

active centers. These differences are important in understanding interactions taking place at a bio-nanointerface.

Acknowledgements: this work was supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research, B15MS-001, and by a Marie Curie International Research Staff Exchange Scheme Fellowship within the 7th European Community Framework Programme, project No. PIRSES-GA-2012-316730 NANOGENE, co-financed by the Polish Ministry of Science and Higher Education.

### **ТЕПЛОВАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЛОСКИХ НАГРЕВАТЕЛЕЙ НА АЛЮМИНИИ С НАНОПОРИСТЫМ ОКСИДОМ АЛЮМИНИЯ И УГЛЕРОДНОЙ НИТЬЮ В КАЧЕСТВЕ НАГРЕВАТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА**

И. А. Врублевский, Е. В. Чернякова, А. К. Тучковский, Д. В. Горбачев

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
Минск, Беларусь, email: vrublevsky@bsuir.edu.by*

С каждым годом в устройствах промышленного и бытового назначения находят применение все большее количество электронагревателей. Одним из массовых видов электрического теплового элемента является плоский электронагреватель, который используется в качестве основного конструктивного элемента при создании экономических тепловых приборов [1–3]. Это объясняется тем, что метод контактной теплопередачи имеет более высокую эффективность передачи тепла от нагретого тела к холодному в сравнении с нагревом излучением и другими видами теплопередачи [4].

Применение в конструкции нагревателя металлической основы с тонким диэлектрическим слоем создает условия для быстрой и равномерной передачи тепла к теплоприемнику. Быстрая передача тепла от резистивного элемента на металлическую пластину приводит к низкой инерционности конструкции и возможности выхода нагревателя в рабочий режим с наименьшими потерями тепла. Вот почему важной задачей является исследование и разработка элементов быстрого нагрева с равномерным распределением температуры по рабочей поверхности и высоким коэффициентом полезного действия за счет снижения потерь тепла.

Цель настоящей работы состояла в исследовании тепловых характеристик плоских нагревателей, изготовленных на алюминиевых пластинах со слоем нанопористого оксида алюминия и углеродной нити в качестве нагревательного элемента.

Плоский нагревательный элемент имел размеры 60×24 мм. Толщина основания из анодированного алюминия составляла 0,5 мм. Формирование пленки пористого оксида алюминия использовалось для улучшения адгезии армированного клеящего слоя – препрега к алюминию – и получения диэлектрического

слоя с хорошими изоляционными свойствами на поверхности алюминия. Анодирование алюминия проводили в 0,3 М водном растворе щавелевой кислоты с постоянной плотностью тока  $6 \text{ А}\cdot\text{см}^{-2}$  в течение 40 мин до достижения пленкой анодного оксида алюминия толщины 30 мкм. Оценку морфологии и размера пор в полученных пленках проводили методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на электронном микроскопе DSM 982 (Zeiss) с последующим статистическим анализом изображений с помощью программы ImageJ. Результаты исследований показали, что пленки анодного оксида алюминия имели регулярно-упорядоченную нанопористую структуру с размерами пор 38,6 нм.

В конструкции нагревателя на основе алюминия с нанопористым оксидом алюминия углеродная нить использовалась в качестве нагревательного элемента. Армированный слой препрега до термообработки имел толщину около 80 мкм. Для изготовления нагревательных элементов использовали нить из углеродного волокна с размерами 80 мкм (толщина)×4 мм (ширина)×170 (длина). Концы нити из углеродного волокна металлизировались слоем меди (толщина 30 мкм, гальваническое осаждение) для последующей пайки в процессе сборки электрического нагревателя.

Электрический нагреватель с нитью из углеродного волокна имел электрическое сопротивление 60 Ом и мощность 15 Вт (рабочее напряжение 30 В). Измерение сопротивления диэлектрической изоляции проводилось с помощью мегаомметра Ф4101. Для исследования теплового поля образцов использовали неохлаждаемый тепловизор (FLIR T640).

Для оценки эффективности плоского нагревателя, изготовленного на алюминиевой пластине со слоем нанопористого оксида алюминия, проводилось сравнение характера роста температуры в процессе нагрева на поверхности с нагревательным элементом для данного типа нагревателя и для традиционного нагревателя на ситалловой подложке с резистивной пленкой нихрома.



*а*



*б*

Распределение температур на тепловыделяющей поверхности плоского нагревателя, изготовленного (*а*) на ситалле и (*б*) на алюминии с нанопористым оксидом алюминия в течение 50 с

При включенном электропитании нагревателя электроэнергия преобразуется в тепловую энергию и начинаются процессы теплообмена, т. е. переноса тепла от нагреваемой поверхности к теплоотдающей поверхности. После подачи напряжения питания 30 В на исследуемые нагреватели через 10 с и 50 с фиксировали картину теплового поля на поверхности с резистивным элементом с помощью тепловизора. На рисунке показаны картины распределения температур для нагревателей, изготовленных на ситалле и на основании из анодированного алюминия.

Эксперименты показали, что распределение температур по поверхности нагревателя на основании из анодированного алюминия после нагрева в течение 10 и 50 с характеризовалось очень высокой равномерностью. В противоположность этому нагреватель на подложке из ситалла с резистором прямоугольной формы имел в центре зону с повышенной температурой.

Следует также отметить, что максимальное значение температуры для нагревателя на подложке из ситалла было на 33,7 °С выше (50 с), чем для нагревателя на основании из анодированного алюминия. Полученные результаты объясняются тем, что теплопроводность анодированного алюминия 210 Вт/(м К) значительно выше, чем теплопроводность ситалла 2,5 Вт/(м К).

Результаты исследований показывают, что применение алюминия с нанопористым оксидом алюминия для электрических нагревателей позволяет снизить потребляемую электрическую мощность и повысить надежность работы за счет более низкой температуры резистивного элемента. Следует отметить также такие достоинства электрических нагревателей из алюминия с нанопористым оксидом алюминия, как высокая механическая прочность, плоская поверхность и минимальная толщина, быстрый и равномерный нагрев, устойчивость к вибрации и экологическая чистота материалов.

1. Ito Y., Sato M., Wakisaka K. [et al.] // *Electrical Engineering in Japan*. 2009. 168. 11–19.
2. Datta M., Whaley R. D., Dagenais M. // *Advanced Packaging*, IEEE Transactions. 2002. 25. 495–502.
3. Resnik D., Vrtacnik D., Aljancic U. [et al.] // *Industrial Electronics*. 2009. 4014–4019.
4. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомол А. С. *Теплопередача*. М.: Энергия, 1975. 486 с.