

07

## Теплопроводящие платы на основе алюминия с наноструктурированным слоем $Al_2O_3$ для изделий силовой электроники

© Е.Н. Муратова,<sup>1</sup> В.А. Мошников,<sup>1</sup> В.В. Лучинин,<sup>1</sup> А.А. Бобков,<sup>1</sup> И.А. Врублевский,<sup>2</sup> К.В. Чернякова,<sup>2</sup> Е.И. Теруков<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“ им. В.И. Ульянова (Ленина), 197376 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 220013 Минск, Беларусь

<sup>3</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: SokolovaEkNik@yandex.ru

(Поступило в Редакцию 14 сентября 2017 г.)

Представлены результаты исследований электрических и тепловых характеристик плат на основе алюминия с наноструктурированным слоем анодного оксида алюминия и медными проводниками для монтажа мощных полевых транзисторов. Показано, что наличие тонкого диэлектрического слоя и толстой алюминиевой основы с высокой теплопроводностью обеспечивает равномерное распределение генерируемого активным элементом тепла по всему объему платы без образования локальных областей с повышенной температурой. Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что значение градиента температуры между источником нагрева и поверхностью анодного оксида алюминия составляет величину порядка 17–18 °С при удельной поверхностной мощности нагрева 4.4 W/cm<sup>2</sup>.

DOI: 10.21883/JTF.2018.11.46629.2480

### Введение

Для создания оптимальных тепловых режимов функционирования электронных компонентов с высоким тепловыделением необходимо обеспечить быстрый отвод тепла. Такая задача ставится во многих направлениях электроники. Так, например, перегрев солнечных элементов ведет к ухудшению эффективности и сокращает срок их службы [1]. В силовой электронике решение такой задачи зависит от характеристик печатной платы, определяемых как конструктивными особенностями платы, так и материалом, из которого она изготовлена [2,3].

Один из способов снижения уровня тепловой нагрузки плат и эффективного отвода тепла от активных компонентов — использование алюминиевых плат с диэлектрическим слоем наноструктурированного анодного оксида алюминия [4,5], который представляет собой упорядоченный массив каналов с заданными параметрами (диаметр, длина и расстояние между каналами) [6–9]. В настоящей работе представлены результаты исследований электрических и тепловых характеристик плат на основе алюминия с наноструктурированным слоем анодного оксида алюминия, предназначенных для монтажа и работы с мощными полевыми транзисторами.

### Экспериментальная часть

Конструктивные параметры силовых плат, изготовленных для монтажа мощных силовых электронных ком-

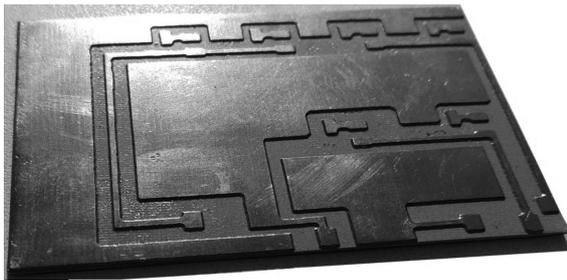
понентов, представлены в табл. 1. Экспериментальный образец печатной платы силовой электроники на основе алюминия с наноструктурированным слоем оксида алюминия показан на рис. 1.

Печатные платы изготавливали по следующему технологическому маршруту:

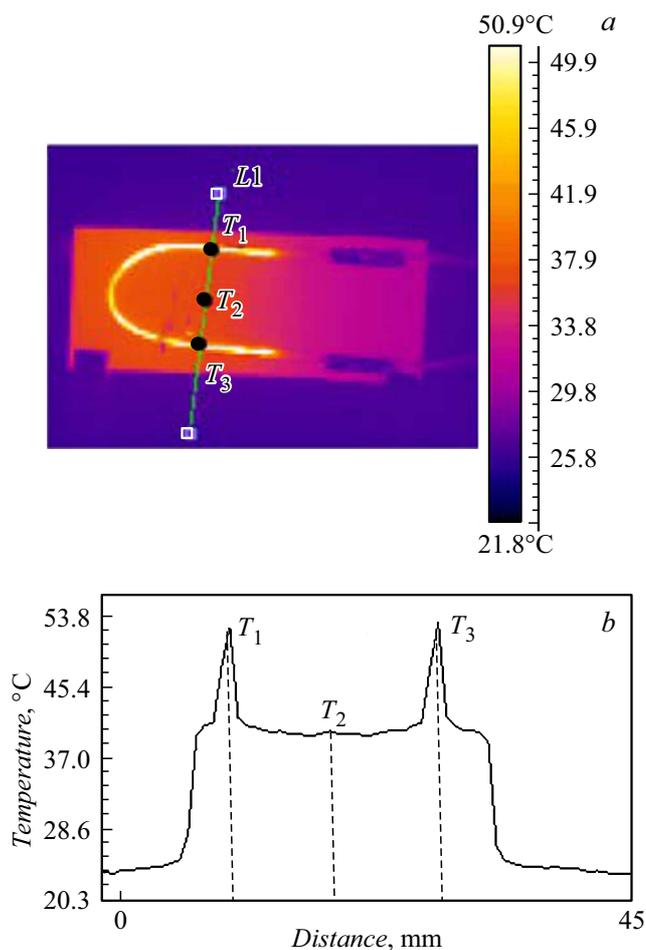
1. Вырубка алюминиевых пластин из листа алюминия.
2. Химическая обработка алюминия.
3. Анодирование алюминия для формирования слоя наноструктурированного оксида алюминия на поверхности алюминия.
4. Подклейка ламелей к медной фольге.

**Таблица 1.** Конструктивные и геометрические параметры образцов силовых плат на основе алюминия с наноструктурированным оксидом алюминия

Параметры	Значения
Геометрические размеры, mm	74–48
Толщина платы без металлизации, mm	1.0
Толщина проводящего слоя меди, $\mu\text{m}$	300
Защита поверхности	паяльная маска
Толщина наноструктурированного анодного оксида алюминия, $\mu\text{m}$	50
Толщина ламели на основе армированной эпоксидной смолы, m	30



**Рис. 1.** Образец печатной платы силовой электроники на основе алюминия с наноструктурированным оксидом алюминия.



**Рис. 2.** Термограмма поверхности платы из алюминия с нанопористым оксидом алюминия с нагревателем из углеродной нити (а) и профиль распределения температуры (b) вдоль заданной линии с контрольными точками  $T_1$ ,  $T_2$  и  $T_3$  для мощности нагревателя 6.7 W (измерение через 20 s).

5. Приклеивание фольгированных ламелей к слою оксида алюминия.

6. Создание рисунка межсоединений на медной фольге.

7. Измерение электрических характеристик плат.

В качестве теплового источника, осуществляющего односторонний нагрев поверхности нанопористого анод-

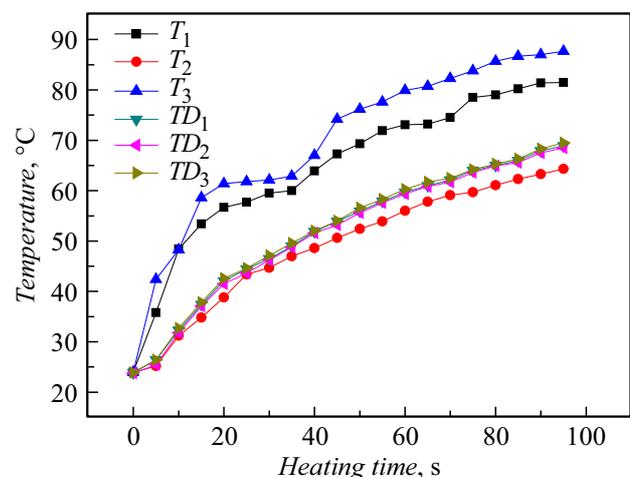
ного оксида алюминия, использовался нитевидный нагреватель из углеродной нити с размерами  $0.2 \times 7.5 \text{ cm}^2$  и электрическим сопротивлением  $60 \Omega$  (рис. 2). Генерация мощного теплового потока нагревателем линейной формы использовалась для оценки эффективности отвода тепла нанопористым анодным оксидом алюминия.

Такое конструктивное исполнение нагревателя позволило добиться условий, когда на относительно малую поверхность печатной платы приходилось большое количество выделяемого теплового потока (удельная поверхностная мощность нагревателя  $4.4 \text{ W/cm}^2$ ).

## Результаты и обсуждения

Рис. 2 иллюстрирует равномерное, без локальных перегревов, распределение теплового поля на поверхности алюминиевой платы с нанопористым оксидом алюминия в случае теплового источника — нагревателя из углеродной нити. Величина градиента температуры между источником нагрева и поверхностью анодного оксида алюминия составляет величину порядка  $17\text{--}18^\circ\text{C}$  при удельной поверхностной мощности нагрева  $4.4 \text{ W/cm}^2$ . Возникновение градиента температуры для нити нагревателя относительно поверхности платы связано с ограничением в тепловой мощности, которую может пропускать слой нанопористого анодного оксида алюминия. Анализ тепловых полей на обратной стороне платы из алюминия не выявил локальных перегревов и показал, что значения температуры в противоположных точках на лицевой и обратной поверхности имеют близкие значения (рис. 3).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что благодаря высокой теплопроводности платы из алюминия со слоем нанопористого анодного оксида алюминия генерируемое нагревателем тепло с высокой скоростью достигало обратной стороны платы.



**Рис. 3.** Изменение температуры в контрольных точках  $T_1$ ,  $T_2$  и  $T_3$  на лицевой стороне (рис. 2) и в аналогичных точках  $TD_1$ ,  $TD_2$  и  $TD_3$  на обратной стороне платы от времени нагрева для платы из алюминия с нанопористым оксидом алюминия.

**Таблица 2.** Результаты измерений основных статических параметров ДМОП транзисторов полевых переключательных (2П835А-5) на силовой плате из алюминия с наноструктурированным слоем  $Al_2O_3$  и толщиной слоя меди  $300 \mu m$

Наименование параметра	Значение
Количество выводов к площадке „исток“ транзистора	8
Сопротивление открытых транзисторов, $m\Omega$	2.8
Общее сопротивление платы, $m\Omega$	8.9
Падение напряжения на плате при рабочем токе 20 А, V	0.21
Температура нагрева платы при рабочем токе 20 А, время выдержки 60 min, °C	60

Для получения количественных характеристик печатных плат проводили испытания по определению температурных режимов их работы с использованием медных проводников толщиной  $300 \mu m$ . Тестовую конструкцию топологии платы разрабатывали для монтажа шести мощных полевых переключателей n-канальных транзисторов со встроенным обратным диодом типа 2П835А-5, использованных в виде некорпусированных кристаллов размером  $0.8 \times 0.8 mm$ . Данные транзисторы, согласно конструкторской документации, предназначены для установки методом поверхностного монтажа на платы из металлокерамики или оксида алюминия и используются в силовых микросборках в импульсных источниках питания с удельной мощностью до  $7-8 kW/dm^3$  [10], а также в различных ВЧ преобразователях.

Проверку полевых транзисторов на целостность после разварки проволокой АЦПОМ-0.3 проводили согласно рекомендации по проверке сборки плат. Результаты испытаний образцов плат представлены в табл. 2.

Как видно из данных табл. 2, конструкция силовой платы на основе алюминия с наноструктурированным слоем  $Al_2O_3$  обеспечивает требуемый тепловой режим работы мощных полевых транзисторов. В результате испытаний печатных плат при работе с шестью мощными полевыми транзисторами установлено, что при рабочем токе 20 А в течение 60 min температура нагрева платы составляет около  $60^\circ C$ .

Использование в конструкции платы малой толщины анодной пленки  $Al_2O_3$  и обеспечение хорошего теплового контакта с алюминиевым основанием приводило к низкому тепловому сопротивлению печатной платы из алюминия. Применение силовых плат из алюминия с наноструктурированным слоем  $Al_2O_3$  по сравнению со стандартными печатными платами на основе диэлектрика FR4 обеспечивает следующие преимущества: снижение рабочей температуры тепловыделяющих электронных компонентов, уменьшение размеров платы и повышение их механической прочности. Важным преимуще-

ством печатных плат на основе алюминия является также отказ от использования радиаторов, что позволяет уменьшить массу и габариты устройств, упростить их конструкцию и повысить надежность.

## Заключение

В результате исследований было установлено, что при рабочем токе 20 А в течение 60 min температура нагрева платы составляет около  $60^\circ C$ . Величина градиента температуры между источником нагрева и поверхностью анодного оксида алюминия составляет величину порядка  $17-18^\circ C$  при удельной поверхностной мощности нагрева  $4.4 W/cm^2$ .

Благодаря высоким тепловым и электрофизическим характеристикам печатные платы из алюминия с наноструктурированным слоем  $Al_2O_3$  могут использоваться в силовой электронике в источниках питания, инверторах, преобразователях постоянного/переменного тока, усилителях мощности и драйверах двигателей.

## Список литературы

- [1] *Афанасьев В.П., Теруков Е.И., Шерченков А.А.* Тонкопленочные солнечные элементы на основе кремния. 2-е изд. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ „ЛЭТИ“, 2011. 168 с.
- [2] *Хуберт Р.* // Вестник электроники. 2010. № 2. С. 12–15.
- [3] *Бечтлофф У., Фихлер Р., Шауэр Й., Шмидер К.* // Технологии в электронной промышленности. 2005. № 3. С. 22–24.
- [4] *Афанасьев А.В., Голикова Е.В., Голоудина С.И.* и др. Химические методы получения керамических и полимерных наноматериалов из жидкой фазы. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ „ЛЭТИ“, 2013. 218 с.
- [5] *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., Стивак Ю.М.* Новые наноматериалы. Синтез. Диагностика. Моделирование. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ „ЛЭТИ“, 2015. 248 с.
- [6] *Шемухин А.А., Муратова Е.Н.* // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. Вып. 5. С. 67–74.
- [7] *Luchinin V.V., Moshnikov V.A., Muratova E.N., Samigullin R.Sh.* // J. Phys.: Conference Series. 2015. Vol. 586. P. 012008.
- [8] *Врублевский И.А., Дик С.К., Терех А.С., Смирнов А.В., Чернякова К.В.* // Проблемы физики, математики и техники. 2012. Т. 12. № 3. С. 101–105.
- [9] *Vrublevsky I., Chernyakova K., Ispas A., Bund A., Gaponik N., Dubavik A.* // J. Lumin. 2011. Vol. 131. P. 938–942.
- [10] *Гордеев А.* и др. // Силовая электроника. 2009. № 3. С. 20–21.