

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ

MATHEMATICAL MODELING IN MATERIALS SCIENCE OF ELECTRONIC COMPONENTS

Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2019. Т. 22, № 4. С. 241—245.

DOI: 10.17073/1609-3577-2019-4-241-245

УДК 621.365

Исследование тепловых характеристик нагревательного элемента из алюминия с нанопористым оксидом алюминия*

© 2019 г. Е. Н. Муратова^{1,§}, В. А. Мошников¹, К. В. Чернякова², И. А. Врублевский²

¹ Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина),
ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия

² Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки, д. 19, Минск, 220072, Беларусь

Аннотация. Одной из актуальных задач в сфере стационарного отопления, на решение которой направлены усилия многочисленных разработчиков, является экономия электрической энергии. Нагревательные системы могут иметь самые разнообразные конструкции, но существуют основные требования к их разработке, а именно: обеспечение высокой надежности при эксплуатации, экономичность, устойчивость к внешним воздействиям и стабильность электрических характеристик. Основным элементом любого нагревательного устройства — нагреватель. В настоящее время плоские резистивные нагреватели нашли широкий спектр применения в нагревательных устройствах, предназначенных для формирования здорового микроклимата в помещениях, поддержания заданных параметров в различных технологических процессах, в системах антиобледенения, в сельском хозяйстве и в промышленности. Исследованы тепловые характеристики плоских нагревателей, изготовленных из алюминия, с ленточным элементом нагрева в виде углеродного волокна. С целью обеспечения необходимой изоляции нагревательного элемента от металлического основания на поверхности алюминия формировали слой пористого анодного оксида алюминия толщиной 20 мкм. Концы нити из углеродного волокна металлизировали слоем меди для последующей пайки в процессе сборки электрического нагревателя. Электрическое сопротивление нагревателя с нитью из углеродного волокна составляло 60 Ом. Исследования распространения тепловых потоков в объеме платы из алюминия с нанопористым оксидом алюминия проводили с использованием тепловизионных измерений. Представлена зависимость изменения температуры на поверхности крышки нагревательного элемента из алюминия и на противоположной теплоотдающей стороне от времени нагрева. Полученные результаты показали, что тепло, генерируемое линейным нагревательным элементом из углеродной нити, быстро перераспределяется по всему объему алюминиевой пластины с нагревательным элементом. Это свидетельствует о высокой теплопроводности алюминиевой основы нагревателя, параметры которой позволяют обеспечить достижение требуемых тепловых характеристик нагревателя.

Ключевые слова: нагревательный элемент, алюминий, пористый анодный оксид алюминия, углеродное волокно, термограмма, тепловизионные исследования

Введение

Количество электронагревателей и их конструкций, применяемых в различных приборах промышленного и бытового назначения, с каждым годом увеличивается. Наиболее часто в конструкциях высокоэкономичных тепловых приборов используется плоский электрический тепловой элемент. Это объясняется более высокой эффективностью передачи тепла методом контактной теплопередачи по сравнению с другими типами нагрева.

Муратова Екатерина Николаевна^{1,§} — канд. техн. наук, научный сотрудник, e-mail: SokolovaEkNik@yandex.ru; **Мошников Вячеслав Алексеевич**¹ — доктор физ.-мат. наук, профессор, кафедра Микро- и наноэлектроники; **Чернякова Катерина Викторовна**² — канд. физ.-мат. наук, доцент, ведущий научный сотрудник; **Врублевский Игорь Альфонсович**² — канд. техн. наук, доцент, заведующий лабораторией

§ Автор для переписки

* Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на I-й международной конференции «Математическое моделирование в материаловедении электронных компонентов», Москва, 21—23 октября 2019 г.

Как известно, одной из актуальных задач в сфере стационарного отопления, на решение которой направлены усилия многочисленных разработчиков, является экономия электрической энергии. Нагревательные системы могут иметь самые разнообразные конструкции, но основными требованиями, предъявляемыми к их разработке, является обеспечение высокой надежности при эксплуатации, экономичность, устойчивость к внешним воздействиям и стабильность электрических характеристик. Основным элементом любого нагревательного устройства является нагреватель. В настоящее время плоские резистивные нагреватели нашли широкий спектр применения в нагревательных устройствах, предназначенных для формирования здорового микроклимата в помещениях, поддержания заданных параметров в различных технологических процессах, в системах антиобледенения, в сельском хозяйстве и в промышленности.

Применение в конструкции нагревателя металлической основы с тонким диэлектрическим слоем создает необходимые условия для быстрой и равномерной передачи тепла к теплопринимающему элементу [1, 2]. Такой подход позволяет создавать элементы быстрого нагрева с равномерным распределением температуры на рабочей поверхности и с высоким коэффициентом полезного действия за счет снижения потерь тепла [3—8].

Цель работы — исследование равномерности нагрева и тепловых характеристик плоских нагревателей, изготовленных на алюминиевых пластинах с ленточным углеродным элементом нагрева.

Экспериментальная часть

Плоский нагревательный элемент (НЭл) из алюминия имел размеры 60×24 мм (рис. 1). Толщина основания и крышки из анодированного алюминия составляла 0,5 и 0,3 мм, соответственно. На образцах анодированного алюминия слой пористого анодного оксида алюминия (ПАОА), сформированный методом электрохимического анодирования алюминия [9—17], имел толщину 20 мкм. ПАОА представляют собой высокоупорядоченные структуры с параллельными вертикальными капиллярами — пора́ми [18—22]. Такая толщина ПАОА обеспечивала необходимую изоляцию НЭл от металлического основания. В конструкции нагревателя в качестве НЭл использовалась углеродная электропроводящая нить на основе вязкой технической нити. Резистивный элемент в виде нити из углеродного волокна металлизировался слоем меди (толщина 30 мкм, гальваническое осаждение) для последующей пайки в процессе сборки электрического нагревателя. Фиксацию углеродной нити на поверхности

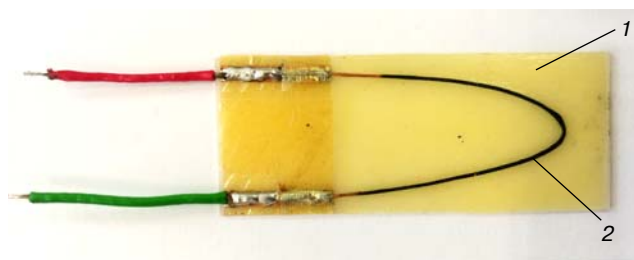


Рис. 1. Верхняя поверхность нагревательного элемента с нанопористым оксидом алюминия (1) и линейным нагревательным элементом из углеродной нити (2)

Fig. 1. The upper surface of the heating element with nanoporous aluminum oxide (1) and a linear heating element made of carbon filament (2)

анодного оксида алюминия и затем ее герметизацию осуществляли с помощью эпоксидного компаунда.

Электрический нагреватель с нитью из углеродного волокна имел электрическое сопротивление 60 Ом. Измерение сопротивления диэлектрической изоляции проводилось с помощью мегаомметра Ф4101. Для получения термограмм поверхности плоского нагревателя использовали тепловизионную камеру MobIR M4.

Результаты и их обсуждение

Важной характеристикой для НЭл является способность обеспечения равномерного нагрева по всей площади нагревателя. В работе проведены детальные исследования тепловых параметров нагревателя при электрической мощности 6 Вт.

На рис. 2 и 3 показаны термограммы поверхности НЭл со стороны крышки и со стороны теплопередающего основания через 10 и 60 с нагрева, соответственно.

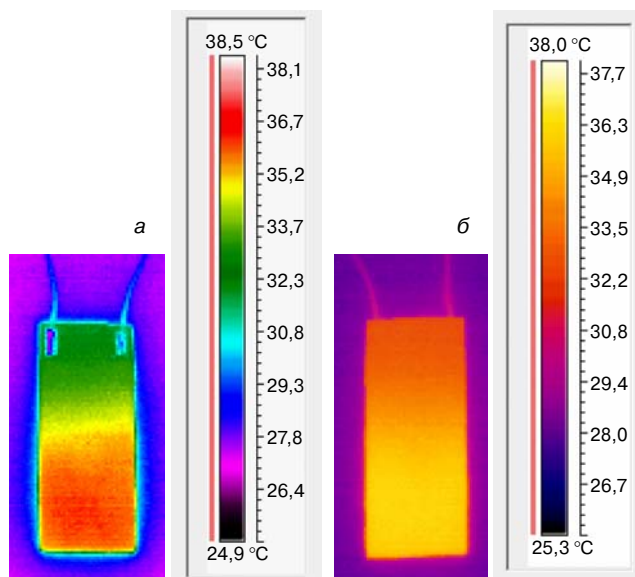


Рис. 2. Термограммы поверхности нагревательного элемента со стороны крышки (а) и с противоположной стороны — теплопередающего основания (б) через 10 с нагрева

Fig. 2. Thermograms of the surface of the heating element from the side of the cover (a) and from the opposite side of the heat transfer base (b) after 10 s of heating

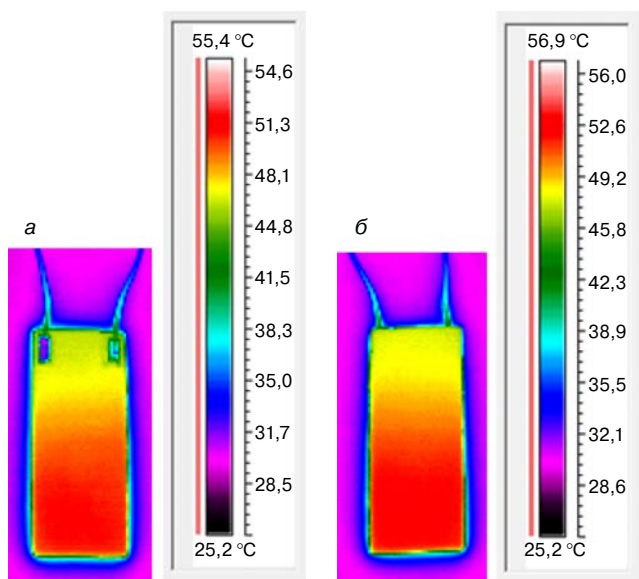


Рис. 3. Термограммы поверхности нагревательного элемента со стороны крышки (а) и с противоположной стороны — теплопередающего основания (б) через 60 с нагрева

Fig. 3. Thermograms of the surface of the heating element from the side of the cover (a) and from the opposite side of the heat transfer base (b) after 60 s of heating

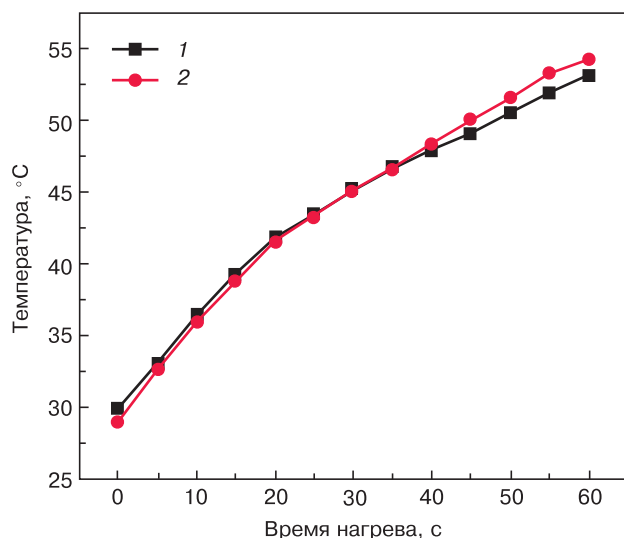


Рис. 4. Изменения температуры на поверхности крышки нагревательного элемента из алюминия (1) и на теплоотдающей стороне (2) от времени нагрева

Fig. 4. Changes in temperature on the surface of the aluminum heating element cover (1) and on the heat-emitting side (2) from heating time

Результаты тепловизионных исследований показали, что на начальных этапах нагрева температура на поверхности алюминия со стороны крышки имеет незначительный разброс. Из-за отвода тепла через контакты и соединительные провода значение средней температуры в рабочей зоне 38 °C снижалось до 33 °C в зоне контактов. Спустя 50 с после начала нагрева температура в контрольных областях достигала следующих значений: средняя температура в рабочей зоне — 52,3 °C и в зоне контактов — 47,5 °C. Температура алюминия

со стороны теплопередающего основания спустя первые 10 с после нагрева в рабочей зоне была равна 38 °C и 32,2 °C в зоне расположения контактов. Через минуту нагрева температура в рабочей зоне была равна 56,5 °C и 52,0 °C в зоне расположения контактов. Таким образом, плоский НЭЛ при приложении электрической мощности 6 Вт за 60 с нагрева в условиях отсутствия отвода тепла выходил на температуру 56 °C на теплоотдающей поверхности.

Зависимости изменения температуры на поверхности крышки НЭЛ и на теплоотдающей стороне от времени нагрева показаны на рис. 4.

Результаты исследований показали, что температура на поверхности нагревателя как со стороны крышки, так и на ее обратной стороне имели близкие значения на всех стадиях нагрева. Это свидетельствует о высокой теплопроводности алюминиевой основы нагревателя, благодаря чему даже в случае ленточного углеродного элемента с малой площадью контакта обеспечивается равномерный профиль распределения температуры с двух сторон нагревателя.

Заклучение

Проведенные исследования и испытания показали, что высокая теплопроводность алюминия позволила теплу, генерируемому ленточным элементом нагрева на относительно малом локальном участке поверхности, быстро перераспределиться по всему объему алюминиевой пластины нагревательного элемента и обеспечить достижение требуемых тепловых характеристик нагревателя.

Следовательно, использование линейного НЭЛ из углеродной нити является эффективным способом нагрева алюминиевых НЭЛ, позволяющим получить высокие скорости нагрева и равномерный профиль распределения температуры на поверхности нагревательных элементов из алюминия на всех этапах нагрева.

Библиографический список

1. Динь Х. Т., Лушпа Н. В., Чернякова Е. В., Врублевский И. А. Исследование распространения тепла в плате из алюминия с нанопористым анодным оксидом алюминия тепловизионным методом // Доклады БГУИР. 2019. № 1. С. 45—50.
2. Симин А., Холодняк Д., Вендик И. Многослойные интегральные схемы сверхвысоких частот на основе керамики с низкой температурой обжига // Компон. и технol. 2005. № 5. С. 190—196.
3. Муратова Е. Н., Мошников В. А., Лучинин В. В., Бобков А. А., Врублевский И. А., Чернякова К. В., Теруков Е. И. Теплопроводящие платы на основе алюминия с наноструктурированным слоем Al_2O_3 для изделий силовой электроники // Ж. технич. физ. 2018. Т. 88, Вып. 11. С. 1678—1680. DOI: 10.21883/JTF.2018.11.46629.2480
4. Муратова Е. Н., Врублевский И. А., Чернякова Е. В. и др. // Материалы XIV Международной конференции «Физика диэлектриков» (Диэлектрики-2017). СПб.: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2017. С. 136.
5. 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 International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). Sofia (Bulgaria): IEEE, 2017. P. 1—6. DOI: 10.1109/ISSE.2017.8000899

6. Чернякова Е., Врублевский И., Видеков В., Тучковский А. Применение наноструктурированного анодного оксида алюминия при изготовлении теплонагруженных плат для силовых модулей // Научни известия на НТСМ. 2016. Т. XXV, № 12. С. 257—263.

7. Врублевский И., Чернякова Е., Видеков В., Тучковский А. Сравнительный анализ работы плоского нагревательного элемента на основании из анодированного алюминия // Научни известия на НТСМ. 2015. Т. XXIII, № 9. С. 422—428.

8. Vrublevsky I., Chernyakova K., Videkov V., Tuchkovsky 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. N 1. P. 1—2. URL: <https://libelidoc.bsuir.by/handle/123456789/10898>

9. Vorozhtsova M., Drbohlavova Ja., Hubalek Ja. Chemical Microsensors with Ordered Nanostructures // In: Microsensors. Ed. by I. Minin. IntechOpen, 2011. DOI: 10.5772/18066

10. Ersching K., Dorico E., da Silva R. C., Zoldan V. C., Ioppo E. A., Viegas A. D. C., Pasa A. A. Surface and interface characterization of nanoporous alumina templates produced in oxalic acid and submitted to etching procedures // Mater. Chem. and Phys. 2012. V. 137, Iss. 1. P. 140—146. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2012.08.058

11. Муратова Е. Н. Искусственно и естественно упорядоченные микро- и наноразмерные капиллярные мембраны на основе анодного оксида алюминия: дисс. ... канд. техн. наук. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. 118 с. URL: <https://etu.ru/assets/files/nauka/dissertacii/2014/Dissertaciya-Muratovoj-EN.pdf>

12. Eftekhari A. Nanostructured Materials in Electrochemistry. Weinheim (Germany): Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008. 489 p.

13. Александрова О. А., Алексеев П. А., Кононова И. Е., Максимов А. И., Мараева Е. В., Мошников В. А., Муратова Е. Н., Налимова С. С., Пермяков Н. В., Спивак Ю. М., Титков А. Н. Диагностика материалов методами сканирующей зондовой микроскопии: учеб. пособие / Под ред. проф. В. А. Мошникова. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. 172 с.

14. Muratova E. N., Matyushkin L. B., Moshnikov V. A., Chernyakova K. V., Vrublevsky I. A. Thermal radiation shielding by nanoporous membranes based on anodic alumina // J. Phys.: Conf. Series. 2017. V. 872, N 1. P. 012020. DOI: 10.1088/1742-6596/872/1/012020

15. Врублевский И. А., Дик С. К., Терех А. С., Смирнов А. В., Чернякова К. В. Структура пленок пористого оксида алюминия, формируемых в электролитах на основе органических кислот // Пробл. физ., матем. и техн. 2012. № 3. С. 101—105.

16. Пат. полезн. модель 122385 (РФ). Электрохимическая ячейка для получения пористых анодных оксидов металлов и полупроводников / П. Г. Травкин, Е. Н. Соколова, Ю. М. Спивак, В. А. Мошников, 2012.

17. Муратова Е. Н., Спивак Ю. М., Мошников В. А. Пористые структуры на основе оксидов алюминия для солнечной энергетики и антиотражательных покрытий // В кн.: Наноструктурные оксидные материалы в современной микро-, нано- и оптоэлектронике: монография / Под ред. В. А. Мошникова, О. А. Александровой. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. С. 32—62.

18. Муратова Е. Н., Спивак Ю. М., Мошников В. А., Петров Д. В., Шемухин А. А., Шиманова В. В. Влияние технологических параметров получения слоев нанопористого Al_2O_3 на их структурные характеристики // Физ. и хим. стекла. 2013. Т. 39. С. 473—480.

19. Yanagishita T., Kato A., Masuda H. Preparation of ideally ordered through-hole anodic porous alumina membranes by two-layer anodization // Jpn. J. Appl. Phys. 2017. V. 56, N 3. P. 035202. DOI: 10.7567/JJAP.56.035202

20. Chen C.-K., Chen S.-H. Multi-electrolyte-step anodic aluminum oxide method for the fabrication of self-organized nanochannel arrays // Nanoscale Res. Lett. 2012. V. 7. Art. No. 122. DOI: 10.1186/1556-276X-7-122

21. Александрова О. А., Алешин А. Н., Белорус А. О., Бобков А. А., Гузь А. В., Кальнин А. А., Кононова И. Е., Левицкий В. С., Мазинг Д. С., Мараева Е. В., Матюшкин Л. Б., Москвин П. П., Мошников В. А., Муратова Е. Н., Налимова С. С., Пономарева А. А., Пронин И. А., Спивак Ю. М. Новые наноматериалы. Синтез. Диагностика. Моделирование: лаб. практикум. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. 248 с.

22. Афанасьев А. В., Ильин В. А., Мошников В. А., Соколова Е. Н., Спивак Ю. М. Синтез нано- и микропористых структур электрохимическими методами // Биотехносфера. 2011. № 1—2. С. 39—45.

23. Врублевский И. А., Чернякова К. В., Горбачев Д. В., Муратова Е. Н., Мошников В. А. Тепловые и электрические характеристики плоских нагревателей из алюминия с нанопористым анодным оксидом алюминия и резистивным элементом из углеродной нити // Сб. материалов 28-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Москва: КНТЦ им. Попова, 2018. С. 1013—1016.

Статья поступила в редакцию 26 декабря 2019 г.

Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = *Materials of Electronics Engineering*. 2019, vol. 22, no. 4, pp. 241—245. DOI: 10.17073/1609-3577-2019-4-241-245

Investigation of the thermal characteristics of a heating element based on aluminum with nanoporous alumina

E. N. Muratova^{1,§}, V. A. Moshnikov¹, K. V. Chernyakova², I. A. Vrublevsky²

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”,
5 Prof. Popova Str., St. Petersburg 197376 Russia

² Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
6 P. Brovka Str., Minsk 220013, Belarus

Abstract. In this work, we studied the thermal characteristics of flat heaters made of aluminum with a strip heating element in the form of carbon fiber. In order to provide the necessary insulation of the heating element from the metal base, a layer of porous anodic aluminum oxide with a thickness of 20 μm was formed on the aluminum surface. The ends of the carbon fiber filament were metallized with a layer of copper for subsequent soldering during the assembly of the electric

Information about authors:

Ekaterina N. Muratova^{1,§}: Cand. Sci. (Eng.), Researcher (SokolovaEkNik@yandex.ru); **Vyacheslav A. Moshnikov**¹: Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Department of Micro- and Nanoelectronics; **Katsiaryna V. Chernyakova**²: Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Leading Researcher; **Igor A. Vrublevsky**²: Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Laboratory.

§ Corresponding author

heater. The carbon fiber filament of electric heater had an electrical resistance of 60 Ohms. Studies of the propagation of heat fluxes in the volume of a board made of aluminum with nanoporous aluminum oxide were carried out using thermal imaging measurements. The paper presents the dependence of temperature changes on the surface of the lid of a heating element made of aluminum and on the opposite side — heat transfer side with heating time. The results showed that the heat generated by a linear heating element of carbon fiber, quickly distributed throughout the entire volume of the aluminum plate of the heating element. This indicates a high thermal conductivity of the aluminum base of the heater, the parameters of which allow to achieve the required thermal characteristics of the heater.

Keywords: heating element, aluminum, porous anodic alumina, carbon fiber, thermogram, thermographic studies

References

1. 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. *Doklady BGUIR*, 2019, no. 1, pp. 45—50. (In Russ.)
2. Simin A., Holodnyak D., Vendik I. Multilayer integrated circuits of ultrahigh frequencies based on ceramics with a low firing temperature. *Komponenty i tekhnologii = Components and technologies*, 2005, no. 5, pp. 190—196. (In Russ.)
3. Muratova E. N., Moshnikov V. A., Luchin V. V., Bobkov A. A., Vrublevsky I. A., Chernyakova K. V., Terukov E. I. Thermal-conductive boards based on aluminum with an Al_2O_3 nanostructured layer for products of power electronics. *Tech. Phys.*, 2018, vol. 63, pp. 1626—1628. DOI: 10.1134/S1063784218110191
4. Muratova E. N., Vrublevsky I. A., Chernyakova E. V. et al. *Materialy XIV Mezhdunarodnoi konferentsii "Fizika dielektrikov" (Dielektriki-2017) = Materials of the XIV International Conference "Physics of Dielectrics" (Dielectrics-2017)*. St. Petersburg: Izd-vo RGPU im. A. I. Gertsena, 2017, p. 136. (In Russ.)
5. 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 International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*. Sofia (Bulgaria): IEEE, 2017, pp. 1—6. DOI: 10.1109/ISSE.2017.8000899
6. Chernyakova E., Vrublevsky I., Videkov V., Tuchkovsky A. Application of nanostructured anodic aluminum oxide in the manufacture of heat-loaded boards for power modules. *Scientific Proceedings of STUME*, 2016, vol. XXV, no. 12, pp. 257—263. (In Russ.)
7. Vrublevsky I., Chernyakova E., Videkov V., Tuchkovsky A. Comparative analysis of the operation of a flat heating element based on anodized aluminum. *Scientific Proceedings of STUME*, 2015, vol. XXIII, no. 9, pp. 422—428. (In Russ.)
8. Vrublevsky I., Chernyakova K., Videkov V., Tuchkovsky 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. URL: <https://libeldoc.bsuir.by/handle/123456789/10898>
9. Vorozhtsova M., Drbohlavova Ja., Hubalek Ja. Chemical Microsensors with Ordered Nanostructures. In: *Microsensors*. Ed. by I. Minin. IntechOpen, 2011. DOI: 10.5772/18066
10. Ersching K., Dorico E., da Silva R. C., Zoldan V. C., Isoppo E. A., Viegas A. D. C., Pasa A. A. Surface and interface characterization of nanoporous alumina templates produced in oxalic acid and submitted to etching procedures. *Mater. Chem. and Phys.*, 2012, vol. 137, no. 1, pp. 140—146. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2012.08.058
11. Muratova E. N. Artificially and naturally ordered micro- and nanosized capillary membranes based on anodic aluminum oxide: Dis. Cand. Sci. (Eng). St. Petersburg: Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", 2014, 118 p. (In Russ.). URL: <https://etu.ru/assets/files/nauka/dissertacii/2014/Dissertaciya-Muratovoj-EN.pdf>
12. Eftekhari A. *Nanostructured Materials in Electrochemistry*. Weinheim (Germany): Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008, 489 p.
13. Aleksandrova O. A., Alekseev P. A., Kononova I. E., Maksimov A. I., Maraeva E. V., Moshnikov V. A., Muratova E. N., Nalimova S. S., Permyakov N. V., Spivak Yu. M., Titkov A. N. *Diagnostika materialov metodami skaniruyushchei zondovoi mikroskopii* [Diagnostics of materials by scanning probe microscopy]. Ed. by Prof. V. A. Moshnikov. St. Petersburg: Izd-vo SPbGETU "LETI", 2012, 172 p. (In Russ.)
14. Muratova E. N., Matyushkin L. B., Moshnikov V. A., Chernyakova K. V., Vrublevsky I. A. Thermal radiation shielding by nanoporous membranes based on anodic alumina. *J. Phys.: Conf. Series*, 2017, vol. 872, no. 1, p. 012020. DOI: 10.1088/1742-6596/872/1/012020
15. Vrublevsky I. A., Dick S. K., Tereh A. S., Smirnov A. V., Chernyakova K. V. Structure of the porous aluminium oxide films formed in the solutions of organic acids. *PFMT*, 2012, no. 3, pp. 101—105. (In Russ.)
16. Patent 122385 (RF). *Elektrokhimicheskaya yacheika dlya polucheniya poristyykh anodnykh oksidov metallov i poluprovodnikov* [An electrochemical cell for the production of porous anodic metal and semiconductor oxides]. P. G. Travkin, E. N. Sokolova, Yu. M. Spivak, V. A. Moshnikov, 2012. (In Russ.)
17. Muratova E. N., Spivak Yu. M., Moshnikov V. A. *Poristye struktury na osnove oksidov alyuminiya dlya solnechnoi energetiki i antiotrazhatel'nykh pokrytii* [Porous structures based on aluminum oxides for solar energy and antireflection coatings]. In: *Nanostructured oxide materials in modern micro-, nano- and optoelectronics*. Ed. by V. A. Moshnikov, O. A. Alexandrova. St. Petersburg: Izd-vo SPbGETU "LETI", 2017, pp. 32—62. (In Russ.)
18. Muratova E. N., Spivak Yu. M., Moshnikov V. A., Shimanova V. V., Petrov D. V., Shemukhin A. A. Influence of technological parameters of nanoporous Al_2O_3 layers preparation on their structural characteristics. *Glass Physics and Chemistry*, 2013, vol. 39, no. 3, pp. 320—328. DOI: 10.1134/S1087659613030140
19. Yanagishita T., Kato A., Masuda H. Preparation of ideally ordered through-hole anodic porous alumina membranes by two-layer anodization. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2017, vol. 56, no. 3, p. 035202. DOI: 10.7567/JJAP.56.035202
20. Chen C.-K., Chen S.-H. Multi-electrolyte-step anodic aluminum oxide method for the fabrication of self-organized nanochannel arrays. *Nanoscale Res. Lett.*, 2012, vol. 7, art. no. 122. DOI: 10.1186/1556-276X-7-122
21. Aleksandrova O. A., Aleshin A. N., Belorus A. O., Bobkov A. A., Guz' A. V., Kal'nin A. A., Kononova I. E., Levitsky V. S., Mazing D. S., Maraeva E. V., Matyushkin L. B., Moskvina P. P., Moshnikov V. A., Muratova E. N., Nalimova S. S., Ponomareva A. A., Pronin I. A., Spivak Yu. M. *Novye nanomaterialy. Sintez. Diagnostika. Modelirovanie* [New nanomaterials. Synthesis. Diagnostics. Modeling]. St. Petersburg: Izd-vo SPbGETU "LETI", 2015, 248 p. (In Russ.)
22. Afanasyev A. V., Ilin V. A., Moshnikov V. A., Sokolova Ye. N., Spivak Yu. M. Synthesis of nano- and microporous structures by electrochemical methods. *Biotechnosphere*, 2011, no. 1-2, pp. 39—45. (In Russ.)
23. Vrublevsky I. A., Chernyakova K. V., Gorbachev D. V., Muratova E. N., Moshnikov V. A. Thermal and electrical characteristics of flat heaters made of aluminum with nanoporous anodic aluminum oxide and a resistive element made of carbon filament. *Sb. materialov 28-i Mezhdunarodnoi Krymskoi konferentsii "SVCh-tehnika i telekommunikatsionnye tekhnologii" = Proceedings of 28th International Crimean Conference "Microwave Engineering and Telecommunication Technologies"*. Moscow: KNTTs im. Popova, 2018, pp. 1013—1016. (In Russ.)

Received December 26, 2019