

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.793; 621.315.61

ДИНЬ
Хыу Тай

**НАНОКОМПОЗИТНЫЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ
НА ОСНОВЕ ПОРИСТОГО АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ
ДЛЯ ПЛАТ МОЩНЫХ СВЕТОДИОДНЫХ МОДУЛЕЙ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные
компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

Минск 2019

Научная работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Научный руководитель **Врублевский Игорь Альфонсович**, кандидат технических наук, доцент, заведующий научно-исследовательской лабораторией «Материалы и элементы электронной и сверхпроводниковой техники» научно-исследовательской части учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Официальные оппоненты: **Поболь Игорь Леонидович**, доктор технических наук, доцент, начальник отдела электронно-лучевых технологий и физики плазмы государственного научного учреждения «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси»

Горох Геннадий Георгиевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий научно-исследовательской лабораторией «Нанотехнологии» научно-исследовательской части учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Оппонирующая организация Государственное научно-производственное объединение «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» Национальной академии наук Беларуси.

Защита состоится «23» января 2020 г. в 14:00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.03 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, ауд. 232, 1-й учебный корпус, тел. 293-89-89, e-mail: dissovet@bsuir.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан « » декабря 2019 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций Д 02.15.03
кандидат технических наук, доцент



И.В. Дайняк

ВВЕДЕНИЕ

Светодиодное освещение – одна из быстроразвивающихся современных технологий искусственного освещения, основано на применении светодиодов в качестве источников света. Принцип действия таких полупроводниковых приборов заключается в преобразовании энергии электронов и дырок, связанных с протеканием электрического тока, в световую энергию. Светодиодные источники излучения уже занимают существенную долю рынка приборов освещения. Развитие этого направления напрямую связано с техническим и технологическим совершенствованием элементной базы светодиодной техники и развитием технологий изготовления светодиодных устройств.

Важная особенность светодиодной техники – более высокий уровень светоотдачи по сравнению с другими источниками света. Применение светодиодного освещения существенно сокращает затраты на освещение (порядка 20 % всех затрат произведенной электроэнергии), что непосредственно затрагивает вопросы экологической и энергетической безопасности. Вот почему совершенствование и развитие светодиодной техники и технологий выделены в национальные приоритеты ряда ведущих индустриальных стран: США, Канада, ЕС, Япония, Китай, Россия.

В наши дни крупнейшие корпорации светотехнической промышленности – General Electric, Philips, Osram – заняты разработкой светодиодных технологий и изготовлением продукции светодиодного освещения, что тесно связано с созданием на базе нанотехнологий материалов с новыми свойствами и новых типов устройств светодиодного освещения.

Главными факторами, сдерживающими широкое внедрение светодиодной техники, в настоящее время являются большие материальные затраты при производстве светодиодов, что определяет высокую стоимость готовых изделий, и значительное снижение долговечности из-за проблем с теплоотводом при генерации тепла светодиодом. Поэтому вопросы теплового управления или отвода тепла в светодиодах и влияния типа и материала платы на световую эффективность являются основными задачами, на решение которых в настоящее время направлены усилия многих разработчиков.

Композитные диэлектрические покрытия на основе пористого анодного оксида алюминия позволяют за счет введения в состав такой матрицы наноразмерных углеродсодержащих включений значительно улучшить их тепловые свойства.

Таким образом, композитные покрытия на основе пористого анодного оксида алюминия являются перспективным теплопроводящим диэлектрическим материалом, что определяет актуальность исследований.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами и темами

Тема диссертационной работы утверждена приказом ректора учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» № 736-О от 30 декабря 2016 г. и соответствует направлениям 6 «Электроника и фотоника» и 8 «Многофункциональные материалы и технологии» приоритетных направлений научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 гг., утвержденных Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 12 марта 2015 г. № 190. Работа выполнялась в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» в рамках ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма 8.1 «Материаловедение и технологии материалов», задание 1.41 «Разработка процессов электрохимического синтеза и исследование свойств углеродсодержащих композиционных материалов на основе пористого оксида алюминия» (с 2016 г. – по настоящий момент, № ГР 20163737).

Цель и задачи исследования

Целью настоящей работы является установление закономерностей формирования структуры, изучение состава и тепловых свойств пленок пористого анодного оксида алюминия, исследование эффективности теплового рассеивания алюминиевых плат с углеродсодержащим нанопористым оксидом, разработка технологии изготовления и практических рекомендаций по применению светодиодных плат на их основе для мощных светодиодных оптических систем.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Проанализировать результаты научных исследований используемых материалов, конструкций и технологий изготовления плат для светодиодных оптических систем.

2. Рассмотреть основные требования, предъявляемые к материалу диэлектрика для печатной платы на металлической основе, и определить возможность использования нанопористого оксида алюминия для изготовления плат из алюминия.

3. Разработать алгоритм обработки полученных с помощью электронного микроскопа СЭМ-изображений наноразмерных элементов для наноструктур на

основе Al-Al₂O₃ в программе ImageJ для последующего анализа закономерностей роста анодного слоя и выбора оптимальных режимов анодирования.

4. Установить закономерности влияния режимов анодирования на фазовый состав и параметры наноструктуры пленок пористого анодного оксида алюминия.

5. Разработать методику проведения измерений для исследования тепловых характеристик слоя нанопористого оксида алюминия на алюминиевом основании с использованием тепловизионных термограмм.

6. Разработать методику исследования тепловых потоков в плате из алюминия со слоем нанопористого оксида алюминия с использованием линейного источника тепла.

7. Разработать технологический маршрут изготовления светодиодных плат из алюминия с нанопористым оксидом алюминия и углеродсодержащими теплопроводящими включениями для повышения теплопроводности.

8. Разработать элементы конструкции светодиодных прожекторов на основе светодиодных плат из алюминия с нанопористым оксидом, исследовать их фотометрические характеристики и выработать рекомендации по применению таких плат для светодиодных прожекторов.

Научная новизна

Выполненные в работе исследования позволили получить ряд новых результатов:

1. Наноразмерные углеродсодержащие включения с содержанием углерода около 6 ат. % в слое нанопористого оксида алюминия, полученного при анодировании алюминия в 0,3 М водном растворе щавелевой кислоты при напряжении анодирования 40 В, позволяют увеличить теплопроводность пленок в 1,5 раза по сравнению с пленками анодного оксида алюминия, сформированными в растворе серной кислоты.

2. При толщине слоя нанопористого анодного оксида алюминия не больше 30 мкм, используемого в качестве диэлектрического слоя платы из алюминия, характер распространения теплового потока в материале платы имеет вид конуса тепловой трубы с расширением по направлению к нижней стороне платы, что позволяет снизить тепловое сопротивление платы более чем в 2 раза в течение первых 20 с нагрева.

3. При увеличении напряжения анодирования от 10 до 30 В значения межпористых расстояний и диаметра пор анодных пленок, полученных в растворе щавелевой кислоты, увеличивались линейно. При напряжениях

аноодирования выше 30 В наблюдалось изменение характера зависимости, связанного с увеличением скорости роста диаметра пор, что свидетельствовало об усилении процессов растворения оксида в порах анодной пленки из-за роста агрессивности электролита в результате нагрева джоулевым теплом.

Положения, выносимые на защиту

1. Обнаруженные закономерности влияния режимов аноодирования алюминия на микроструктуру формируемых анодных пленок показывающие, что увеличение напряжения от 10 до 30 В при аноодировании алюминия в растворе щавелевой кислоты приводит к линейному росту диаметра пор от 12 до 20 нм и межпористого расстояния от 50 до 78 нм в отличие от аноодирования при напряжении выше 30 В, при котором наблюдается изменение характера зависимости, обусловленного увеличением скорости роста диаметра пор и установленная независимость размера пор анодных пленок формируемых в диапазоне от 5 до 40 °С от температуры электролита.

2. Результаты экспериментальных исследований позволившие установить, что введение углеродсодержащих включений в виде оксалат ионов в нанопористые слои анодного оксида алюминия при напряжении аноодирования 40 В в случае электролита на основе щавелевой кислоты приводит к увеличению в 1,5 раза коэффициента теплопроводности до значения 1,5 Вт/(м·°С) по сравнению с коэффициентом теплопроводности 1,0 Вт/(м·°С) для безуглеродных анодных пленок, полученных в растворе серной кислоты.

3. Светодиодные платы на основе алюминия с слоем нанопористого анодного оксида алюминия из 24 светодиодов мощностью по 0,2 Вт при рабочем напряжении переменного тока 220 В показали световой поток 480 лм при токе 150 мА и 590 лм при токе 200 мА и благодаря равномерному распределению тепловой нагрузки по всей площади позволили реализовать конструкции светодиодных прожекторов мощностью 25 и 85 Вт за счет объединения нескольких светодиодных плат в едином корпусе без использования дополнительных теплоотводящих радиаторов и увеличения массогабаритных показателей прожекторов.

Личный вклад соискателя ученой степени

В диссертации представлены результаты экспериментальных исследований, выполненных автором лично и в соавторстве. Определение структуры, цели и задач работы, обсуждение и обобщение основных научных результатов исследования проводились совместно с научным руководителем –

кандидатом технических наук И. А. Врублевским. Автор самостоятельно получал пленки пористого анодного оксида алюминия в электролитах на основе органических кислот, осуществлял выбор методик исследования и принимал непосредственное участие в исследовании тепловых характеристик слоев нанопористого анодного оксида алюминия, разработке технологического маршрута и конструкций светодиодных плат на основе алюминия с нанопористым анодным оксидом алюминия. Исследование микроструктуры пленок анодного оксида алюминия выполнялось совместно с Н. В. Лушпой и кандидатом физико-математических наук Е. В. Черняковой. Тепловые характеристики слоев нанопористого анодного оксида алюминия исследовались совместно с А. К. Тучковским, В. В. Лобуновым и кандидатом технических наук А. П. Казанцевым. Совместно с С. Андреевым, доктором технических наук В. Х. Видековым и кандидатом химических наук Б. Цаневой исследовались морфологические параметры анодных пленок и проводилось обсуждение полученных результатов. Автор принимал непосредственное участие в подготовке докладов и статей.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Материалы, вошедшие в диссертационную работу, докладывались и обсуждались на VI Республиканской научной конференции студентов, магистрантов и аспирантов «Актуальные вопросы физики и техники» (Гомель, 2017); XV Белорусско-российской научно-технической конференции «Технические средства защиты информации» (Минск, 2017); Nano-design, technology, computer simulations NDTCS-17 (Минск, 2017); Международной научно-технической конференции «Современные электрохимические технологии и оборудование» (Минск, 2017); VII Республиканской научной конференции студентов, магистрантов и аспирантов «Актуальные вопросы физики и техники» (Гомель, 2018); XVI Белорусско-российской научно-технической конференции «Технические средства защиты информации» (Минск, 2018); VIII Международной научной конференции «Материалы и структуры современной электроники» (Минск, 2018).

Результаты диссертационной работы используются в коммерческих фирмах NGETECH JSC и НТР Hitech Co.,ltd (Вьетнам).

Опубликование результатов диссертации

По результатам исследований, представленным в диссертации, опубликовано 15 работ, в том числе 8 статей в научных журналах, 5 статей в сборниках материалов научных конференций и семинаров, 2 тезисов докладов в сборниках тезисов докладов конференций и семинаров.

Общий объем публикаций по теме диссертации, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, составляет 2,35 авторского листа.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, 4 глав с выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и 2 приложений.

Общий объем диссертации составляет 110 страниц, из них 81 страница основного текста, 64 рисунка на 45 страницах, 9 таблиц на 8 страницах, библиографический список из 92 источников, включая 15 публикаций соискателя, на 10 страницах, 2 приложения на 4 страницах.

Во **введении** и в **общей характеристике работы** определены основные направления исследований, обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, изложены основные положения, выносимые на защиту, а также показана необходимость проведения исследований в данной области.

Первая глава посвящена обзору публикаций по теме диссертации, в которых рассмотрены: основные тенденции развития технологии светодиодов; материалы, конструкции и технологии изготовления плат для светодиодных оптических систем; методы получения на алюминии пленок нанопористого анодного оксида алюминия с высокоупорядоченной структурой. Во **второй главе** описаны методики проведения исследования микроструктуры, теплофизических свойств пористого оксида алюминия и фотометрических характеристик светодиодных плат на его основе. В **третьей главе** приведены результаты исследований микроструктуры, состава и тепловых свойств пленок углеродсодержащего анодного оксида алюминия с наноразмерными порами, а также эффективности теплового рассеивания алюминиевых плат на их основе. **Четвертая глава** посвящена разработке технологического маршрута изготовления светодиодных плат на основе алюминия с слоем нанопористого оксида алюминия и практических рекомендаций по их применению для мощных светодиодных оптических систем.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Во **введении** и **общей характеристике** работы дано обоснование актуальности темы диссертационной работы, определены цели и задачи исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, и их научная новизна, приведены сведения об апробации и опубликованности основных результатов диссертации в отечественных и зарубежных источниках.

В **первой главе** представлены результаты анализа публикаций по теме диссертации, рассмотрены основные тенденции развития технологии светодиодов; материалы, конструкции и технологии изготовления плат для светодиодных оптических систем; методы получения на алюминии пленок нанопористого анодного оксида алюминия с высокоупорядоченной структурой. Анализ опубликованной научно-технической, патентной и коммерческой информации показал, что:

- в последнее время светодиодная техника получила новый импульс к развитию в связи с повышением ее световой эффективности и улучшением качества света, что позволило расширить сферы применения светодиодного освещения;

- анализ тенденций развития светодиодной техники за последние 5 лет свидетельствует, что в ближайшие несколько лет по ценовому фактору и надежности светодиоды мощностью до 1 Вт будут доминировать на рынке светодиодов в системах освещения;

- анализ научно-технической литературы показал, что к 2020 г. в системах освещения мощностью до 100 Вт будут достигнуты следующие параметры: световая эффективность 180 лм/Вт, масса – не более 5 кг, гарантийный срок эксплуатации – 8 лет;

- пористый анодный оксид алюминия благодаря своим диэлектрическим свойствам и хорошей теплопроводности является перспективным материалом для применения в технологии печатных плат;

- получение пленок пористого анодного оксида алюминия с заданными параметрами микроструктуры и исследование его теплофизических свойств является актуальной задачей;

- для осуществления управляемого роста пленок пористого анодного оксида алюминия, получения требуемых микроструктуры и состава необходимо установить закономерности влияния режимов анодирования на фазовый состав и микроструктурные параметры ячеисто-пористой структуры формируемых анодных пленок.

Проведенный анализ позволил оценить актуальность и перспективы настоящего исследования и сформулировать цель и задачи

диссертационной работы.

Во **второй главе** описаны методики проведения и исследования микроструктуры, теплофизических свойств пористого анодного оксида алюминия и фотометрических характеристик светодиодных плат на его основе.

Показано, что современный этап развития компьютерных технологий и автоматизации экспериментов характеризуется большими возможностями для анализа и обработки цифровых изображений. Это открывает новые возможности для оптимизации параметров технологии получения высокоупорядоченных пленок нанопористого анодного оксида алюминия.

Для проведения исследований по теме диссертации были выбраны и обоснованы:

– методы получения пленок пористого анодного оксида алюминия, современные средства и методы исследования морфологии поверхности, структуры и состава наноструктурированных пленок, оборудование и приборы для проведения технологических операций и исследования фотометрических характеристик светодиодных плат;

– разработан в программе ImageJ алгоритм обработки полученных с помощью электронного микроскопа СЭМ-изображений наноструктур на основе Al-Al₂O₃ с наноразмерными порами, позволяющий отделить дефекты на поверхности от развивающихся пор, для последующего анализа закономерностей роста пленок анодного оксида алюминия (АОА) и выбора оптимальных режимов анодирования. Применение разработанного алгоритма позволило провести статистическую обработку данных о диаметре пор исследуемых нанопористых пленок АОА, определить экспериментальное распределение диаметра пор, а также построить графики для визуализации процесса анализа наноразмерных пор. Полученные результаты были использованы для определения диаметра пор анодных пленок методом аппроксимации функцией Гаусса;

– для получения термограмм поверхности экспериментальных образцов с источниками нагрева предложено использовать тепловизионную камеру MobIR M4 с встроенной камерой визуального контроля, что позволило получить термические и визуальные изображения экспериментальных образцов в процессе их нагрева. Полученные снимки обрабатывали в программе Launch Guide Ir Analyser для определения профилей распределения тепловых полей по площади образцов.

В **третьей главе** приведены результаты исследований микроструктуры, состава и тепловых свойств пленок углеродсодержащего анодного оксида алюминия с наноразмерными порами, а также эффективности теплового рассеивания алюминиевых плат на их основе.

Представлены результаты исследования влияния температуры электролита в диапазоне температур 5 – 40 °С на значение d_{pore} пленок пористого АОА, формируемых в растворе щавелевой кислоты при напряжении 30 В (рисунок 1).

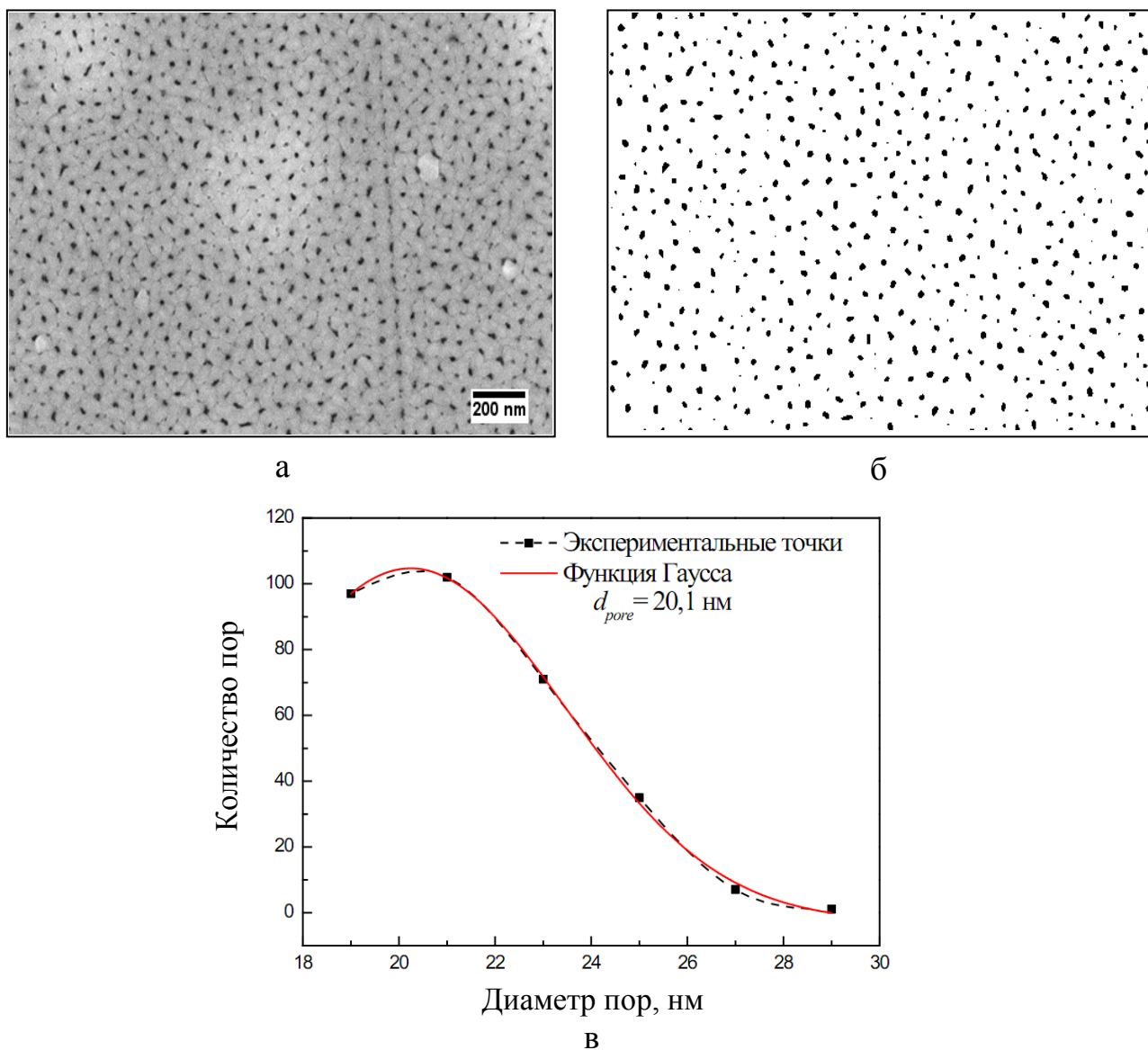


Рисунок 1. – СЭМ-изображение поверхности пленки нанопористого АОА, сформированной на Si-подложке в растворе щавелевой кислоты при температуре 5 °С (а), результат обработки изображения с использованием ImageJ (б) и полученное распределение количества пор в зависимости от их диаметра (в)

Показано, что повышение температуры электролита от 5 до 40 °С не приводило к изменению d_{pore} анодных пленок. Например, d_{pore} пленок, полученных при температуре электролита 20 °С и 30 °С был равен 20,2 нм, а при температуре 15 °С и 40 °С – 20,3 нм.

Результаты исследования позволили установить, что межпористое расстояние также не зависело от температуры электролита и в диапазоне температур 5 – 40 °С равнялось 76 нм (рисунок 2).

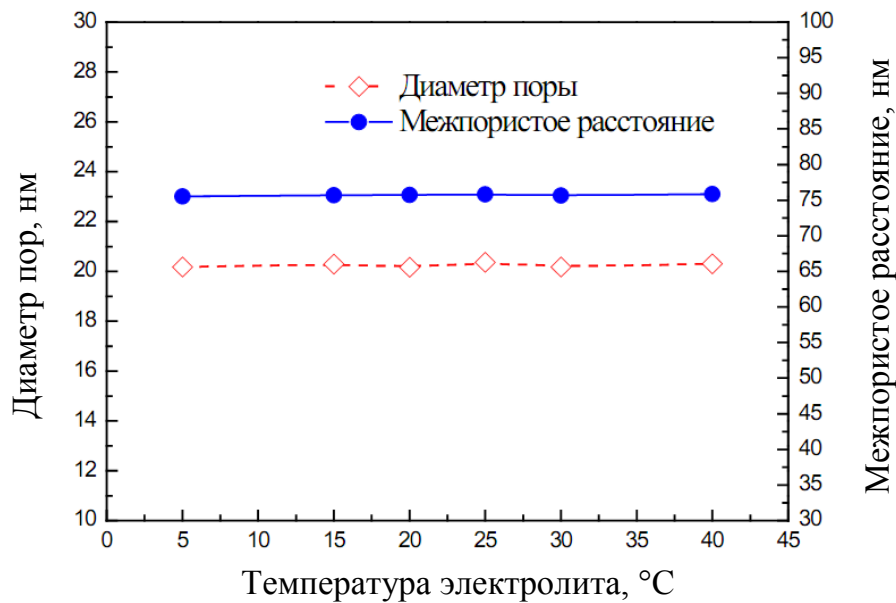


Рисунок 2. – Зависимость диаметра пор и межпористого расстояния от температуры электролита

Процесс роста тонких пленок пористого анодного оксида алюминия в 0,3 М водном растворе щавелевой кислоты изучали в диапазоне напряжений от 10 до 40 В на основе измерений параметров пористой микроструктуры (межпористого расстояния и диаметра пор).

При объяснении полученных результатов предполагалось, что различие в характере изменения диаметра пор анодных пленок в зависимости от напряжения на участках с малыми и большими значениями напряжения связано с особенностями рассеивания джоулевого тепла, генерируемого в барьерном слое пористого анодного оксида.

По результатам проведенных исследований сделаны следующие выводы:

– на основе анализа СЭМ-изображений пленок АОА, сформированных в растворе щавелевой кислоты, показано, что увеличение напряжения анодирования приводило к изменению параметров структуры. При повышении напряжения от 10 до 30 В межпористое расстояние и диаметр пор увеличивались линейно. При напряжениях выше 30 В наблюдалось изменение характера зависимости, связанного с увеличением скорости роста $d_{\text{поре}}$, что свидетельствовало об усилении процессов растворения оксида в порах анодной пленки в связи с возрастанием агрессивности электролита в результате нагрева джоулевым теплом. Для анодных пленок, сформировавшихся при 40 В, параметры структуры имели следующие

значения: $d_{\text{pore}} = 26$ нм, $D_{\text{inter}} = 100$ нм. По данным ЭДС-микроанализа определен элементный состав АОА: содержание углерода – 6,0 ат. %, кислорода – 56,5 ат. %, алюминия – 37,5 ат. %; т.е. отношение атомов кислорода и алюминия в пленке равно 0,601:0,399, что соответствует формуле Al_2O_3 ;

– для исследования тепловых характеристик платы из алюминия с слоем нанопористого АОА предложена методика измерений, основанная на стационарном методе, когда распределение температуры в образце не зависит от времени нагрева и характеризуется равномерным распределением в объеме. В результате тепловых измерений при термостатировании нижней стороны платы определены профили температуры на поверхности алюминия на границе с линейным нагревательным элементом, что позволило с учетом изотропности распределения теплового потока от нагревателя рассчитать теплопроводность слоя нанопористого анодного оксида алюминия. Теплопроводность слоя нанопористого АОА, сформированного в растворе серной кислоты, равнялась 1,0 Вт/(м·°С). Значение теплопроводности слоя нанопористого АОА, полученного в растворе щавелевой кислоты, составило 1,5 Вт/(м·°С). Такое увеличение теплопроводности пленки АОА может быть объяснено включениями углеродсодержащих остатков анионов электролита и высокой теплопроводностью углерода;

– установлено, что температура на верхней и нижней сторонах платы в точках измерения, расположенных напротив друг друга, имела близкие значения на всех стадиях нагрева. Это свидетельствовало о том, что плата из алюминия с слоем нанопористого АОА имела высокую теплопроводность, в результате чего тепло, генерируемое нагревательным элементом на поверхности, быстро достигало обратной стороны платы;

– показано, что в случае использования мощного диода в качестве нагревательного элемента при рабочем токе 6,0 А (3,4 Вт) температура кристалла диода на плате на основе стеклотекстолита типа FR4 через 250 с достигала 128 °С и только 67 °С на плате из алюминия, т.е. применение платы из алюминия с слоем нанопористого АОА приводило к практически в 2 раза меньшему нагреву;

– разработана методика исследования тепловых потоков в плате из алюминия с слоем нанопористого АОА с использованием в качестве локального источника тепла линейного нагревательного элемента из углеродной нити. Показано, что область распространения теплового потока, генерируемого источником локального нагрева на поверхности платы, представляла конус «тепловой трубы» с расширением по направлению к нижней стороне платы, что обеспечивало снижение теплового сопротивления.

Четвертая глава посвящена разработке технологического маршрута изготовления светодиодных модулей на основе алюминия с слоем пористого АОА, исследованию тепловых и фотометрических характеристик, а также разработке практических рекомендаций по их применению для создания мощных светодиодных оптических систем.

По результатам проведенных исследований был предложен лабораторный маршрут изготовления таких светодиодных модулей:

- формирование слоя пористого АОА путем анодирования алюминия в 0,4 М водном растворе щавелевой кислоты при напряжении анодирования 40 В и плотности тока 200 А/м^2 ;

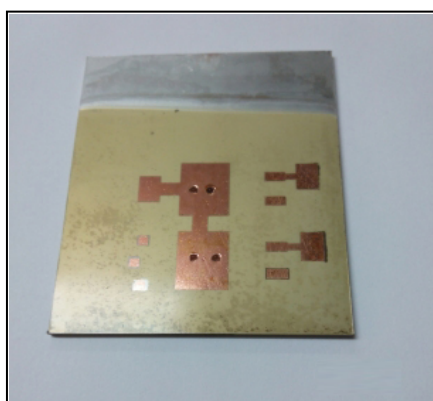
- активирование слоя пористого АОА перед химическим осаждением никеля. Обработка образцов при $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$: сначала в растворе SnSO_4 в течение 2 мин, затем в растворе PdPO_4 в течение 2 мин;

- химическое осаждение тонкого слоя никеля на поверхность пористого АОА. Состав раствора для химического осаждения никеля: NiSO_4 – концентрация 22 г/л, NaN_2PO_2 – концентрация 20 г/л, комплексная добавка для получения рН 4,6 – 4,8. Температура раствора $60 \text{ }^\circ\text{C}$, время выдержки 10 – 15 мин;

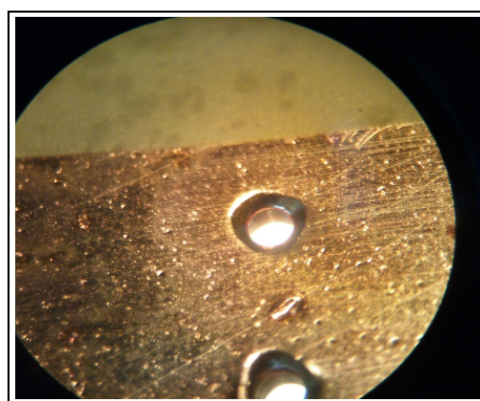
- электрохимическое осаждение слоя меди на слой никеля. Состав электролита для осаждения: CuSO_4 – концентрация 180 г/л, H_2SO_4 – концентрация 80 г/л, блескообразователь – концентрация 8 мл/л;

- формирование рисунка медных межсоединений на поверхности платы из алюминия с слоем пористого оксида алюминия.

Внешний вид экспериментальных образцов плат из алюминия с слоем пористого оксида алюминия и медной металлизацией для исследования тепловых свойств представлен на рисунке 3.



а



б

а – плата с металлизацией прямоугольной формы;

б – увеличенный фрагмент платы в районе отверстий для монтажа светодиодов

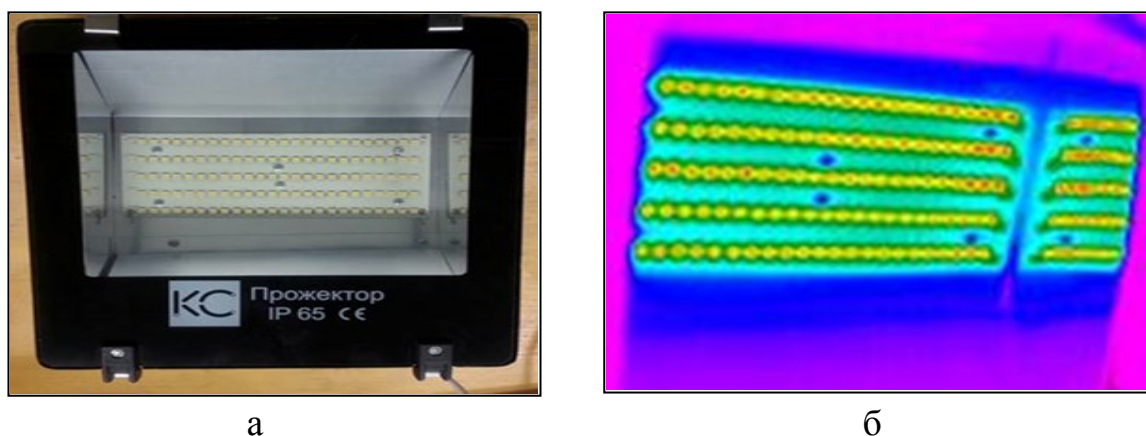
Рисунок 3. – Внешний вид экспериментальных образцов плат из алюминия

с слоем пористого оксида алюминия

Результаты исследований наглядно продемонстрировали, что для монтажа светодиодов мощностью более 3 Вт вместо плат на основе стеклотекстолита типа FR4 целесообразнее использовать платы из алюминия со слоем пористого АОА из-за их более низкого теплового сопротивления и высокой эффективности теплового рассеивания.

Использование светодиодных модулей, изготовленных на плате из алюминия со слоем пористого АОА с низким тепловым сопротивлением, позволяет обеспечить длительный срок эксплуатации и лучшие световые характеристики светодиодов, применяемых в системах освещения.

Показано, что алюминий, как материал для светодиодных модулей, не только обладает хорошими электрическими и тепловыми свойствами, но имеет также высокие механические свойства. Так, механическое соединение нескольких светодиодных линеек, имеющих плату на основе алюминия, благодаря увеличению светоотдачи позволяет получить новое изделие – светодиодный прожектор. Светодиодный прожектор мощностью 25 Вт и его термограмма для включенного состояния показаны на рисунке 4.



а – фотография прожектора; б – термограмма включенного прожектора
Рисунок 4. – Светодиодный прожектор мощностью 25 Вт, изготовленный на базе одной платы из алюминия

Светодиодные прожекторы имеют особую область применения и характеристики, отличающиеся от характеристик светодиодной линейки. Предложены конструкции реализации светодиодного прожектора мощностью 85 Вт на двух алюминиевых платах.

В **заключении** сформулированы основные научные результаты диссертации и рекомендации по их практическому использованию.

В **приложениях** приводятся копии актов о практическом использовании результатов диссертационной работы (с переводом на русский язык).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

В диссертационной работе установлены закономерности формирования структуры, определены состав и тепловые свойства пленок пористого анодного оксида алюминия, исследована эффективность теплового рассеивания алюминиевых плат с слоем углеродсодержащего нанопористого АОА и разработана технология изготовления на их основе светодиодных плат для мощных светодиодных оптических систем. Получены следующие результаты:

1. Экспериментально установлены закономерности формирования нанопористой структуры анодного оксида алюминия, показывающие, что увеличение напряжения анодирования от 10 до 30 В при анодировании алюминия в 0,4 М водном растворе щавелевой кислоты сопровождается линейным ростом значений диаметра пор (с 12 до 20 нм) и межпористого расстояния (с 50 до 78 нм). При напряжении анодирования выше 30 В наблюдается изменение характера зависимости, связанного с увеличением скорости роста диаметра пор. При этом в диапазоне температур 5 – 40 °С диаметр пор формируемых анодных пленок не зависит от температуры электролита, что позволяет упростить процесс получения анодных пленок с малым размером пор и снизить затраты на оборудование за счет исключения процесса термостатирования электролита [4, 6, 7, 10, 11, 12].

2. Разработан метод локального нагрева поверхности образца контактным способом с использованием линейного источника тепла (встраиваемая в конструкцию углеродная нить толщиной до 50 мкм) с одновременной регистрацией перегрева нагревателя относительно поверхности образца, применяемых для оценки теплопроводности твердых диэлектрических многокомпонентных материалов толщиной до 0,5 мм. Этот метод позволил определить значения коэффициентов теплопроводности 1,5 Вт/(м·°С) и 1,0 Вт/(м·°С) пленок АОА с нанопористой структурой, сформированных соответственно в электролитах на основе щавелевой и серной кислот. Показано, что увеличение в 1,5 раза коэффициента теплопроводности анодных пленок, сформированных в растворах щавелевой кислоты, обусловлено наличием в них углеродсодержащих включений [1, 2, 3, 5, 8, 9, 13].

3. Предложены конструкции светодиодных модулей из 24 светодиодов мощностью по 0,2 Вт на основе алюминия с слоем нанопористого анодного

оксида алюминия и металлизацией из электроосажденной меди, обладающие световым потоком 480 лм при токе 150 мА и 590 лм при токе 200 мА. Равномерное распределение тепловой нагрузки по всей площади платы сделало возможным создание светодиодных прожекторов мощностью 25 Вт и 85 Вт за счет объединения нескольких светодиодных плат в едином корпусе без использования дополнительных теплоотводящих радиаторов, что позволило избежать увеличения массогабаритных показателей прожекторов [2, 14, 15].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. В программе ImageJ разработан алгоритм обработки СЭМ-изображений наноструктуры на основе Al-Al₂O₃ с наноразмерными порами, позволяющий отделить дефекты поверхности от развивающихся пор, для последующего анализа закономерностей роста пленок АОА и выбора оптимальных режимов анодирования. Применение разработанного алгоритма позволило провести статистическую обработку данных о диаметре пор исследуемых пленок, определить экспериментальное распределение диаметра пор, а также построить графики для визуализации процесса анализа. Полученные результаты могут быть использованы для определения диаметра пор пленок АОА методом аппроксимации функцией Гаусса [4, 6, 7, 10, 11, 12].

2. Для исследований тепловых характеристик платы из алюминия с слоем нанопористого анодного оксида алюминия предложена методика тепловых измерений, основанная на стационарном методе, когда распределение температуры в образце не зависит от времени нагрева и характеризуется равномерным распределением в объеме. В результате тепловых измерений при термостатировании нижнего слоя платы (т.е. алюминия) определены профили температуры на поверхности алюминия на границе с линейным нагревательным элементом, что позволило с учетом изотропности распределения теплового потока, идущего от нагревателя, рассчитать теплопроводность слоя нанопористого анодного оксида алюминия [1, 3, 8, 9, 13].

3. Разработана методика исследования тепловых потоков в плате на основе алюминия с слоем нанопористого АОА с использованием линейного нагревательного элемента из углеродной нити, позволяющая существенно упростить и ускорить процедуру теплового контроля [1, 2, 5].

4. Предложено объединить в одном корпусе несколько светодиодных плат из алюминия с пленкой нанопористого анодного оксида алюминия, что, благодаря хорошим диэлектрическим, тепловым, механическим и оптическим

свойствам этих плат, позволяет реализовать конструкции светодиодных прожекторов различной мощности (25 Вт, 85 Вт) без применения дополнительных теплоотводящих радиаторов [2, 14, 15].

5. Результаты диссертационной работы используются в коммерческих фирмах NGETECH JSC и НТР Hitech Co.,ltd (Вьетнам). Копии актов об использовании результатов диссертационной работы представлены в приложениях к диссертационной работе.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в рецензируемых научных журналах

1. Исследование тепловых характеристик печатных плат из алюминия со слоем нанопористого оксида алюминия с использованием тепловизионных измерений / К. Чернякова, И. Врублевский, В. Видеков, Б. Цанева, С. Андреев, Т. Динь // Научни известия на НТС по машиностроене. – 2017. – № 2. – С. 113–118.

2. Utilization of circuit boards on aluminum with nanoporous anodic alumina and copper layer for power modules in switching power supplies / I. Vrublevsky, K. Chernykova, V. Videkov, A. Tuchkovsky, T. Dinh // Nanoscience & nanotechnology: Nanostructured materials application and innovation transfer. – 2017. – Vol. 17, № 2. – P. 40–43.

3. Характеристики и тепловые свойства тонких плоских алюминиевых нагревателей с углеродной нитью в качестве резистивного элемента / К. Чернякова, И. Врублевский, В. Видеков, Т. Динь // Научни известия на НТС по машиностроене. – 2018. – № 3. – С. 175–180.

4. Surface morphology analysis and nanoporous structure quantification by digital processing of SEM images of anodic aluminium oxide films / K. Chernykova, I. Vrublevsky, B. Tzaneva, V. Videkov, T. Dinh // Nanoscience & nanotechnology: Nanostructured materials application and innovation transfer. – 2018. – Vol. 18, № 1. – P. 34–36.

5. Исследование распространения тепла в плате из алюминия с нанопористым анодным оксидом алюминия тепловизионным методом / Х. Т. Динь, Н. В. Лушпа, Е. В. Чернякова, И. В. Врублевский // Доклады БГУИР. – 2019. – № 1 (119). – С. 45–50.

6. Morphology investigation of nanoporous anodic alumina films with image analysis / N. V. Lushpa, H. T. Dinh, K. V. Chernykova, I. A. Vrublevsky // Materials Physics and Mechanics. – 2019. – Vol. 41, № 1. – P. 74–77.

7. Цифровая обработка изображений наноразмерных элементов на наноструктурированной поверхности материалов с помощью программы ImageJ / Х. Т. Динь, Н. В. Лушпа, Е. В. Чернякова, И. В. Врублевский // Доклады БГУИР. – 2019. – № 4 (122). – С. 79–84.

8. Контактный локальный нагрев алюминиевой основы с нанопористым оксидом алюминия линейным источником тепла для использования в

термометрии / Н. В. Лушпа, Х. Т. Динь // Доклады БГУИР. – 2019. – № 6 (124). – С. 105–109.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

9. Динь, Х. Т. Исследование перегрева тепловыделяющих элементов на поверхности платы из алюминия с нанопористым оксидом алюминия / Х. Т. Динь, В. В. Лобунов, И. А. Врублевский // Актуальные вопросы физики и техники : материалы VI Республиканской науч. конф. студентов, магистрантов и аспирантов, Гомель, 26 апреля 2017 г. ; редкол. : С. А. Хахомов [и др.]. – Гомель, 2017. – С. 39–41.

10. Lushpa, N. Analysis and digital processing of SEM image of anodic alumina films with nanoporous structure / N. Lushpa, T. Dinh // Nano-design, technology, computer simulations (NDTCS-17), Minsk, October 26–27, 2017 ; ed. board : A. Melker [et al.]. – Minsk, 2017. – P. 185–188.

11. Морфологический анализ нанопористой структуры пленок анодного оксида алюминия с помощью цифровой обработки СЭМ изображений / Н. В. Лушпа, Х. Т. Динь, К. В. Чернякова, И. А. Врублевский // Современные электрохимические технологии и оборудование : материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск, 28–30 ноября 2017 г. ; редкол. : И. В. Войтов [и др.]. – Минск, 2017. – С. 126–129.

12. Лушпа, Н. В. Обработка массивов данных с использованием программы цифровой обработки изображений для определения параметров микроструктуры нанопористых материалов / Н. В. Лушпа, Х. Т. Динь, Е. В. Чернякова // Актуальные вопросы физики и техники : материалы VII Республиканской науч. конф. студентов, магистрантов и аспирантов, Гомель, 25 апреля 2018 г. ; редкол. : Д. Л. Коваленко [и др.]. – Гомель, 2018. – С. 83–84.

13. Исследование распространения тепловых потоков в плате из алюминия с нанопористым оксидом алюминия с помощью тепловизионных измерений / И. А. Врублевский, К. В. Чернякова, Х. Т. Динь, Н. В. Лушпа // Материалы и структуры современной электроники : материалы VIII Междунар. науч. конф., Минск, 10–12 октября 2018 г. ; редкол. : В. Б. Оджаев [и др.]. – Минск, 2018. – С. 290–293.

Тезисы докладов на научных конференциях

14. Мощные светодиодные прожекторы на основе объединения алюминиевых плат для систем охранного освещения / Х. Т. Динь, И. А. Врублевский, Е. В. Чернякова, А. К. Тучковский, А. П. Казанцев // Технические средства защиты информации : тез. докл. XV Белорусско-российской науч.-техн. конф., Минск, 6 июня 2017 г. ; редкол. : Т. В. Борботько [и др.]. – Минск, 2017. – С. 109–110.

15. Светодиодные системы высокой мощности на алюминиевой плате с комбинированным диэлектриком / Х. Т. Динь, И. А. Врублевский, К. В. Чернякова, А. К. Тучковский // Технические средства защиты информации : тез. докл. XVI Белорусско-российской науч.-техн. конф., Минск, 5 июня 2018 г. ; редкол. : Т. В. Борботько [и др.]. – Минск, 2018. – С. 36.



РЭЗІЮМЭ

Дзінь Хыу Тай

Нанакампазітныя дыэлектрычныя пакрыцці на аснове порыстага аноднага аксіду алюмінія для плат магутных святлодыёдных модуляў

Ключавыя словы: пячатная плата, алюміній, нанопорысты аксід алюмінію, цеплавы паток, лінейная крыніца цяпла, цеплавыя характарыстыкі.

Мэта працы: устанаўленне заканамернасцей фарміравання структуры, плёнак порыстага аноднага аксіду алюмінію, даследаванне складу і цеплавых уласцівасцеў плёнак аноднага аксіду алюмінію, эфектыўнасці цеплавога рассеявання алюмініевых плат з слоём вугляродзмяшчальнага нанопорыстага аксіду алюмінію, распрацоўка тэхналогіі вырабу і практычных рэкамендацый па выкарыстанні святлодыёдных плат на іх аснове для магутных святлодыёдных аптычных сістэм.

Метады даследавання і выкарыстаная апаратура: паверхня і папярочнае сячэнне плёнак аноднага аксіду алюмінію даследавалі з дапамогай электронных мікраскопаў SIGMA VP і AURIGA CrossBeam (Carl Zeiss); параметры мікраструктуры анодных плёнак – дыяметр пор і міжпорыстая адлегласць, вызначаліся па распрацаваным ў праграме ImageJ алгарытме; цеплавое выпраменьванне рэгістравалі пры дапамозе цеплавізійнай камеры MobIR M4, якая дадаткова была забяспечана камерай візуальнага кантролю; вымярэнне светлавога патоку святлодыёдных плат праводзілі з выкарыстаннем Ю-116.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: ўстаноўленыя заканамернасці ўплыву рэжымаў анадзіравання на склад і параметры нанаструктуры порыстага аноднага аксіду алюмінію, а таксама уплыў вугляродзмяшчальных уключэнняў на павелічэнне каэфіцыента цеплаправоднасці нанакампазітных пакрыццяў на аснове аноднага аксіду алюмінію, даследавання цеплавыя патокі ў платах з алюмінія з анодным аксідам алюмінію, што прывяло да стварэння цеплаправодзячых нанакампазітных дыэлектрычных пакрыццяў для плат магутных святлодыёдных модуляў.

Ступень выкарыстання: вынікі дысертацыйнай працы ўкаранёныя і выкарыстоўваюцца ў фірмах NGETECH JSC і НТР Hitech Co., ltd (В'етнам).

Вобласць ужывання: цвердацельная электроніка і святлодыёдная тэхніка.

РЕЗЮМЕ

Динь Хыу Тай

Нанокompозитные диэлектрические покрытия на основе пористого анодного оксида алюминия для плат мощных светодиодных модулей

Ключевые слова: печатная плата, алюминий, нанопористый оксид алюминия, тепловой поток, линейный источник тепла, тепловые характеристики.

Цель работы: установление закономерностей формирования структуры пленок пористого анодного оксида алюминия, исследование состава и тепловых свойств пленок анодного оксида алюминия, эффективности теплового рассеивания алюминиевых плат с слоем углеродсодержащего нанопористого анодного оксида алюминия, разработка технологии изготовления и практических рекомендаций по применению светодиодных плат на их основе для мощных светодиодных оптических систем.

Методы исследования и использованная аппаратура: поверхность и поперечное сечение пленок анодного оксида алюминия исследовали с помощью электронных микроскопов SIGMA VP и AURIGA CrossBeam (Carl Zeiss); параметры микроструктуры анодных пленок – диаметр пор и межпористое расстояние, определяли в программе ImageJ по разработанному алгоритму; тепловое излучение при тепловых измерениях регистрировали с помощью тепловизионной камеры MobIR M4 с встроенной камерой визуального контроля; для измерения светового потока светодиодных плат использовали Ю-116.

Полученные результаты и их новизна: установлены закономерности влияния режимов анодирования на состав и параметры наноструктуры пористого анодного оксида алюминия, а также влияние углеродсодержащих включений на увеличение коэффициента теплопроводности нанокompозитных покрытий на основе анодного оксида алюминия, исследованы тепловые потоки в платах из алюминия с анодным оксидом алюминия, что позволило создать теплопроводящие нанокompозитные диэлектрические покрытия для плат мощных светодиодных модулей.

Степень использования: результаты диссертационной работы внедрены и используются в фирмах NGETECH JSC и НТР Hitech Co., ltd (Вьетнам).

Область применения: твердотельная электроника и светодиодная техника.

SUMMARY

Dinh Huu Tai

Nanocomposite dielectric coatings based on porous anodic aluminum oxide for boards of high-power LED modules

Keywords: printed circuit board, aluminum, nanoporous alumina, heat flux, linear heat source, thermal characteristics.

Aim of the work: establishing patterns of formation of the structure, composition and thermal properties of films of porous anodic aluminum oxide, a study of the effectiveness of thermal dispersion of aluminum boards with carbon-containing nanoporous oxide and the development of manufacturing technology and practical recommendations on the use of LED boards based on them for high-power LED optical systems.

Research methods and equipment used: the surface and cross section of anodic alumina films were examined using SIGMA VP and AURIGA CrossBeam scanning electron microscopes (Carl Zeiss); the microstructure parameters of anodic films, such as pore diameter and interporous distance, were determined in the ImageJ program using the developed algorithm; registration of thermal radiation during thermal measurements was performed using a MobIR M4 thermal imaging camera with a built-in visual inspection camera; measurement of the luminous flux of LED boards was performed using the IO-116.

The results and their novelty:

The regularities of the influence of anodizing modes on the composition and parameters of nanostructure of porous anodic alumina, the effect of carbon-containing inclusions on the increase of thermal conductivity of nanocomposite coatings based on anodic alumina, heat flows in aluminum boards with anodic alumina, which allowed the creation of heat-conducting nanocomposite dielectric coatings for boards high-power LED modules.

Extent of usage: the results of the dissertation were introduced and used in the firms NGETECH JSC and HTP Hitech Co., ltd (Vietnam).

Application area: solid state electronics and LED technology.

День Хыу Тай**НАНОКОМПОЗИТНЫЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ
НА ОСНОВЕ ПОРИСТОГО АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ
ДЛЯ ПЛАТ МОЩНЫХ СВЕТОДИОДНЫХ МОДУЛЕЙ****АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные
компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах

Подписано в печать	Формат 60x84 ¹ / ₁₆ .	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Отпечатано на ризографе.	Усл. печ. л. 1,63.
Уч. изд. л. 1,5.	Тираж 60 экз.	Заказ

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/238 от 24.03.2014,

№ 2/113 от 07.04.2014, № 3/615 от 07.04.2014.

ЛП № 02330/264 от 14.04.2014.

220013, Минск, П. Бровки, 6.