass and glass-ceramics / M. Goswami, A. Sarkar, B. I. Sharma, V. K. Shrikhande, G. P. Kothiyal // J. Therm Anal Calorim. 2004. Vol. 78, iss. 3. P. 699–705. doi: 10.1007/s10973-005-0435-0

18. Chang Z.D., Ma Z. Effect of Anisotropic Conductive Properties on Heat Transfer and Temperature Distribution of Coatings and Substrates // Key Engineering Materials 2012. Vol. 512–515. P. 1045–1050. doi: 10.4028/www.scientific.net/kem.512-515.1045

19. James B. W., Harrison P. Analysis of the temperature distribution, heat flow and effective thermal conductivity of homogeneous composite materials with anisotropic thermal conductivity // J. of Physics D Applied Physics. 1992. Vol. 25, iss. 9. P. 1298–1303. doi: 10.1088/0022-3727/25/9/003

20. Kang S., Choi J. Y., Choi S. Mechanism of Heat Transfer through Porous Media of Inorganic Intumescent Coating in Cone Calorimeter Testing // Polymers. 2019. Vol. 11, iss. 2. P. 221. doi: 10.3390/polym11020221

Информация об авторах

Врублевский Игорь Альфонсович – кандидат технических наук (2001), доцент Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (БГУИР), заведующий лабораторией. Автор более 100 научных работ. Сфера научных интересов – электрохимия; физика поверхности; анодирование алюминия; пористые пленки; углеродсодержащие анодные пленки; оптические свойства; сенсоры; нанодиагностика. Адрес: Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, ул. П. Бровки, д. 6, Минск, 220013, Республика Беларусь
E-mail: vrublevsky@bsuir.edu.by
<http://orcid.org/0000-0002-6796-8994>

Чернякова Катерина Владимировна – кандидат физико-математических наук (2013), доцент Государственного научного института Центра физических наук и технологий, научный сотрудник. Автор 66 научных работ. Сфера научных интересов – электрохимия; физика поверхности; анодирование алюминия; пористые пленки; углеродсодержащие анодные пленки; терморегулирующие покрытия; оптические свойства. Адрес: Государственный научный институт Центр физических наук и технологий, пр. Саванорю, д. 231, Вильнюс, LT-02300, Литва
E-mail: katerinach_85@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6616-4353>

Муратова Екатерина Николаевна – кандидат технических наук (2015), ассистент кафедры микро- и наноэлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 39 научных работ. Сфера научных интересов – электрохимическое анодирование; пористые наноматериалы; мембраны; наночастицы; оптические свойства; нанодиагностика; ионно-пучковые нанотехнологии. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия
E-mail: Sokolovaeknik@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4181-6669>

Лушпа Никита Васильевич – магистр техники и технологии по направлению "Нанотехнологии и наноматериалы (в электронике)" (2019), младший научный сотрудник Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. Автор девяти научных публикаций. Сфера научных интересов – цифровая обработка изображений нанообъектов; тепловые измерения; анодирование алюминия; пористые пленки.

Адрес: Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, ул. П. Бровки, д. 6, Минск, 220013, Республика Беларусь
E-mail: lushpa@bsuir.by
<https://orcid.org/0000-0002-8224-1697>

References

1. Yeh L. T. Review of Heat Transfer Technologies in Electronic Equipment. *J. Electron. Packag.* 1995, vol. 117, iss. 4, pp. 333–339. doi: 10.1115/1.2792113
2. Simons R. E., Antonetti V. W., Nakayama W., Oktay S. Heat Transfer in Electronic Packages. *Microelectronics Packaging Handbook*. Boston, Springer, 1997, pp. 314–403. doi: 10.1007/978-1-4615-4086-1_4
3. Schelling P. K., Shi Li, Kenneth E. G. Managing heat for electronics // *Materials Today*, 2005, vol. 8, iss. 6, pp. 30–35. doi: 10.1016/S1369-7021(05)70935-4
4. Gridnev V. N., Mironova Zh. A., Shakhnov V. A. Ensuring quality of configuration of assembly contact sites of the high density switching payment. *J. Reliability and quality of complex systems*. 2014, vol. 4, no. 8, pp. 19–25. (In Russ.)
5. Sementsov S. G., Gridnev V. N., Sergeeva N. A. Infrared thermography methods of assessing temperature effect on reliability of electronic equipment. *Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Instrumentation series*. 2016, no. 1, pp. 3–14. doi: 10.18698/0236-3933-2016-1-3-14/ (In Russ.)
6. Dinh H. T., Lushpa N. V., Chernyakova K. V., Vrublevsky I. A. Study of distribution of thermal fluxes in a plate of aluminum with nanoporous aluminum oxide by means of thermal imaging measurements. *Rep. Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics*. 2019, no. 1, pp. 119. (In Russ.)
7. Simin A., Kholodnyak D., Vendik I. Multilayer integrated circuits of ultrahigh frequencies based on ceramics with low annealing temperature. *Components and technologies*. 2005, no. 5, pp. 190–196. (In Russ.)
8. Muratova E. N., Moshnikov V. A., Luchinin V. V., Bobkov A. A., Vrublevsky I. A., Chernyakova K. V., Terukov E. I. Heat-conducting aluminum-based boards with a nanostructured layer of Al₂O₃ for power products electronics. *Journal of Technical Physics*. 2018, vol. 88, iss. 11, pp. 1678. doi: 10.21883/JTF.2018.11.46629.2480 (In Russ.)
9. Andreev S., Chemyakova K., Tzaneva B., Videkov V., Vrublevsky I. Investigation of the efficiency of the heat dissipation for the heat-conducting circuit boards made of aluminum with the nanoporous alumina layer. 40th Intern. Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). Sofia, Bulgaria, 10–14 May 2017, Piscataway, IEEE, 2017, pp. 1–6. doi: 10.1109/ISSE.2017.8000899
10. Wang Ya., Fu P., Guan Yo., Lu Zh., Wei Yi. Research on modeling of heat source for electron beam welding fusion-solidification zone. *Chinese J. of Aeronautics*. 2013, vol. 26, iss. 1, pp. 217–223. doi: 10.1016/j.cja.2012.12.023
11. Pastor M., Balandraud X., Grèdiac M., Robert J. Applying infrared thermography to study the heating of 2024-T3 aluminium specimens under fatigue loading. *Infrared Phys. Technol.* 2008, vol. 51, iss. 6, pp. 505–515. doi: 10.1016/j.infrared.2008.01.001
12. Gerasiyutenko V. V., Korablev V. A., Minkin D. A., Sharkov A. V. Diagnostics of thermophysical properties and quality control for devices made of high thermal conductivity materials. *Scientific and technical Bulletin of information technologies, mechanics and optics*. 2019, vol. 19, no. 1, pp. 82–86. (In Russ.)
13. Korolov A. P., Ulyanovskiy A. A., Pechenova N. N. Thermal imaging diagnostics of microelectronic components. *Bull. Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia*. 2014, vol. 4, pp. 8–12. (In Russ.)
14. Usamentiaga R., Venegas P., Guerediaga J., Vega L., Molleda J., Bulnes F. G. Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing. *Sensors (Basel)*. 2014, vol. 14, iss. 7, pp. 12305–12348. doi: 10.3390/s140712305
15. Vrublevsky I., Chernyakova K., Videkov V., Turchkovsky A. Improvement of the thermal characteristics of the electric heater in the architecture with aluminum, nanoporous alumina and resistive component of carbon

fiber. Nanoscience & Nanotechnology. 2016, no. 1, pp. 1–2. doi: 10.1016/B978-1-4557-3195-4.00001-1

16. Kim H. T. High Thermal Conductivity Ceramics and Their Composites for Thermal Management of Integrated Electronic Packaging. doi: 10.5772/intechopen.75798

17. Goswami M., Sarkar A., Sharma B. I., Shrikhande V. K., Kothiyal G. P. Effect of alumina concentration on thermal and structural properties of mas glass and glass-ceramics. J. Therm Anal Calorim. 2004, vol. 78, iss. 3, pp. 699–705. doi: 10.1007/s10973-005-0435-0

18. Chang Z.D., Ma Z. Effect of Anisotropic Conductive Properties on Heat Transfer and Temperature Distribution

of Coatings and Substrates. Key Engineering Materials 2012, vol. 512–515. pp. 1045–1050. doi: 10.4028/www.scientific.net/kem.512-515.1045

19. James B. W., Harrison P. Analysis of the temperature distribution, heat flow and effective thermal conductivity of homogeneous composite materials with anisotropic thermal conductivity. J. of Physics D Applied Physics. 1992, vol. 25, iss. 9, pp. 1298–1303. doi: 10.1088/0022-3727/25/9/003

20. Kang S., Choi J. Y., Choi S. Mechanism of Heat Transfer through Porous Media of Inorganic Intumescent Coating in Cone Calorimeter Testing. Polymers. 2019, vol. 11, iss. 2, pp. 221. doi: 10.3390/polym11020221

Information about the authors

Igor A. Vrublevsky, Cand. Sci. (Eng.) (2001), Associate Professor, Head of the Laboratory of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR). The author of more than 100 scientific publications. Area of expertise: electrochemistry; surface physics; anodizing aluminum; crystalline films; carbon-containing anode films; optical properties; sensors; nanodiagnostics.

Address: Belarusian State University Informatics and Radio Electronics, 6 P. Brovki St., Minsk 220013, Republic of Belarus

E-mail: vrublevsky@bsuir.edu.by

<http://orcid.org/0000-0002-6796-8994>

Katsiaryna V. Chernyakova, Cand. Sci. (Phys.-Math.) (2013), Associate Professor at the State Scientific Institute of the Center for Physical Sciences and Technologies, Research Fellow. The author of 66 scientific publications. Area of expertise: electrochemistry, surface physics; aluminum anodizing; porous films; carbon-containing anode films; temperature-controlled coatings; optical properties.

Address: State Scientific Institute Center for Physical Sciences and Technologies, 231 Savanoru Ave., Vilnius LT-02300, Lithuania

E-mail: katerinach_85@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6616-4353>

Ekaterina N. Muratova, Cand. Sci. (Eng.) (2015), Assistant Professor of the Department of Micro and Nanoelectronics of the Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 39 scientific publications. Area of expertise: electrochemical anodization; porous nanomaterials; membranes; nanoparticles; optical properties; nanodiagnostics; ion-beam nanotechnologies.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professors Popov St., St Petersburg 197376, Russia

E-mail: Sokolovaeknik@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4181-6669>

Nikita V. Lushpa, Master's Degree in Engineering and Technology in "Nanotechnology and Nanomaterials (in Electronics)" (2019), Junior Researcher of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. The author of 9 scientific publications. Area of expertise: digital image processing of nano-objects; thermal measurements; anodizing of aluminum; porous films.

Address: Belarusian State University Informatics and Radio Electronics, 6 P. Brovki St., Minsk 220013, Republic of Belarus

E-mail: lushpa@bsuir.by

<https://orcid.org/0000-0002-8224-1697>