

УДК 536.2.02

## 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

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь*

*Поступила в редакцию 20 сентября 2018*

**Аннотация.** В работе представлены результаты исследований тепловых потоков в плате из алюминия с нанопористым оксидом алюминия, генерируемых линейным источником теплоты. Показано, что распространение тепла в направлении, перпендикулярном длине источника, имеет форму конуса тепловой трубы с началом от источника нагрева на поверхности и характеризуется расширением по направлению к нижней стороне платы из алюминия. Такая форма распространения тепла позволяет снизить тепловое сопротивление платы.

*Ключевые слова:* печатная плата из алюминия, нанопористый оксид алюминия, тепловой поток, конус тепловой трубки, углеродная нить, линейный источник теплоты.

**Abstract.** The paper presents the results of studies of heat fluxes in a printed circuit board made of aluminum with nanoporous anodic alumina, generated by linear heat source. It is established that in this case the shape of the cone of the heat pipe with the beginning from a point heating source on the surface was characterized by expansion towards the back side of the aluminum base. This effect leads to a decrease in the thermal resistance of the printed circuit board.

*Keywords:* aluminum printed circuit board, nanoporous alumina, heat flow, cone of the heat pipe, carbon filament, linear source of heat.

**Doklady BGUIR. 2019, Vol. 119, No. 1, pp. 45-50**  
**Study of distribution of thermal fluxes in a plate of aluminum**  
**with nanoporous aluminum oxide by means of thermal imaging measurements**  
**H.T. Dinh, N.V. Lushpa, K.V. Chernyakova, I.A. Vrublevsky**

### Введение

На сегодняшний день наиболее экономичными источниками света в системах освещения являются светодиоды. Как известно, одной из важнейших задач в светодиодной технике является обеспечение оптимальных условий для отвода тепла от  $p-n$  перехода светодиода. Высокие рабочие температуры  $p-n$  переходов значительно ухудшают характеристики светодиодов, снижая их световой поток и уменьшая срок службы. При работе светодиодов в свет преобразуется не более 25 % потребляемой энергии, а остальная часть энергии при этом уходит на тепловые потери. Для обеспечения высокого квантового выхода в светодиодной технике необходимо использовать эффективные решения для отвода тепла от светодиодов. Одним из таких решений является использование алюминиевых плат с высокой теплопроводностью [1–3]. Для эффективного управления тепловыми режимами работы светодиодов необходимы знания тепловых свойств алюминиевых печатных плат [4, 5]. Эффективность отвода тепла зависит от теплового сопротивления всей многослойной конструкции металлической платы. Чем ниже тепловое сопротивление теплоотводящих слоев, тем лучше теплоотвод. Однако в реальных условиях распределение тепловых потоков внутри устройства не является равномерным.

Это связано с наличием горячих точек на плате, для которых характерно повышенное тепловыделение. Если источником тепла является полупроводниковый кристалл, то передача тепла от него в окружающую среду для конструкции платы из традиционных теплопроводящих диэлектрических материалов осуществляется по конусообразному каналу с сужением по мере удаления от начала источника нагрева.

Конструкция алюминиевой платы содержит тонкий диэлектрический слой нанопористого оксида алюминия с плохой теплопроводностью и толстое алюминиевое основание с высокой теплопроводностью. Поэтому для оптимального применения алюминиевых плат в светодиодной технике необходимо знать реальную форму тепловых потоков в объеме платы, которые генерируются активными полупроводниковыми кристаллами на ее поверхности. Одним из методов, используемых для регистрации поверхностной температуры и тепловых потоков в конструкции печатных плат, являются оптические методы и, в частности, тепловизионные методы. Такие методы позволяют визуализировать процессы распространения тепла на поверхности платы и оценить ее тепловые характеристики. Достоинством таких методов является относительная простота подготовки эксперимента и возможность регистрации тепловых потоков на большой площади.

В данной работе представлены результаты исследований распространения тепловых потоков в объеме платы из алюминия с нанопористым оксидом алюминия с использованием тепловизионных измерений.

### **Материалы и методы**

В исследованиях использовались образцы плат из алюминия со слоем нанопористого оксида алюминия, на поверхности которых размещался линейный элемент нагрева для имитации мгновенного линейного источника теплоты. Образцы имели размеры 60×24 мм. Толщина основания из алюминия составляла 0,5 мм. Слой нанопористого анодного оксида алюминия, сформированный на алюминии методом анодирования алюминия в водном растворе щавелевой кислоты, имел толщину 20 мкм. Такая толщина пористого анодного оксида алюминия обеспечивала необходимую изоляцию элемента нагрева от металлического основания. В конструкции платы из алюминия с нанопористым оксидом алюминия углеродная электропроводящая нить на основе вискозной технической нити использовалась в качестве элемента нагрева. Нить из углеродного волокна имела размеры 170×4×0,08 мм. Концы нити из углеродного волокна металлизировались слоем меди (толщина 30 мкм, гальваническое осаждение) для последующей пайки гибких подводящих электродов. Фиксацию углеродной нити на поверхности анодного оксида алюминия осуществляли с помощью эпоксидного компаунда. Нагреватель с нитью из углеродного волокна имел электрическое сопротивление 60 Ом. Для получения термограмм рабочей поверхности платы и ее нижней стороны использовали тепловизионную камеру MobIR M4. После инициирования работы нагревательного элемента проводилась съемка термограмм верхней и нижней поверхности платы из алюминия с нанопористым оксидом алюминия с интервалом 5 с. Данные по распределению температур для двух поверхностей платы с центром от места расположения теплового источника для различных стадий нагрева использовались для определения скорости распространения теплового потока в направлении, перпендикулярном длине линейного источника нагрева.

### **Результаты и обсуждение**

Изменение распределения температуры на верхней и нижней стороне платы, вызванное работой линейного источника нагрева, изучалось в различные промежутки времени с помощью тепловизионных измерений (рис. 1, а). Полученные термограммы показали, что температура нагревательного элемента на 5 с нагрева была приблизительно на 6,5 °С выше, чем температура анодного оксида алюминия на поверхности платы (рис. 1, б). При этом средняя температура платы возрастала до 23,3 °С по сравнению 20,6 °С перед началом нагрева. Этот результат указывает на наличие хорошего теплового контакта между элементом нагрева из углеродной нити и поверхностью анодного оксида алюминия на плате из алюминия. Кроме того, обнаружено, что температуры на поверхности платы в месте расположения элемента нагрева

и на ее нижней стороне в этой же точке на всех стадиях нагрева имели очень близкие значения. Следовательно, генерируемое тепло, благодаря высокой теплопроводности алюминия, успевало рассеяться по всему объему алюминия, обеспечивая равномерный профиль распределения температуры по поверхности как на верхней, так и на нижней стороне платы.

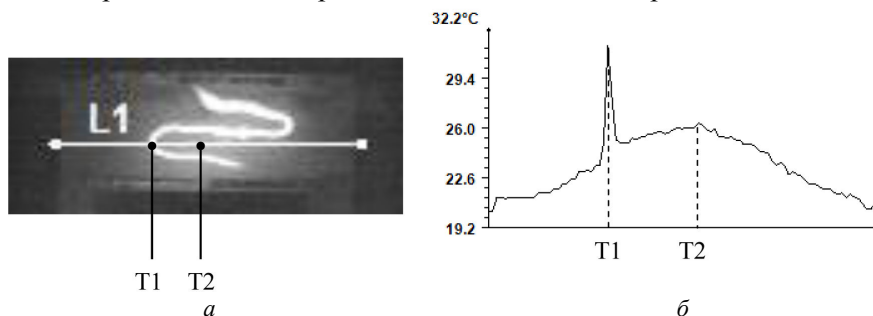


Рис. 1. Термограмма верхней поверхности платы из алюминия с нанопористым оксидом алюминия и линейным элементом нагрева из углеродной нити (а) и профиль распределения температуры (б) вдоль заданной линии на 5 с нагрева (мощность линейчатого нагревателя 3,5 Вт)

Для определения скорости распространения тепловых потоков в объеме платы из алюминия на термограммах измерялось расстояние от точки в месте нагрева до расположения теплового фронта с температурой  $40,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  для моментов времени 15 с и 20 с от начала нагрева. Термограммы верхней (с нагревателем) и нижней сторон платы из алюминия для времени нагрева 15 и 20 с представлены на рис. 2, 3. Как видно из рис. 3, тепловой поток с момента включения нагревателя сразу достигает противоположной стороны платы из алюминия. Более того, зона нагрева на нижней стороне платы, определяемая по расположению теплового фронта с выбранной температурой, занимает большую площадь, чем зона нагрева на верхней стороне платы.

Верхняя сторона

Нижняя сторона

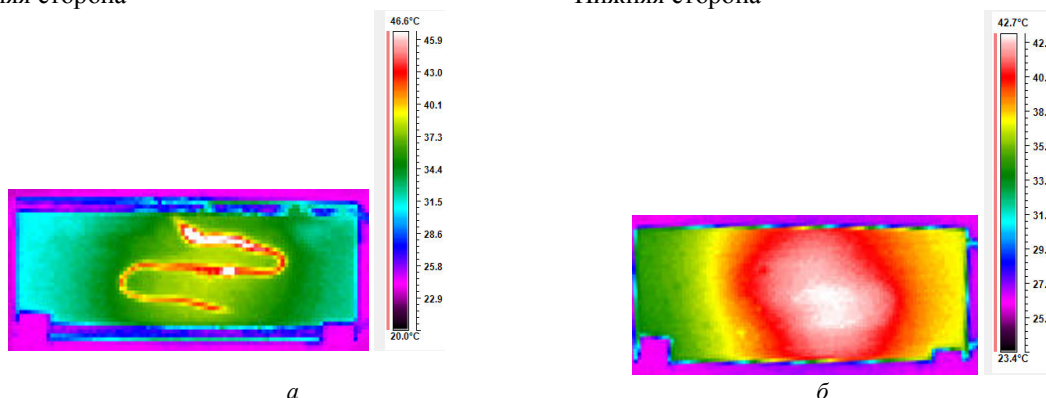


Рис. 2. Термограмма верхней (а) и нижней (б) сторон платы из алюминия с нанопористым оксидом алюминия с элементом нагрева из углеродной нити в момент времени 15 с от начала нагрева

Верхняя сторона

Нижняя сторона

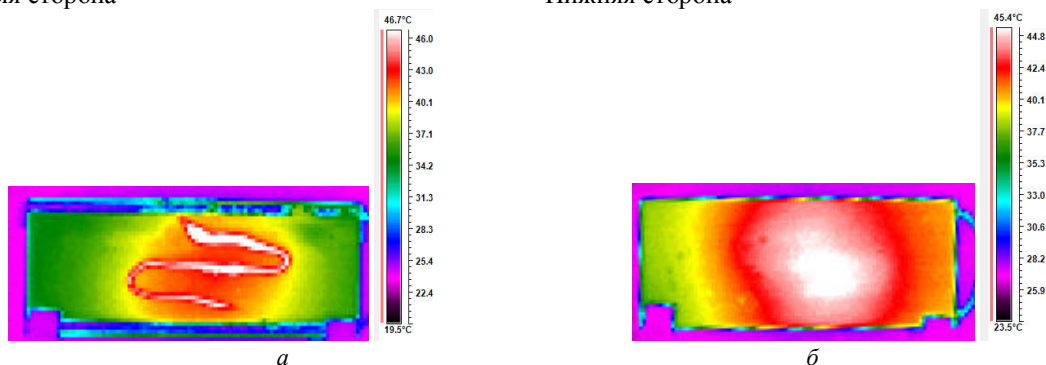


Рис. 3. Термограмма верхней (а) и нижней (б) сторон платы из алюминия с нанопористым оксидом алюминия с элементом нагрева из углеродной нити в момент времени 20 с от начала нагрева

Динамика распространения теплового фронта от точечного источника нагрева на двух сторонах платы представлена на рис. 4. Из рисунка видно, что конус тепловой трубы расширяется от источника нагрева на поверхности к нижней стороне платы. Такая форма конуса тепловой трубы полностью противоположна той, которая наблюдается для материалов из традиционных диэлектриков – сужение от источника нагрева на поверхности к нижней стороне. Таким образом, в случае платы из алюминия с нанопористым оксидом алюминия конус тепловой трубы расширяется к нижней стороне платы и, следовательно, снижается ее тепловое сопротивление.

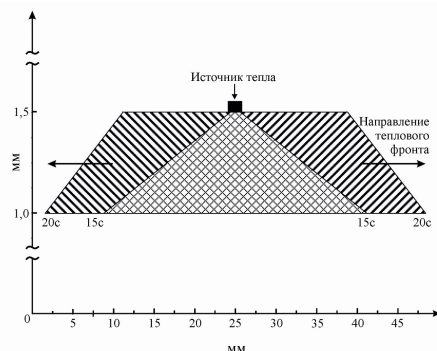


Рис. 4. Динамика распространения теплового фронта с температурой 40 °С в объеме платы из алюминия с нанопористым оксидом алюминия с началом от точечного теплового источника на поверхности платы (мощность линейчатого нагревателя 3,5 Вт) для времени нагрева 15 и 20 с

На рис. 5 представлены зависимости изменения температуры во времени при постоянной мощности электронагревателя для верхней стороны (с нагревателем) и нижней стороны платы из алюминия в контрольной точке, расположенной на нагревательном элементе. Рис. 6 показывает график скорости изменения температуры от времени нагрева. Можно видеть, что на 30 с нагрева участок с экспоненциальным падением скорости нагрева заканчивается и при дальнейшем нагреве переходит к линейному участку уменьшения скорости изменения температуры со временем.

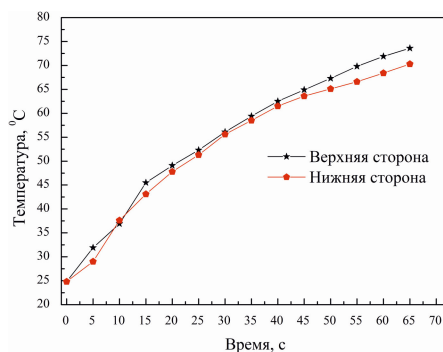


Рис. 5. Изменение температуры на верхней и нижней стороне платы из алюминия с нанопористым оксидом алюминия от времени нагрева в точке, расположенной на нагревательном элементе (мощность линейчатого нагревателя 3,5 Вт)

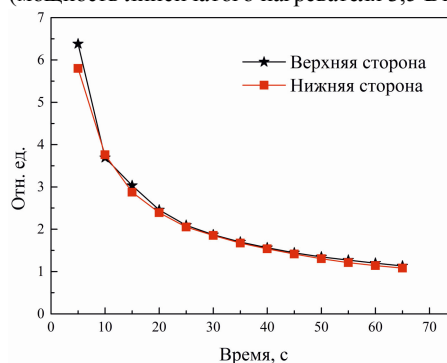


Рис. 6 Скорость изменения температуры ( $\Delta T/\Delta t$ ) на верхней и нижней стороне платы из алюминия с нанопористым оксидом алюминия в зависимости от времени нагрева в точке, расположенной на нагревательном элементе (мощность линейного нагревателя 3,5 Вт)

Следовательно, точка на 30 с нагрева характеризует наступление состояния, когда тепловой фронт успевает пройти через весь объем платы во все ее дальние точки с подъемом температуры выше начальной, и соответствует моменту установления теплового равновесия для потерь тепла на конвекцию и излучение с поверхностями платы.

### Заключение

Показано, что для исследований тепловых потоков в плате из алюминия в качестве мгновенного линейного источника теплоты может быть использован линейный нагревательный элемент из углеродной нити. Установлено, что в случае платы из алюминия со слоем нанопористого анодного оксида алюминия форма конуса тепловой трубы с началом от точечного источника нагрева на поверхности характеризуется расширением по направлению к нижней стороне платы, что приводит к снижению теплового сопротивления. Несмотря на односторонний нагрев с использованием линейного элемента нагрева из углеродной нити, профиль распределения температуры на нижней стороне имел равномерный вид на всех стадиях нагрева платы.

*Работа выполнена при поддержке белорусско-сербского проекта № Ф18СРБГ-003.*

### Список литературы

1. Теплопроводящие платы на основе алюминия с наноструктурированным слоем  $Al_2O_3$  для изделий силовой электроники / Е. Муратова [и др.] // Журнал технической физики. 2018. Т. 88, № 11. С. 1678–1680.
2. Investigation of the efficiency of the heat dissipation for the heat-conducting circuit boards made of aluminum with the nanoporous alumina layer / S. Andreev [et al.] // 40th International Spring Seminar on Electronics Technology. Sofia, 2017. P. 1–6.
3. Применение наноструктурированного анодного оксида алюминия при изготовлении теплонагруженных плат для силовых модулей / Е. Чернякова [и др.] // Научни известия на НТСМ. 2016. Т. XXV, № 12. С. 257–263.
4. Сравнительный анализ работы плоского нагревательного элемента на основании из анодированного алюминия / И. Врублевский [и др.] // Научни известия на НТСМ. 2015. Т. XXIII, № 9. С. 422–428.
12. Improvement of the thermal characteristics of the electric heater in the architecture with aluminum, nanoporous alumina and resistive component of carbon fiber / I. Vrublevsky [et al.] // Nanoscience & Nanotechnology. 2016. № 1. P. 1–2.

### References

1. Teploprovodjashhie platy na osnove aljuminija s nanostrukturirovannym sloem  $Al_2O_3$  dlja izdelij silovoj jelektroniki / E. Muratova [i dr.] // Zhurnal tehniczeskoj fiziki. 2018. T. 88, № 11. S. 1678–1680. (in Russ.)
2. Investigation of the efficiency of the heat dissipation for the heat-conducting circuit boards made of aluminum with the nanoporous alumina layer / S. Andreev [et al.] // 40th International Spring Seminar on Electronics Technology. Sofia, 2017. P. 1–6.
3. Primenenie nanostrukturirovannogo anodnogo oksida aljuminija pri izgotovlenii teplonagruzhennyh plat dlja silovyh modulej / E. Chernjakova [i dr.] // Nauchni izvestija na NTSM. 2016. T. XXV, № 12. S. 257–263. (in Russ.)
4. Sravnitel'nyj analiz raboty ploskogo nagrevatel'nogo jelementa na osnovanii iz anodirovannogo aljuminija / I. Vrublevskij [i dr.] // Nauchni izvestija na NTSM. 2015. T. XXIII, № 9. S. 422–428. (in Russ.)
5. Improvement of the thermal characteristics of the electric heater in the architecture with aluminum, nanoporous alumina and resistive component of carbon fiber / I. Vrublevsky [et al.] // Nanoscience & Nanotechnology. 2016. № 1. P. 1–2.

### Сведения об авторах

Динь Х.Т., аспирант кафедры защиты информации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Лушпа Н.В., магистрант кафедры микро- и нанoeлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

### Information about the authors

Dinh H.T., PG student of information security department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Lushpa N.V., master student of micro- and nanoelectronics department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Чернякова Е.В., к.ф.-м.н., доцент, ведущий научный сотрудник Центра 10.1 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Chernyakova K.V., PhD, associate professor, leading researcher of Center 10.1 of R&D department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Врублевский И.А., к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник НИЛ 5.3 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Vrublevsky I.A., PhD, associate professor, leading researcher of the SRL 5.3 of R&D department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

**Адрес для корреспонденции**

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
тел. +375-29-349-07-00;  
e-mail: nikita.95\_@mail.ru  
Лушпа Никита Васильевич

**Address for correspondence**

220013, Republic of Belarus,  
Minsk. P. Brovki st., 6,  
Belarusian state university  
of informatics and radioelectronics  
tel. +375-29-349-07-00;  
e-mail: nikita.95\_@mail.ru  
Lushpa Nikita Vasil'evich