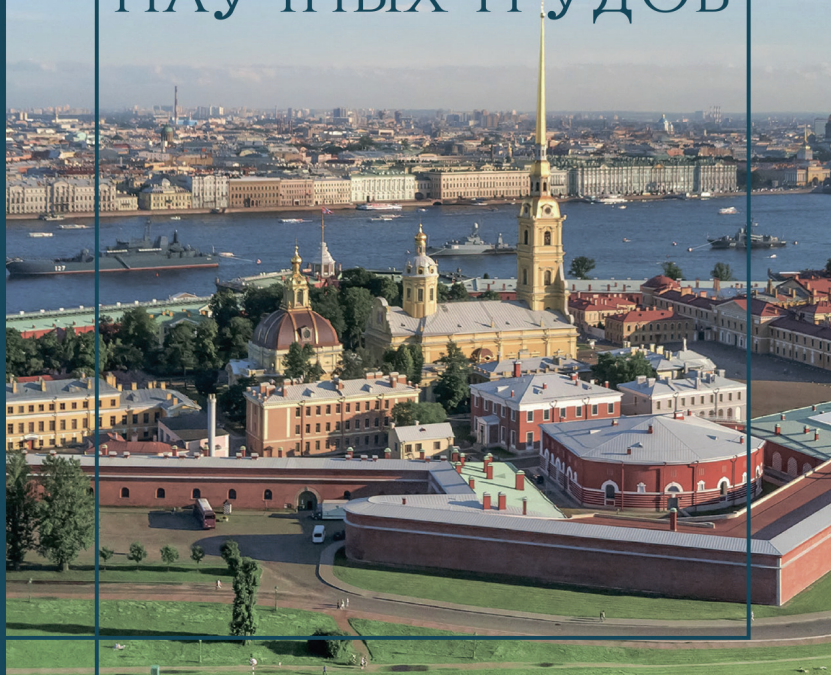




I НАУЧНО – ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ГИРИКОНД ЭКСПО

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ



06.10 - 09.10 САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
www.giricond.ru
2025

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ «ГИРИКОНД»

ГИРИКОНД ЭКСПО

I Научно-практическая конференция
6 октября – 9 октября 2025 года

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

GIRIKOND EXPO

1st Scientific and Practical Conference
6 October – 9 October, 2025

PROCEEDINGS



Санкт-Петербург
СИНЭЛ
2026

УДК [621.38+620.22+654.924.5](082)

ББК 32.844я43+32.854я43+68.9я43

Г51

Гириконд ЭКСПО = Girikond EXPO : I научно-практическая конференция, 6 октября – 9 октября 2025 года : сборник научных трудов / Акционерное общество «Научно-исследовательский институт «Гириконд» ; составитель: А. А. Чеботарев ; под редакцией Р. М. Ахмадуллина. – Санкт-Петербург : СИНЭЛ, 2026. – 220 с. : ил., цв. ил., табл.

Рез. англ. — 40 экз. — ISBN 978-5-6056392-1-3.

Текст (визуальный) : непосредственный.

I. Чеботарев, А. А., сост. II. Ахмадуллин, Радик Минзагитович, ред. III. «Гириконд ЭКСПО – 2025», научно-практическая конференция (I; Санкт-Петербург) IV. «Гириконд», НИИ (Санкт-Петербург)

Рецензенты: доцент, доктор технических наук Н.С. Пщелко,
доцент, кандидат технических наук Д.В. Шушпанов

Сборник научных трудов отражает вопросы и задачи в сфере обеспечения современного уровня потребительских и технологических характеристик отечественной электронной промышленности, в части пассивной электронной компонентной базы и оптоэлектронных приборов ИК диапазона, представленных на I Научно-практической конференции «Гириконд ЭКСПО – 2025».

Сборник опубликован в авторской редакции.

Дизайн, вёрстка и корректура: организационный комитет конференции «Гириконд ЭКСПО – 2025», confdocs@girikond.ru,
194223, г. Санкт-Петербург, ул. Курчатова, д.10.

Reviewers: Associate Professor, Doctor of Technical Sciences N.S. Pshchelko,
Associate Professor, PhD in Engineering Sciences D.V. Shushpanov

Proceedings of the 1st Scientific and Practical Conference “Girikond EXPO – 2025” address issues and challenges in ensuring the modern level of consumer and technological characteristics of the domestic electronics industry, specifically in the area of passive electronic components and infrared (IR) optoelectronic devices.

Published in the author's original version.

Design, layout, and proofreading: Organizing Committee
of the “Girikond EXPO – 2025” Conference, confdocs@girikond.ru,
10 Kurchatova St., Saint Petersburg, 194223, Russia.

УДК [621.38+620.22+654.924.5](082)
ББК 32.844я43+32.854я43+68.9я43

©АО «НИИ «Гириконд», 2026
©Авторы, 2026

ISBN 978-5-6056392-1-3

Уважаемые коллеги, партнёры и читатели!

Представляем вашему вниманию сборник научных трудов Научно-практической конференции «Гириконд ЭКСПО – 2025», состоявшейся 6 – 9 октября 2025 года в Санкт-Петербурге. Для АО «НИИ «Гириконд» это событие стало первым открытым проектом столь высокого уровня. Прологом к нему послужили две научно-технические конференции молодых ученых и специалистов, организованные институтом ещё в 2014 и 2018 годах. Традиции, заложенные тогда, сегодня вышли на новый этап масштабной интеграции науки и производства. Конференция объединила более 180 представителей вузов, отраслевых институтов и ведущих холдингов (Ростех, Росатом, ОСК). Структура сборника отражает работу трех ключевых секций:

- **Секция I:** материаловедческие, технологические проблемы и направления развития пассивных электронных компонентов;
- **Секция II:** материаловедение, технологии и направления развития фотоэлектрических и оптоэлектронных приборов ИК-диапазона;
- **Секция III:** разработка и производство средств пожарной автоматики: извещателей пламени, устройств контроля пламени и других приборов систем безопасности.

Уверены, что представленные результаты исследований станут надёжной основой для укрепления технологического лидерства отрасли и старта новых совместных проектов.

**Научный координатор конференции,
к.т.н., заместитель генерального директора
по научно-техническому развитию АО «НИИ «Гириконд»
Ахмадуллин Радик Минзагитович**

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

- Председатель комитета -

Ахмадуллин Радик Минзагитович

к.т.н., заместитель директора по научно-техническому развитию,
Акционерное общество «Научно-исследовательский
институт «Гириконд»

- Заместители председателя комитета -

Бурьяненко Владимир Дмитриевич

к.т.н., начальник лаборатории научно производственного комплекса
электролитических конденсаторов, Акционерное общество
«Научно-исследовательский институт «Гириконд»

Пщелко Николай Сергеевич

д.т.н., доцент, заведующий кафедрой физики,
Санкт-Петербургский электротехнический университет «ЛЭТИ»

Романова Галина Викторовна

к.т.н., доцент, директор Института лазерных технологий,
Университет ИТМО

Скалецкая Ирина Евгеньевна

к.т.н., заместитель директора по научной работе института магистратуры,
Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

Тропин Алексей Николаевич

к.ф.-м.н., начальник научно-производственного отделения нелинейных
полупроводниковых резисторов, фотоприемников и датчиков,
Акционерное общество «Научно-исследовательский
институт «Гириконд»

Шур Владимир Яковлевич

д.ф.-м.н., профессор., директор УЦКП «Современные нанотехнологии»,
Уральский федеральный университет

Шушпанов Дмитрий Викторович

к.т.н., доцент, доцент кафедры электроники, Санкт-Петербургский
государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ I – МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ПАССИВНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ

Шушпанов Д.В., Дмитриков В.Ф.

СПбГУТ

Моделирование пассивной элементной компонентной
базы в широкой области частот 15

Ликий А.А., Иванов А.В.

ООО «Остек-Электро»

Проблематика измерения эквивалентного последова-
тельного сопротивления (ESR) конденсаторов современ-
ными метрологически обеспеченными средствами 22

Гордейчук А.П.

ООО «ИнтелТроник»

Аппаратура для прецизионных измерений параметров
конденсаторов 26

Андреев Д.С.

ООО «Группа Ай-Эм-Си»

Рентгеновские спектрометры WEPER и DetectX: точный
элементный анализ в материаловедении 30

**Козодаев Д.А.¹, Мошников В.А.², Новиков И.А.^{1,2},
Сотник Г.П.^{1,2}**

¹ООО «Активная фотоника», ²СПбГЭТУ ЛЭТИ

Вспомогательный модуль внешнего магнитного поля для
магнитно-силовой микроскопии 36

Архипов И.А., Мишин П.А., Смирнова Н.Ю.

АО «Хакель»

Влияние способа грануляции порошка на импульсную
устойчивость оксидно-цинковых варисторов 40

Гордеев П.С., Коршак М.Н.

АО «НИИ «Гириконт»

Многослойные керамические конденсаторы: развитие и
обеспечение конкурентоспособности направления ... 44

Гришин А.Д.

АО «НИИ «Гириконт»

Инновационные топологические решения в электронной
аппаратуре на базе отечественных конденсаторных сбо-
рок 48

Корнюшин М.В., Смирнов А.В., Холодкова А.А.

РТУ МИРЭА

Материалы для пассивных электронных компонентов. Ми-
ровые тренды в исследованиях и разработках. Компетен-
ции РТУ МИРЭА 53

Адарчин С.А.¹, Васютин М.С.¹, Гурин В.М.¹,

Косушкин В.Г.¹, Хропов А.А.²

¹ООО «Фокон», ²ООО «ЭЛМА-ПАСТЫ»

Токопроводящий порошок серебро-палладие-
вого сплава 70/30 для межслойных электродов
SMD конденсаторов 57

Батищева М.В.

АО «ОНИИП»

Проблемы прецизионной печати при изготовлении пассивных элементов на основе низкотемпературной керамики 61

**Будин О.Н., Фрадков М.Я., Котляров В.И.,
Васильев Д.И., Можевикин А.С.**

АО «Гиредмет»

Перспективы развития производства тантала конденсаторного класса в АО «Гиредмет» 65

**Аронович Д.А., Ладилова Н.Ю., Синеокова О.А.,
Шалагинова И.А.**

ФГУП «НИИ химии технологии полимеров имени академика В. А. Каргина с опытным заводом»

Свойства новых конструкционных акриловых материалов, разработанных в АО «НИИ полимеров» 68

Можевикин А.С., Фрадков М.Я., Будин О.Н.

АО «Гиредмет»

Получение высокочастотных порошков тантала конденсаторного класса 72

**Адарчин С.А.¹, Васютин М.С.¹, Гурин В.М.¹,
Косушкин В.Г.¹, Хропов А.А.²**

¹ООО «Фокон», ²ООО «ЭЛМА-ПАСТЫ»

Терморезистивные датчики температуры 75

Дубровская А.А., Лосинская М.В.

АО «ЦКБА»

Опыт разработки и изготовления прецизионных термостабильных СВЧ конденсаторов 80

**Егоров С.В., Иванова В.И., Ларионов М.И.,
Протченко А.И., Шарова Н.Н.**

АО «НИИ «Феррит-Домен»

Разработка и освоение серийного производства ферритового материала с улучшенными характеристиками и изделий на его основе для применения в качестве радиопоглощающего материала в безэховых камерах 84

**Патарашвили А.Н., Патарашвили А.Н., Ефимов А.А.,
Иванов В.В.**

МФТИ

Технология формирования микроразмерных и субмикронных структур методом аэрозольной печати 89

**Лизунова А.А., Корнюшин Д.В., Власов И.С.,
Каменева Е.И., Иванов В.В.**

МФТИ

Технология сухой аэрозольной печати для формирования электродов транзисторов 93

Печников А.В., Ходжамов А.А., Плотников А.П.

СПбПУ

Исследование характеристик микродуговой стадии процесса самовосстановления в металлоплёночных конденсаторах 97

Бобков А.А., Урмурзин Д.Д.

СПБГЭТУ «ЛЭТИ»

Исследование деградации квантовых точек CsPbX_3 методами комбинационного рассеяния света 101

Григорьев М.В., Жуков И.А., Ткачев Д.А.

НИ ТГУ

Разработка и модернизация составов корундовой керамики для нужд микроэлектроники 104

Ходжамов А.А., Печников А.В., Плотников А.П.

СПбПУ

Особенности измерения поверхностного сопротивления конденсаторной полимерной пленки с профильной металлизацией 107

Чеботарев А.А.^{1,2}, Ахмадуллин Р.М.¹

¹АО «НИИ «Гириконд», ²Университет ИТМО

Разработка лазерного датчика для неразрушающий контроля наличия субмиллиметровых металлических элементов при производстве ЭКБ и электротехники 111

Хренкова Е.А., Буренкова Н.А., Рыбакова М.Е.

АО «ЦНИИ «Электрон»

Исследование влияния свойств стекол разных производителей на физико-механические свойства растров ... 117

Радайкин Д.Г.

СПБГЭТУ «ЛЭТИ»

Исследование корреляции между концентрацией серебра и теплопроводностью композитных материалов ZnO/Ag 121

Акаев Е.Э., Будин О.Н., Котляров В.И., Приходько А.С.

АО «Гиредмет»

Возможности использования вторичного танталового сырья для производства порошков конденсаторного класса 125

Соколов А.М., Муратова Е.Н.

СПБГЭТУ «ЛЭТИ»

Особенности формирования и области применения наноструктурированного пористого анодного оксида алюминия 128

Халугарова К., Спивак Ю.М.

СПБГЭТУ «ЛЭТИ»

Иерархические пористые материалы на основе самосборки наночастиц кремния и оксида никеля для сенсорики 133

Бобков А.А.¹, Козодаев Д.А.², Мошников В.А.¹

¹СПБГЭТУ «ЛЭТИ», ²ООО «Активная Фотоника»

Развитие методов диагностики на основе сканирующей зондовой микроскопии в период развития материаловедения от нанотехнологии к наноархитектонике 138

Пщелко Н.С.

СПБГЭТУ «ЛЭТИ»

Неразрушающий контроль качества оксидных конденсаторов электрическими методами 142

СЕКЦИЯ II – МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, ТЕХНОЛОГИИ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ ИК-ДИАПАЗОНА

Козодаев Д.А.¹, Пщелко Н.С.²

¹ООО «Активная Фотоника», ²СПБГЭТУ «ЛЭТИ»

Регулируемый оптический изолятор для полупроводниковых лазеров ИК - диапазона 145

Терещенко О.Е.¹, Шайблер Г.Э.¹, Русецкий В.С.²

¹ИФП СО РАН, ²АО «Экран ФЭП»

Универсальная технологическая база для создания электронно-оптических преобразователей от рентгеновского до дальнего ИК диапазона 148

Васильев О.С.

ООО «Лазерный центр»

Лазеры системы и лазерные технологии для обработки материалов микроэлектронной промышленности 151

Гаджей А.О., Муратова Е.Н.

СПБГЭТУ «ЛЭТИ»

Особенности формирования перовскитных солнечных элементов 156

**Стоянов Н.Д., Кижаяев С.С., Черняев А.В.,
Молчанов С.С., Калюжный Н.А.**

ООО «ЛЕД Микросенсор НТ»

Выбор эпитаксиальных структур на основе InAs и твердых растворов InAsSb, InAsSbP с целью измерения концентрации метана в разных температурных условиях 160

Бойко С.Б.

АО «НИИ «Гириконт»

Влияние миграции подвижных заряженных примесей на параметры фоторезистивных структур на основе поликристаллических пленок селенида свинца 164

**Вознюк Г.В.¹, Митрофанов М.И.¹, Бабичев А.В.²,
Евтихий В.П.¹**

¹ФТИ им. А.Ф.Иоффе, ²Университет ИТМО

Сфокусированный ионный пучок как инструмент для создания прототипов новых конструкций полупроводниковых лазеров 167

Клинков В.А., Павлов Е.А., Семенча А.В.

СПбПУ

Применение методов искусственного интеллекта для прогнозирования свойств материалов ИК диапазона. 172

**Жамойть А.Е., Климович Т.А., Клыбик В.Ю.,
Левчук Д.С.**

ОАО «ИНТЕГРАЛ»

Измерения фотоэлектрических параметров тепловизионных матриц 176

Тропин А.Н.

АО «НИИ «Гириконт»

Оптическое интерференционное покрытие как одномерный фотонный кристалл 179

Володин В.А.^{1,2}, Хамуд Г.А.^{1,2}, Камаев Г.Н.¹

¹ИФП СО РАН, ²НГУ

Фоточувствительные МДП-структуры на основе германо-
силикатных плёнок для УФ, видимого и ближнего ИК диа-
пазонов 182

**Сергеев М.М.¹, Ольхова А.А.², Пушкарева А.Е.¹,
Гресько В.Р.¹, Долгополов А.Д.¹**

¹Университет ИТМО, ²ООО «Московский центр фотоники»

Лазерная модификация пленок селенида свинца для по-
вышения их фоточувствительности 187

**СЕКЦИЯ III – РАЗРАБОТКА И ПРОИЗВОДСТВО СРЕДСТВ
ПОЖАРНОЙ АВТОМАТИКИ: ИЗВЕЩАТЕЛЕЙ ПЛАМЕНИ,
УСТРОЙСТВ КОНТРОЛЯ ПЛАМЕНИ И ДРУГИХ ПРИБОРОВ
СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ**

Белов Д.Ю., Свиридов В.П.

ЗАО «Ростокс-Н»

Сапфировые защитные окна для извещателей
пламени 190

Туровский А.А.

ООО «Инженерный центр «ЭФЭР»

Особенности определения времени инициализации для
автоматических и роботизированных установок пожаро-
тушения 194

Кулагина Л.В., Шефер Э.А.

СФУ

Модернизация функционала сверточной нейросетевой
модели для обнаружения пожара 199

Жилин Н.М., Зонова Ю.С., Корж И.А.

АО «ОНИИП»

Применение пиротехнических энергетических воспламенителей в системах пожаротушения .. 203

Налимова С.С., Крюков Р.С.

СПБГЭТУ «ЛЭТИ»

Газочувствительные композитные наноструктуры
 $\text{ZnO-Fe}_2\text{O}_3$ 207

Бузовкин С.С., Рыбина А.А.

СПБГЭТУ «ЛЭТИ»

Диагностика электрофизических свойств наноструктур
дисульфида молибдена 212

Буй К.Д., Налимова С.С.

СПБГЭТУ «ЛЭТИ»

Импедансная спектроскопия газочувствительных слоев
на основе $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 216

УДК 621.31/.37
ГРНТИ 47.59.31

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАССИВНОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ В ШИРОКОЙ ОБЛАСТИ ЧАСТОТ

Шушпанов Д.В., Дмитриков В.Ф.

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

Предлагаются схемы замещения дросселей и конденсаторов, полученные в результате синтеза измеренных частотных характеристик их комплексных сопротивлений с учетом физических явлений, происходящих в них.

Ключевые слова: дроссель, конденсатор, синтез, схема замещения, комплексное сопротивление.

MODELING OF A PASSIVE ELEMENT COMPONENT BASE IN A WIDE FREQUENCY RANGE

Shushpanov D.V., Dmitrikov V.F.

The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

Equivalent circuits for inductors and capacitors are proposed, obtained as a result of the synthesis of measured frequency characteristics of complex impedances of inductors and capacitors, taking into account the physical phenomena occurring in inductors and capacitors.

Keywords: inductor, capacitor, synthesis, equivalent circuit, impedance.

Любая современная радиоэлектронная аппаратура (РЭА) не обходится без реактивных элементов. Они являются частью сглаживающего фильтра и фильтра радиопомех (ФРП) в современных импульсных источниках электропитания. Поэтому при проектировании РЭА разработчикам необходимо знать частотные характеристики импедансов (комплексных сопротивлений) дросселей и конденсаторов, а также их точные

высокочастотные эквивалентные электрические структурно-параметрические схемы замещения (поведенческие модели).

К сожалению, ни разработчики РЭА, ни производители пассивной элементной компонентной базы (ЭКБ) не понимают, что собой представляют реальные дроссель и конденсатор. Производители ЭКБ оперируют лишь своими физическими параметрами, по которым они сдают и проверяют элементную базу и не являются электротехниками (не создают и не поставляют схемы замещения поставляемых элементов). А разработчики РЭА, не являясь специалистами в материаловедении, тоже не создают схемы замещения пассивных элементов, а лишь используют чьи-то готовые, не особо разбираясь в корректности работы найденных схем замещения.

Измерять комплексные сопротивления пассивных элементов (дроссель и конденсатор) в широкой области частот стали сравнительно недавно. Это позволило увидеть, что схемы замещения конденсатора (рис. 1, 2) и дросселя (рис. 3, 4) в широкой области частот (до 1 ГГц) представляют собой сложную электрическую цепь [1 – 4]. Поэтому использование «старых» или простых схем замещения пассивных элементов не всегда будет корректно при проектировании РЭА.

В докладе предлагаются схемы замещения дросселей и конденсаторов, полученные в результате синтеза измеренных частотных характеристик комплексных сопротивлений пассивных элементов с учетом физических явлений, происходящих в них [1 – 4]. Таким образом, при синтезе схем замещения пассивных элементов была сделана попытка объяснить, почему частотные характеристики (модуль и фаза) комплексного сопротивления конкретного пассивного элемента (дросселя или конденсатора) ведут себя так в широкой полосе частот (до 0,5 – 1 МГц). Это позволит лучше понять физические процессы, протекающие в пассивном элементе, что важно как для разработчика РЭА, так и для разработчика ЭКБ. Для разработчика РЭА это позволит понять, как использовать, а возможно и улучшить частотные характеристики, что позволит построить РЭА с лучшими характеристиками. А для разработчика ЭКБ это может помочь сделать пассивные элементы с лучшими характеристиками. Кроме того, предоставление разработчиком ЭКБ схем замещения выпускаемой продукции сделает разработчика ЭКБ более привлекательным для потребителя, т.к. разработчики РЭА не обладают данной информацией и практически никто из разработчиков ЭКБ её не предоставляет. А для корректной и грамотной разработки РЭА эта информация **необходима**.

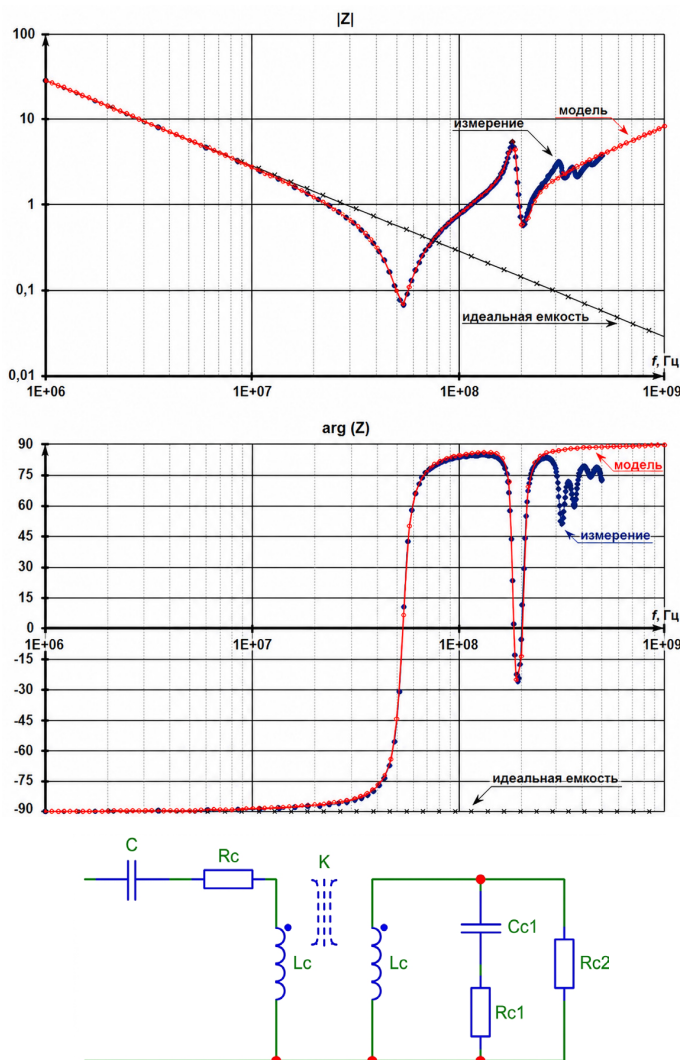


Рисунок 1 – Измеренные и рассчитанные частотные характеристики модуля и фазы комплексного сопротивления и схемы замещения для керамического диэлектрика H90 9250 (диаметр 11,8 мм, толщина 1,4 мм)

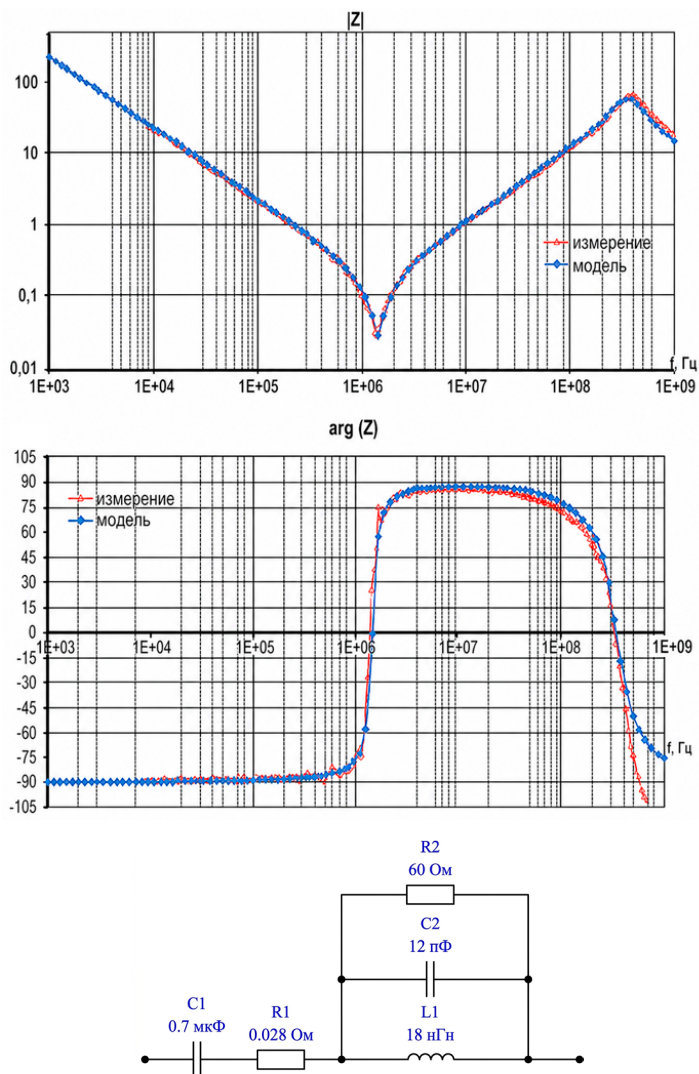


Рисунок 2 – Измеренные и рассчитанные частотные характеристики модуля и фазы комплексного сопротивления и схемы замещения для керамического конденсатора 1 мкФ

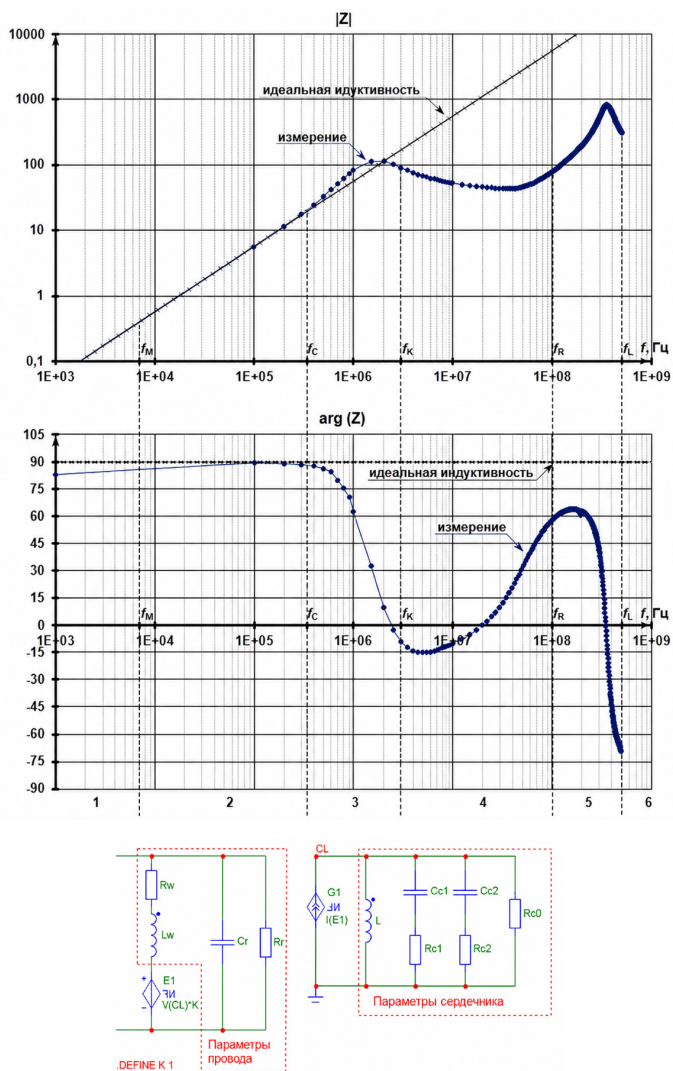


Рисунок 3 – Измеренные частотные характеристики модуля и фазы комплексного сопротивления и схемы замещения для дросселей с сердечником из феррита N87

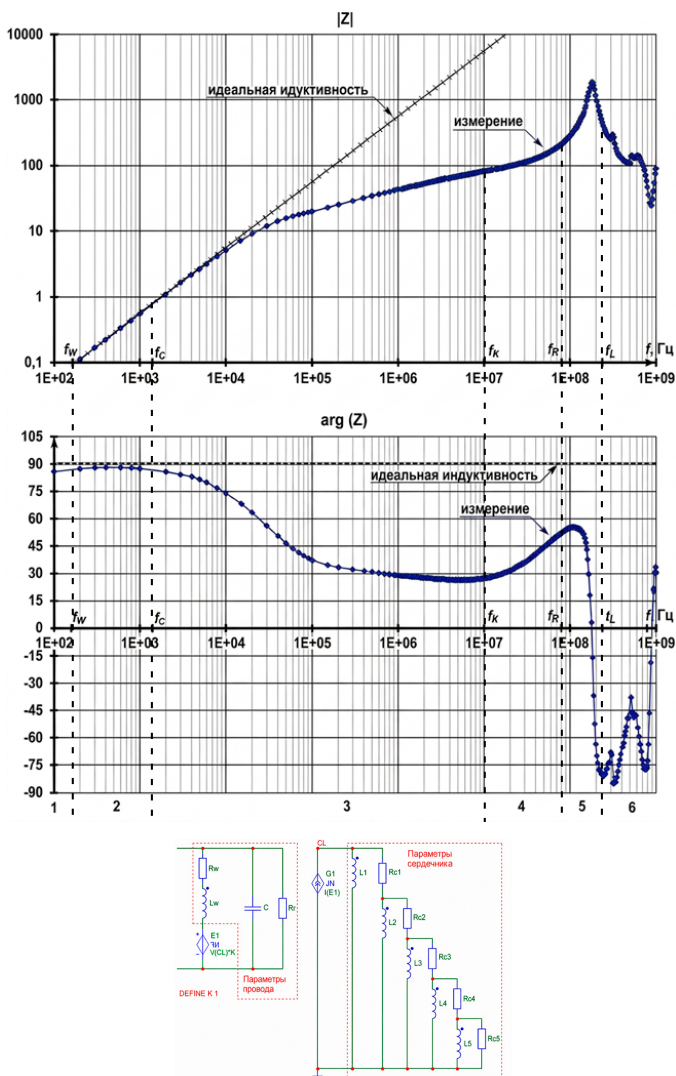


Рисунок 4 – Измеренные частотные характеристики модуля и фазы комплексного сопротивления и схемы замещения для дросселей с сердечником из НКС MSFN-25S-TH

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриков В.Ф., Шушпанов Д.В. Эквивалентная схема замещения дросселя, намотанного на феррите, в широком диапазоне частот (0 Гц – 500 МГц) // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2021. т. 24. № 4. С. 25–45.
2. Дмитриков В.Ф., Шушпанов Д.В., Фоченков Э.А. Эквивалентная схема замещения дросселя на нанокристаллическом сердечнике с большой магнитной проницаемостью // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2022. т. 25. № 4. С. 100–121.
3. Дмитриков В.Ф., Шушпанов Д.В. Эквивалентная схема замещения диэлектрика в широком диапазоне частот (0 Гц – 500 МГц) // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2022. т. 25. № 3. С. 43–57.
4. Dmitrikov V.F., Shushpanov D.V., Kutnyakova D.A. A New Synthesis Technique of High-Frequency Inductor Equivalent Circuits // Proceedings 2023 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). IEEE. 2023. P. 187–193.

УДК 621.317.73
ГРНТИ 59.29.31

ПРОБЛЕМАТИКА ИЗМЕРЕНИЯ ЭКВИВАЛЕНТНОГО ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ (ESR) КОНДЕНСАТОРОВ СОВРЕМЕННЫМИ МЕТРОЛОГИЧЕСКИ ОБЕСПЕЧЕННЫМИ СРЕДСТВАМИ

Ликий А.А., Иванов А.В.

ООО «Остек-Электро»

В докладе критикуется метод измерения эквивалентного последовательного сопротивления (ESR) с помощью RLC-метров широкого потребления как недостоверный и предлагается измерение данного параметра с помощью исследования кривой заряда.

Ключевые слова: эквивалентное последовательное сопротивление, ЭПС, ESR, электролитический конденсатор.

PROBLEMS OF MEASURING THE EQUIVALENT SERIES RESISTANCE (ESR) OF CAPACITORS USING MODERN METROLOGY-ENSURED MEASURING EQUIPMENT

Likiy A.A., Ivanov A.V.

Ostec-Electro, LLC

The article criticizes the method of measuring equivalent series resistance (ESR) using consumer-grade RLC meters as unreliable and suggests measuring this parameter using a charge curve analysis.

Keywords: equivalent series resistance, ESR, electrolytic capacitor.

Конденсатор является неотъемлемым компонентом любой современной электроники, главным параметром которого является ёмкость. Но нельзя забывать о других характеристиках конденсаторов, в особенности электролитических, которые определяют способность выполнять свои функции в РЭА. Среди прочих параметров особо хочется выделить

ESR – эквивалентное последовательное сопротивление (от англ. ESR, Equivalent Series Resistance), которое определяет способность конденсатора отдавать в нагрузку большой ток, а также быстро восполнять затраченную энергию. По сути своей, ESR – это паразитный резистор, который включен последовательно с конденсатором, а наличие такой паразитной величины определяется физико-химическими и технологическими особенностями производства конденсаторов. Очень часто конденсаторы применяются в качестве мгновенного источника тока, а при высоком значении ESR они не в состоянии выполнить свои функции, так как указанное сопротивление ограничивает предельное значение тока, отдаваемого в нагрузку.

К сожалению, способы контроля подобных параметров диктуются широким распространением RLC-метров (измерителей иммитанса): универсальные устройства 3 в 1 призваны решить большинство возникающих проблем. Пользователь данного класса приборов часто подвержен заблуждению, что на дисплее индицируются действительные значения R, L или C измеряемого компонента. На самом деле же RLC-метры физически измеряют импеданс, иными словами – полное сопротивление компонента Z, а дальнейшая математическая обработка позволяет в первом приближении отделить активную составляющую от совокупности реактивных сопротивлений L и C, присутствующих в любом конденсаторе.

Известно, что активное сопротивление не меняет своего значения с ростом частоты, чего нельзя сказать про емкостное и индуктивные реактивные сопротивления. Как следствие, попытка измерять ESR конденсатора на RLC-метре приводит к невозможности получения достоверных значений, так как с ростом частоты индуктивная составляющая интерпретируется как часть активной, что обусловлено принципами работы RLC-метров. Более того, несовершенство подходов в математической обработке сигналов различных производителей RLC-метров не может обеспечить даже единство измерений, пусть и с низкой их достоверностью, когда речь идёт об измерениях на частотах свыше 10 кГц. Также имеет значение тот факт, что реактивная составляющая эквивалентной последовательной индуктивности конденсатора растёт со значением частоты, и отделить это сопротивление от ESR в данном случае при измерении импеданса не представляется возможным.

Действующие российские стандарты не регламентируют в явном виде понятие ESR, а также допустимые методы контроля данного параметра. Единственное упоминание приводится в ГОСТ Р МЭК 60384-1-2003,

где указывается, что, если в ТУ на конденсатор не оговорено иное, контроль ESR следует осуществлять на переменном напряжении. Главным заблуждением предложенных методик является попытка объединить все паразитные параметры конденсатора (как активные, так и реактивные) в единое целое. Акцент внимания на легитимном способе измерения ESR обусловлен характером проблем, которые возникают при отсутствии контроля данного параметра как одного из ключевых. Применительно к электролитическим конденсаторам, большая величина активного сопротивления определяет в том числе нагрев компонента в процессе работы, его надёжность и срок службы, так как систематическое воздействие высоких температур вызывает старение электролита, его высыхание, что в конечном счёте приводит к ещё большему снижению остаточной ёмкости и увеличению ESR, и как следствие – к невозможности выполнения требуемой задачи и нормального функционирования такого компонента в готовом изделии.

Учитывая специфику проблемы, инженерами ООО «Остек-Электро» был разработан прибор для измерения ёмкости и ESR конденсаторов Е7-53, принцип работы которого основан на постоянном токе, благодаря чему стало возможным отделить действительно активную составляющую конденсатора от всех прочих паразитных параметров, косвенно влияющих на характеристики компонента. Благодаря наличию прецизионного источника стабильного тока, заряд идеального конденсатора, у которого ЭПС стремится к нулю, представляет собой линейно нарастающий график напряжения. В случае измерения компонента с ESR уже в несколько мОм, на графике напряжения сформируется две ступеньки, прямо пропорционально соотносящиеся с величиной ESR: первая ступень положительной полярности возникнет в начальный момент времени заряда конденсатора, так как при подаче постоянного тока на чисто активном сопротивлении сразу возникает разница потенциалов, вторая же ступень отрицательной полярности возникнет в конце процесса заряда, так как подача постоянного тока прекращается.

Дополнительно стоит отметить, что в отличие от RLC-метров, в описаниях типа и методиках поверки которых зачастую фигурируют лишь эталоны сопротивлений, а измерения нормируются на достаточно низкой частоте, Е7-53 внесён в ГПСИ РФ, а его метрологические характеристики в явном виде обеспечивают измерения именно эквивалентного последовательного сопротивления ESR конденсаторов в широком диапазоне значений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gasperi M.L. A Method for Predicting the Expected Life of Bus Capacitors // IEEE Industry Applications Society, Annual Meeting. 1997.
2. Mirsky G. Determining end-of-life, ESR, and lifetime calculations for electrolytic capacitors at higher temperatures // EDN. 2008. August 20.
3. ГОСТ Р МЭК 60384-1-2003. Конденсаторы постоянной ёмкости для электронной аппаратуры. Часть 1. Общие технические условия. М.: ИПК Издательство стандартов, 2004.
4. ГОСТ 28885-90. Конденсаторы. Методы измерений и испытаний. М.: ИПК Издательство стандартов, 1999.

УДК 654.739

ГРНТИ 49.33.29

АППАРАТУРА ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ КОНДЕНСАТОРОВ

Гордейчук А.П.

ООО «ИнтелТроник»

Предлагаются методы повышения точности измерений параметров конденсаторов. В разработанном измерителе ёмкости и тангенса угла потерь используется фазовый компенсатор и ёмкостные опорные элементы. Усовершенствован алгоритм уравнивания, позволяющий уменьшить время измерения.

Ключевые слова: измеритель ёмкости и тангенса угла потерь конденсаторов, импеданс.

EQUIPMENT FOR PRECISE MEASUREMENTS OF CAPACITOR PARAMETERS

Gordeychuk A.P.

IntelTronic, LLC

Methods of increasing the accuracy of measurements of capacitor parameters are proposed. The developed device for measuring capacitance and loss tangent uses a phase compensator and capacitive reference elements. The balancing algorithm has been improved to reduce the measurement time.

Keywords: capacitor capacitance and loss tangent meter, impedance.

Отечественной электронной промышленностью выпускается ряд типов электрических конденсаторов с низкой погрешностью параметров. Для контроля параметров этих конденсаторов требуется прецизионная измерительная техника. Несмотря на то, что рынок измерительных приборов очень велик, выбрать необходимую измерительную технику не так просто. Выбор осложняется еще и тем, что погрешность измерения современных приборов сильно зависит от ёмкости конденса-

тора, а в маркетинговых рекламных материалах приводится наилучшая достижимая погрешность прибора (как правило, для узкого диапазона емкостей).

Ряд отечественных приборов, разработанных ещё в 70 - 80-х годах прошлого века, обладает очень низкой погрешностью измерений тангенса угла потерь, недоступной для зарубежных приборов, представленных на рынке измерительной техники [1]. Так, например, прибор МЦЕ-17А обеспечивает погрешность измерения тангенса угла потерь в пределах $1 \cdot 10^{-4}$, а один из лучших зарубежных приборов, измеритель ёмкости Keysight E4981A – всего лишь $6 \cdot 10^{-4}$.

Анализ характеристик современных зарубежных измерителей импеданса показывает, что современные приборы стараются делать универсальными (работающими в широкой полосе частот измерительного напряжения). Во входных цепях этих приборов часто используется широкополосная автобалансная мостовая схема (рис. 1). На низких частотах (до 10 кГц) мостовая автобалансная схема работает неплохо, но при дальнейшем повышении частоты измерений, увеличивается фазовый сдвиг в усилителе А, вследствие чего ухудшается балансирование схемы. Остаточное напряжение в точке баланса возрастает, что приводит к увеличению погрешности. Кроме того, фазовый сдвиг зависит от температуры, что приводит к увеличению погрешности в диапазоне температур.

В результате, широкополосные приборы не могут обеспечить требуемую погрешность по $\text{tg}\delta$.

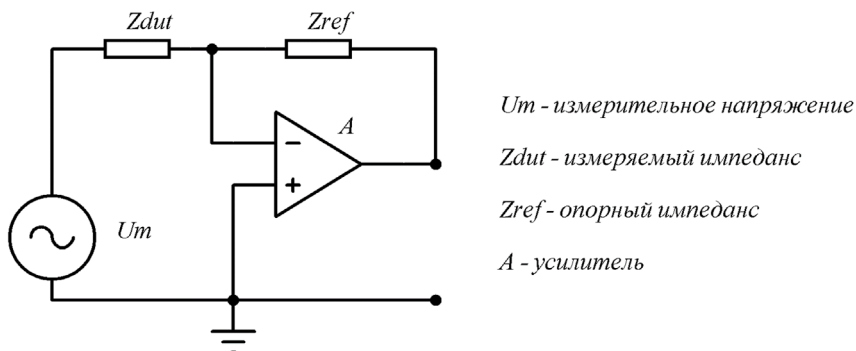


Рисунок 1 – Автобалансная мостовая схема

Поскольку погрешности измерений внесены в технические условия, производитель конденсаторов вынужден использовать для измерений старые отечественные приборы, эксплуатировать которые становится непросто, ввиду их физического износа.

Поэтому для решения проблем с парком измерительной техники, автор, совместно с НИИ «Гириконт», разработал измерители ёмкости с повышенной точностью измерения тангенса угла потерь, для работы на частотах 1 кГц и 1 МГц. Приборы МЦЕ-26А и МЦЕ-23А, по техническим параметрам, предназначены для замены устаревших приборов МЦЕ-15АМ и МЦЕ-13АМ. Приборы прошли все необходимые испытания и были внесены в государственный реестр средств измерения.

Приборы серии МЦЕ – узкополосные и рассчитаны на работу на фиксированных частотах. Погрешности измерения удалось уменьшить, за счёт реализации схем компенсации фазовых сдвигов.

Значительное внимание в приборах МЦЕ уделено также опорным элементам мостовой схемы. В качестве опорных элементов в большинстве измерителей импеданса используются прецизионные резисторы.

Резисторы хорошо работают в качестве опорных элементов на низких частотах и при измерениях больших значений ёмкости, когда их паразитные параметры не влияют на результат измерения. Паразитная ёмкость опорного резистора, на высоких частотах начинает оказывать влияние на результат измерения. Поскольку значение паразитной ёмкости и её стабильность не гарантируется производителем, погрешность измерения возрастает. Кроме того, при выборе в качестве опорного элемента резистора, на погрешность измерения тангенса угла потерь, оказывает влияние паразитная ёмкость монтажа, значение которой также не может быть гарантировано.

В приборах серии МЦЕ, в качестве опорных элементов при измерениях малых ёмкостей и на высокой частоте измерения, используются прецизионные конденсаторы.

При использовании опорных конденсаторов, схема измерения несколько усложняется, но усложнение схемы компенсируется уменьшением погрешности и увеличением стабильности измерения $\text{tg}\delta$.

Уменьшению погрешности и увеличению скорости измерений способствует также, применяемый в приборах МЦЕ алгоритм уравнивания В.Ю. Кнеллера [2].

Результаты сравнения некоторых зарубежных и разработанного прибора по основным параметрам сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Параметры измерителей ёмкости (импеданса)
на частоте 1 МГц

Тип прибора	Погрешность по С, %	Погрешность по $\text{tg}\delta$	Время измерения, с
Е7-20, Беларусь	3	не нормируется	0,4
Keysight E4981A, США	0,15	$6 \cdot 10^{-4}$	0,01
МЦЕ-23А, Рос- сия	0,2	$2 \cdot 10^{-4}$	0,04

ЛИТЕРАТУРА

1. Эпштейн С.Л. Измерение характеристик конденсаторов. – Л.: Энергия, 1971. – 220 с.
2. Кнеллер В.Ю. Автоматическое измерение составляющих комплексного сопротивления. – М.: Энергия, 1967. – 366 с.

УДК 543.427.4
ГРНТИ 59.35.33

СОВРЕМЕННЫЕ РЕШЕНИЯ В ОБЛАСТИ РЕНТГЕНОСПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА: ОБЗОР ОБОРУДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЙ

Андреев Д.С.

ООО «Группа Ай-Эм-Си»

В работе представлен обзор линейки энергодисперсионных спектрометров WEPER. Рассмотрены технические особенности моделей с SDD-детекторами и графеновыми окнами, возможности автоматизации анализа и метрологические характеристики. Описаны области применения оборудования в геологии, металлургии и нефтехимии для высокоточного определения элементов от F до U.

Ключевые слова: аналитика, рентгеноспектральный анализ, энергодисперсионный метод, WEPER, DetectX, спектрометр.

MODERN SOLUTIONS IN X-RAY SPECTRAL ANALYSIS: OVERVIEW OF EQUIPMENT AND TECHNOLOGIES

Andreev D.S.

IMC Group, LLC

The paper presents an overview of the WEPER line of energy-dispersive spectrometers. The technical features of models equipped with SDD detectors and graphene windows are discussed, along with analysis automation capabilities and metrological characteristics. The paper describes the equipment's application areas in geology, metallurgy, and the petrochemical industry for the high-precision determination of elements ranging from F to U.

Keywords: analytics, X-ray spectral analysis, energy-dispersive method, WEPER, DetectX, spectrometer.

Условиях современного промышленного производства и научно-

исследовательских задач критически важным становится обеспечение высокоточного, экспрессного и неразрушающего контроля элементного состава материалов. Рентгенофлуоресцентный анализ (РФА) прочно утвердился как один из ключевых методов в металлургии, геологии, нефтехимии и экологии [1, 2]. В данном докладе представлен обзор новой линейки энергодисперсионных спектрометров серии WEPER производства компании Changsha Kaiyuan Instruments Co., LTD, а также портативного решения DetectX [3]. Рассматриваемые приборы внесены в Государственный реестр средств измерений РФ, что подтверждает их высокие метрологические характеристики.

Основу линейки составляют модели XRF2510, XRF2500AL, XRF2500E и XRF2501. Несмотря на различия в конструкции и назначении, все приборы объединяет использование передовой компонентной базы.

Ключевым преимуществом является использование кремниевых дрейфовых детекторов (SDD) с термоэлектрическим охлаждением (элемент Пельтье). Особенностью детекторов является наличие входного окна из графена. Использование графена вместо традиционного бериллия значительно повышает светосилу детектора в области мягкого рентгеновского излучения, что критически важно для определения легких элементов [3].

Технические возможности приборов позволяют определять элементы в диапазоне от фтора (F, Z=9) до урана (U, Z=92) в концентрациях от 0,0001% до 99,995%. Энергетическое разрешение детекторов составляет ≤ 127 эВ (на линии MnK α), а скорость счета достигает 1 миллиона импульсов в секунду, что обеспечивает высокую статистическую точность измерений за короткое время экспозиции.

Модель XRF2510 (рис. 1) представляет собой напольное решение для крупных лабораторий с большим потоком проб. Прибор оснащен интегрированной системой «роборука» и магазином на 60 позиций для образцов диаметром до 40 мм [3]. Это позволяет проводить серийные анализы в автоматическом режиме без участия оператора.

Система возбуждения базируется на рентгеновской трубке (50 кВ, 1000 мкА) с возможностью выбора материала анода (Rh, Ag, Cu, Pd, W) и тремя автоматическими фильтрами первичного излучения. Важной особенностью является возможность вращения образца для нивелирования неоднородности пробы. Управление осуществляется через встроенный цветной сенсорный дисплей диагональю 15 дюймов.

Для лабораторий, требующих баланса между автоматизацией

и компактностью, разработана модель XRF2500AL (рис. 2). Спектрометр выполнен в настольном форм-факторе и оснащен автоматической турелью (автоподатчиком) на 12 позиций [3]. Это упрощает анализ серии образцов, позволяя загружать партии без остановки работы.

Прибор работает под управлением внешнего ПК, что позволяет использовать расширенные возможности программного обеспечения для обработки спектров. Аналитическая камера поддерживает работу в вакууме, атмосфере воздуха или гелия, что расширяет спектр анализируемых матриц, включая жидкости и легкие порошки.

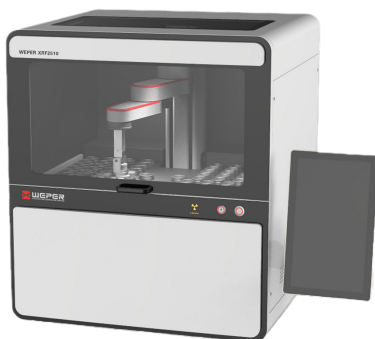


Рисунок 1 – Роботизированный спектрометр WEPER XRF2510 для высокопроизводительных лабораторий



Рисунок 2 – Настольный спектрометр XRF2500AL для анализа твердых и жидких проб

Модель XRF2500E позиционируется как универсальное решение для широкого круга задач. Прибор реализует принцип энергодисперсионной спектроскопии, измеряя энергию вторичного флуоресцентного излучения, возникающего при переходах электронов в оболочках атомов [1]. Особое внимание в данной модели уделено программному обеспечению, поддерживающему метод фундаментальных параметров (FP). Это позволяет проводить количественный анализ сложных образцов без необходимости построения трудоемких эмпирических калибровок с использованием большого количества стандартных образцов [2, 4]. Габариты прибора (680×550×400 мм) и масса 60 кг делают его оптимальным для стационарного размещения на лабораторном столе.

Самая компактная модель в линейке — XRF2501 (масса 25 кг). Она предназначена для использования в мобильных лабораториях или ограниченных пространствах. Прибор оснащен встроенным 10-дюймовым сенсорным экраном, что исключает необходимость во внешнем компьютере. Опционально подключаемый внешний вакуумный насос позволяет проводить анализ легких элементов даже в полевых условиях. Низкое энергопотребление (220 В, 3 А) и возможность работы в среде гелия делают его незаменимым инструментом для экспресс-анализа на удаленных объектах.

Отдельного внимания заслуживает модель DetectX (рис. 3) — портативный спектрометр пистолетного типа. Прибор сочетает в себе высокую чувствительность лабораторных моделей с мобильностью. Он предназначен для оперативной сортировки металлолома, входного контроля сырья на складах и геологической разведки непосредственно «в поле» [3]. Несмотря на малые размеры, DetectX обеспечивает высокую точность идентификации марок сплавов и определения химического состава. Технические возможности DetectX позволяют определять элементы в диапазоне от магния (Mg, Z=12) до урана (U, Z=92). Энергетическое разрешение детекторов составляет ≤ 135 эВ (на линии MnK α), а время анализа от 2 до 10 секунд, что обеспечивает высокую статистическую точность измерений за короткое время экспозиции.

Рассмотренное оборудование охватывает ключевые отрасли промышленности:

1. Геология и минералогия: Анализ руд, почв и минералов от качественной оценки до точного количественного состава [4, 5].
2. Metallургия и химия: Контроль технологических процессов, анализ готовой продукции, шлаков и сырья [6].

3. Нефтяная промышленность: Определение серы в нефти, анализ присадок в маслах, мониторинг продуктов износа в смазочных материалах.

Программное обеспечение спектрометров WEPER имеет интуитивно понятный интерфейс и поддерживает различные аналитические методы: от простых эмпирических регрессий до сложных алгоритмов метода фундаментальных параметров.

В заключение хотелось бы отметить, что линейка спектрометров WEPER демонстрирует современный подход к аппаратурному оформлению рентгеноспектрального анализа. Комбинация высокопроизводительных SDD-детекторов с графеновыми окнами, вариативность систем подачи проб (от ручной до роботизированной) и поддержка передовых алгоритмов обработки данных позволяет решать практически любые аналитические задачи. Внесение приборов в Государственный реестр СИ РФ открывает широкие возможности для их внедрения в аккредитованных лабораториях и на ответственных производствах.



Рисунок 3 – Портативный спектрометр пистолетного типа DetectX

ЛИТЕРАТУРА

1. Блохин М. А., Швейцер И. Г. Рентгеноспектральный справочник. М.: Наука, 1982. 376 с.
2. Grieken R. V., Markowicz A. A. Handbook of X-Ray Spectrometry. 2nd ed. New York: Marcel Dekker Inc., 2002.
3. Техническая документация и руководство по эксплуатации спектрометров серии WEPER XRF. Changsha Kaiyuan Instruments Co., Ltd, 2023.

4. Ревенко А. Г. Рентгеноспектральный флуоресцентный анализ природных материалов. Новосибирск: ВО «Наука», 1994.

5. ГОСТ 33219-2014. Угли каменные, бурые и антрациты. Рентгено-флуоресцентный метод определения элементного состава. М.: Стандартиформ, 2016.

6. ГОСТ 28033-89. Сталь. Рентгенофлуоресцентный метод анализа. М.: Стандартиформ, 2006.

УДК 537.632/.636

ГРНТИ 29.03.35

ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ МОДУЛЬ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ МАГНИТНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

**Козодаев Д.А.¹, Мошников В.А.², Новиков И.А.^{1,2},
Сотник Г.П.^{1,2}**

¹ООО «Активная Фотоника»,

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Данная работа посвящена созданию вспомогательного модуля, создающего внешнее постоянное магнитное поле в области размещения образца в сканирующем зондовом микроскопе. Конструкция модуля позволяет размещать образец так, чтобы воздействие на него оказывалось либо в вертикальной, либо в горизонтальной плоскости.

Ключевые слова: магнитно-силовая микроскопия (МСМ), сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ), источник внешнего магнитного поля, тонкие пленки.

AUXILIARY MODULE OF THE EXTERNAL MAGNETIC FIELDS FOR MAGNETIC FORCE MICROSCOPY

Kozodaev D.A.¹, Moshnikov V.A.², Novikov I.A.^{1,2}, Sotnik G.P.^{1,2}

¹Active Photonic, LLC,

²Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI» named after V. I. Ulyanov (Lenin)

This work is devoted to the development of an auxiliary module that creates an external permanent magnetic field in the area of sample placement in a scanning probe microscope. The design of the module allows you to place the sample so that it's affected either vertically or horizontally.

Keywords: magnetic force microscopy (MFM), scanning probe microscopy (SPM), external magnetic field source, thin films.

В современной науке активно развивается направление,

посвященное проектированию и анализу магнитных структур низкой размерности. Особый интерес представляет феномен передачи спинового момента, который может привести к усовершенствованию магнитных запоминающих устройств в аспектах их термостабильности и плотности записи [1]. Многочисленные работы в сфере магноники нацелены на повышение энергонезависимости и уменьшение габаритов подобных приборов [2].

Материаловедческий анализ вышеуказанных структур часто осуществляется методом магнитно-силовой микроскопии (МСМ) [3]. Принцип действия МСМ основан на использовании зонда с магнитным покрытием [4]. При сближении с образцом между ними возникают магнитные силы, вызывающие изгиб кантилевера.

Для практического внедрения магнитных наноматериалов данных, полученных классическим МСМ, может быть недостаточно; критически важно понимать их поведение во внешних магнитных полях. В представленной конструкции для создания такого поля решено было использовать постоянные магниты как наиболее простой в реализации вариант. Источник магнитного поля состоит из постоянного магнита, от полюсов которого проведены магнитопроводы, направленные к области размещения образца.

В зависимости от того, каким образом ориентированы постоянные магниты, возможно регулировать величину поля в пространстве между магнитопроводами. Схематически это представлено на рис. 1.

Формой линий магнитной индукции можно управлять, изменяя геометрию магнитопроводов вблизи образца. Было предложено создать асимметричную форму магнитопроводов таким образом, чтобы высоты магнитопроводов были различны (рис.2).

Данная конструкция была промоделирована в COMSOL Multiphysics. Благодаря асимметричному устройству магнитопроводов, удается достичь изгиба силовых линий магнитного поля таким образом, чтобы создать в рамках одной конструкции две области с разной ориентацией поля относительно поверхности образца.

Поскольку величина напряженности магнитного поля в рабочем зазоре магнитной системы в основном определяется характеристиками постоянного магнита, требуется применение магнита с максимально высокими значениями коэрцитивной силы и намагниченности насыщения, такого как неодимовый магнит $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$.

На основе построенных теоретических моделей был реализован

прототип, представленный на рис. 3.

Интеграция данного модуля с базовым блоком сканирующего зондового микроскопа позволяет проводить магнитно-силовые измерения тонкопленочных магнитных материалов с возможностью приложения внешнего магнитного поля в произвольной ориентации — как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости относительно поверхности образца [5, 6].

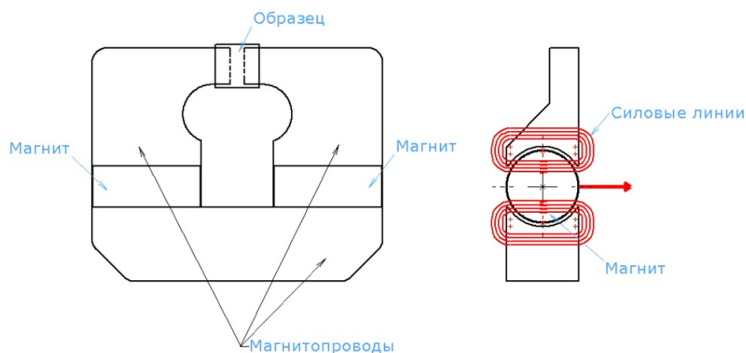


Рисунок 1 – Источник внешнего магнитного поля.
Силовые линии постоянного магнита ориентированы
ортогонально направлению магнитопроводов

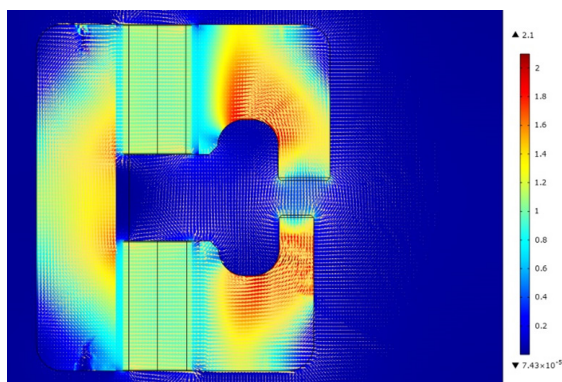


Рисунок 2 – Промоделированный источник
внешнего магнитного поля

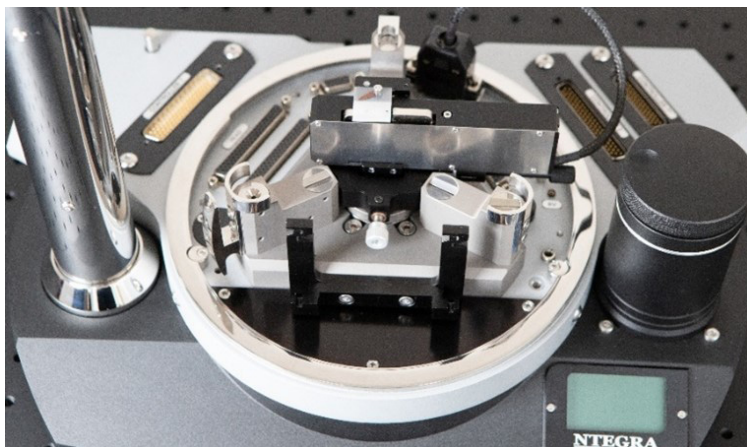


Рисунок 3 – Прототип источника внешнего магнитного поля

ЛИТЕРАТУРА

1. Ralph D.C., Stiles M.D. Spin transfer torques // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2008. Vol. 320. No. 7. P. 1190–1216.
2. Калябин Д.В., Никитов С.А. Современное состояние исследований в спинтронике и магнотронике // *Проблемы дистанционного зондирования, распространения и дифракции радиоволн: Конспекты лекций*. 2023. № 1.
3. Shvartsman V.V., Lupascu D.C., Alawneh F. [et al.] Converse magnetoelectric effect in CoFe₂O₄-BaTiO₃ composites with a core-shell structure // *Smart Materials and Structures*. 2011. Vol. 20. No. 7. P. 075006.
4. Миронов В.Л. Магнитно-резонансная силовая микроскопия ферромагнитных наноструктур: учеб. пособие. Нижний Новгород: Институт физики микроструктур РАН, 2016. 42 с.
5. Козодаев Д.А., Новиков И.А., Костромин С.В. Источник внешнего магнитного поля для магнитно-силовой микроскопии // Патент на изобретение RU 2833421 C1, 21.01.2025. Заявка № 2024111385 от 25.04.2024.
6. Kozodaev D.A., Novikov I.A., Kostromin S.V. [et al.] External magnetic field source for nanoscale research // *The 22nd International Conference on Magnetism: Book of Abstracts (ICM 2024)*, Bologna, Italy, 30 июня – 05 июля 2024 года. Bologna, 2024.

УДК 621.315.612

ГРНТИ 29.19.31

ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ГРАНУЛЯЦИИ ПОРОШКА НА ИМПУЛЬСНУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ ОКСИДНО-ЦИНКОВЫХ ВАРИСТОРОВ

Архипов И.А., Мишин П.А., Смирнова Н.Ю.

АО «Хакель»

В работе проведён сравнительный анализ влияния технологии подготовки порошка на характеристики оксидно-цинковых варисторов. Исследованы два метода: традиционный помол с сушкой и распылительная сушка с комплексной органической связующей системой. Установлено, что использование распылительной сушки позволяет получить более однородную структуру порошка и повысить предельный импульсный ток варисторов в 2 раза по сравнению с традиционной технологией.

Ключевые слова: оксидно-цинковые варисторы, микроструктура, распылительная сушка, импульсная устойчивость.

INFLUENCE OF POWDER GRANULATION METHOD ON THE PULSE STABILITY OF ZINC OXIDE VARISTORS

Arkhipov I.A., Mishin P.A., Smirnova N.Y.

Hakel, JSC

The work presents a comparative analysis of the influence of powder preparation technology on the characteristics of zinc oxide varistors. Two methods were investigated: traditional grinding with drying and spray drying with a complex organic binder system. It was found that the use of spray drying allows to obtain a more homogeneous powder structure and increases the limiting pulse current of varistors by 2 times compared to the traditional technology.

Keywords: zinc oxide varistors, microstructure, spray drying, pulse stability.

Оксидно-цинковые варисторы (ZnO-MOV) широко используются для защиты электрооборудования от импульсных перенапряжений. Их характеристики критически зависят от микроструктуры керамики, которая определяется технологией подготовки исходного порошка [1, 2]. В последние годы возрастающий интерес вызывает метод распылительной сушки, позволяющий получать гранулы с узким распределением размеров и улучшенной текучестью [3, 4].

Исследовались два типа порошков с одинаковым составом на основе системы ZnO с добавками Bi_2O_3 , Sb_2O_3 , Co_3O_4 , MnO_2 и др. Порошок A_1 получали традиционным методом: помол в шаровой мельнице, сушка, добавление связующего. Порошок A_2 получали методом распылительной сушки с комплексной органической связкой. Прессование образцов проводили на прессе ПКТУ-25, для образцов материала A_1 максимальное давление прессования составляло 140 МПа (при дальнейшем увеличении давления возникало расслаивание), для порошка A_2 — 210 МПа. Обжиг осуществляли по двухступенчатому режиму: медленный нагрев со скоростью 3 °С/мин до 400 °С с выдержкой 2 ч (удаление связующего), затем спекание с выдержкой 2 ч при 1100 °С. Охлаждение проводилось в режиме естественного остывания печи.

Контактные площадки формировались методом нанесения серебрясодержащей пасты с последующим вжиганием при 780 °С. Для определения распределения частиц по размеру был проведен гранулометрический анализ порошков с использованием лазерного дифрактометра Malvern Mastersizer. Микроструктурные исследования порошков проводили с помощью растровой электронной микроскопии (Tescan Vega II) с ЭДС-анализом (INCA X-MAX). Измерение классификационного напряжения, коэффициента нелинейности и тока утечки проводили с помощью тестера варисторов Jinko JK 2517. Для оценки импульсной устойчивости образцов варисторов провели импульсные испытания с использованием генератора Hakel Gun HG 60/60F (форма импульса 8/20 мкс). Для регистрации осциллограмм напряжения и тока был использован осциллограф Tektronix TDS 2012B.

Гранулометрический анализ показал существенное различие в распределении частиц. Для порошка A_1 характерно наличие крупных агломератов ($d_{90} = 390,44$ мкм), в то время как порошок A_2 демонстрирует узкое распределение ($d_{90} = 49,93$ мкм). Микроструктурные исследования подтвердили высокую химическую и морфологическую однородность порошка A_2 , тогда как для A_1 наблюдалась выраженная агломерация и

сегрегация компонентов. Электрические характеристики представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Электрические параметры варисторов

Материал		A ₁	A ₂
Электрические параметры образцов до испытаний			
Классификационное напряжение, U _к , В	Прямая полярность	398,6	431,5
	Обратная полярность	401,4	433,2
Коэффициент нелинейности, α	Прямая полярность	69,7	69,7
	Обратная полярность	68,2	68,7
Ток утечки, I _{ут} , мкА	Прямая полярность	0,1	0,2
	Обратная полярность	0,0	0,1
Напряжение ограничения U _{огр} , В		1240	1340
Максимальный импульсный ток I _{max} , А		3440	6880
Электрические параметры образцов после испытаний, одиночный импульс 8/20			
Классификационное напряжение, U _к , В	Прямая полярность	397,5	411,1
	Обратная полярность	390,9	387,8
ΔU _к , %	Прямая полярность	-0,28%	-4,73%
	Обратная полярность	-2,62%	-10,48%
Коэффициент нелинейности, α	Прямая полярность	41,8	25,4
	Обратная полярность	35,6	21,2
Ток утечки, I _{ут} , мкА	Прямая полярность	1,3	7,8
	Обратная полярность	2,3	13,5

До испытаний варисторы на основе материалов A₁ и A₂ имели сопоставимые характеристики: классификационное напряжение (U_к ≈ 430 В), высокий коэффициент нелинейности (α ≈ 69) и низкие токи утечки (0,0–0,2 мкА), что подтверждает качественное формирование межзеренных барьеров. В процессе испытаний предельные значения оказались выше у материала A₂ (U_{огр} = 1340 В, I_{max} = 6880 А против 1240 В и 3440 А для A₁), что указывает на почти двукратное превосходство по способности рассеивать энергию.

После испытаний наблюдалась деградация параметров у обоих материалов, более выраженная для материала A_2 вследствие принятых больших нагрузок: снижение U_k (до -10,5 %), уменьшение α и рост токов утечки (7,8–13,5 мкА). Тем не менее, варисторы из материала A_2 обладают значительно большим запасом по энергоёмкости и обеспечивают более надёжную защиту оборудования от мощных импульсных перенапряжений.

Показано, что распылительная сушка формирует узкое гранулометрическое распределение и исключает агломераты, что обеспечивает двукратное повышение импульсной устойчивости варисторов. Однако, зафиксированная деградация параметров при предельных нагрузках указывает на необходимость оптимизации состава и оценки долговременной стабильности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gupta T.K. Application of zinc oxide varistors // Journal of the American Ceramic Society. 1973. Vol. 55. No. 10. P. 493–500.
2. Clarke D.R. Varistor ceramics // Journal of the American Ceramic Society. 1999. Vol. 82. No. 3. P. 485–502.
3. Nahm C.W. Influence of Bi_2O_3 and Sb_2O_3 on ZnO varistors // Ceramics International. 2002. Vol. 28. No. 1. P. 63–70.
4. Matsuoka M. Non-ohmic properties of ZnO ceramics // Japanese Journal of Applied Physics. 1971. Vol. 10. No. 6. P. 736–746.

УДК 621.319.4
ГРНТИ 47.59.29

МНОГОСЛОЙНЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ: РАЗВИТИЕ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ НАПРАВЛЕНИЯ

Гордеев П.С., Коршак М.Н.

АО «НИИ «Гириконд»

Описана конструкция многослойных керамических конденсаторов и способы увеличения их емкости. Рассмотрены два направления дальнейшего развития многослойных керамических конденсаторов в производстве АО «НИИ «Гириконд»: разработка конденсаторов с никелевыми электродами и разработка новых серий конденсаторов узкого применения с электродами из драгоценных металлов.

Ключевые слова: многослойный керамический конденсатор, PME, BME.

MULTILAYER CERAMIC CAPACITORS: EVOLUTION AND COMPETITIVENESS ASSURANCE

Gordeev P.S., Korshak M.N.

Research Institute Girikond, JSC

Construction of multilayer ceramic capacitors and methods of capacitance increase are described. Two directions of evolution of multilayer ceramic capacitors in JSC Research Institute Girikond production are reviewed: development of base metal electrode capacitors and development of new series of precious metal electrode capacitors with narrow application.

Keywords: multilayer ceramic capacitor, PME, BME.

Конструкция многослойного керамического конденсатора (МКК) (рис. 1) представляет собой многослойный монолитный пакет, состоящий из чередующихся слоев керамического диэлектрика и металлического электрода [1]. Электроды выходят на противоположные

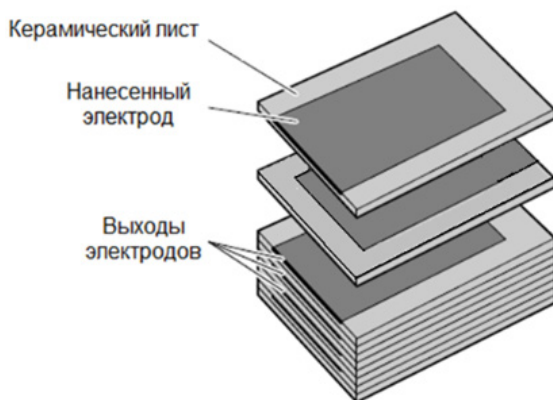


Рисунок 1 – Конструкция многослойного керамического конденсатора

Основным направлением развития МКК является улучшение потребительских характеристик, наиболее важной из которых является удельная емкость. Емкость конденсатора определяется по формуле:

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S (N_e - 1)}{d}$$

Исходя из формулы, увеличения емкости конденсатора можно добиться путем:

- применения керамических материалов с большей диэлектрической проницаемостью (не ухудшая группу температурной стабильности);
- увеличения активной площади (увеличение размера конденсатора, но существует тенденция к миниатюризации изделий);
- уменьшения толщины диэлектрика (снижение толщины диэлектрика ведет к уменьшению рабочего напряжения);
- увеличения числа электродов.

Следует отметить, что уменьшение толщины диэлектрика и увеличение количества электродов – основные способы увеличения емкости керамического конденсатора.

В качестве электродов в МКК отечественного производства используются дорогостоящие драгоценные металлы: Pt/Pd, сплав Ag/Pd [2]. Следует отметить, что из-за достаточно большого спроса на палладий и

его малой распространенности в природе мировые цены на него нестабильны, что сказывается и на стоимости компонентов, и на стоимости изготовленных МКК. Данный фактор обуславливает необходимость поиска альтернативных материалов для внутренних электродов МКК: по примеру научно-технических достижений зарубежных разработчиков и производителей МКК перспективным для применения является никель. В нашем институте работы по материалам для никелевого электрода проводились в середине 80-х годов, но не были завершены из-за отсутствия финансирования, которое требовалось для глубокой модернизации технологий в производстве. Также предварительные исследования показали отсутствие высокой надежности импортных МКК, которые серийно выпускались и были доступны для изучения.

Дальнейшее развитие конкурентоспособной номенклатуры отечественных МКК включает в себя разработку новых серий узкого применения с электродами из драгоценных металлов.

В АО «НИИ «Гириконт» формируется научно-технический задел по развернутым МКК с низким значением ESL, которые будут аналогами EPCOS (TDK) серии C, Murata серия LW, LLL со следующими характеристиками: группы TCE МПО и Н20; размеры 0,8×1,6...1,6×3,2 мм; Уном= 6,3...50 В. Ключевыми преимуществами таких конденсаторов являются улучшенные значения ESR и ESL благодаря размещению электродов вдоль длинной стороны чипа и возможность их использования в более широком интервале частот.

К перспективным направлениям также стоит отнести работы по конденсаторным сборкам (MEGACAP), которые будут аналогами EPCOS (TDK) серия CKG, MURATA серия KRM со следующими характеристиками: группы TCE МПО, Н20, Н90; размеры 3,2×2,5...12×10 мм; Уном= 16...630 В. Ключевыми преимуществами таких МКК являются металлические выводы, которые снижают воздействие термоударов, обеспечивая отличные характеристики при монтаже и низкие значения ESR и ESL, благодаря которым они хорошо подходят для высокочастотных источников питания постоянного тока.

В рамках развития конкурентоспособной номенклатуры отечественных МКК с электродами из неблагородных металлов на сегодняшний день в АО «НИИ «Гириконт» закуплено оборудование для обжига заготовок конденсаторов в защитной среде, необходимое для производства конденсаторов с никелевыми электродами, ведутся работы по разработке материалов и новой серии керамических конденсаторов

неблагородных металлов (технология ВМЕ).

В мировой практике технология ВМЕ используется более 30 лет. В 2015 году фирма AVX стала первой компанией, получившей спецификацию NASA S311-H838, разрешающую применять конденсаторы ВМЕ в космической промышленности.

Большинство (~99%) мировых производителей МКК используют ВМЕ технологию. Использование электродов этого типа позволяет удерживать достаточно низкие и стабильные цены на керамические конденсаторы при сохранении высокого качества выпускаемой продукции.

К преимуществам МКК с технологией ВМЕ можно отнести толщину диэлектрика менее 1 мкм, а также пористость диэлектрика менее 1%. Диэлектрик МКК с технологией ВМЕ имеет более плотную и однородную микроструктуру с меньшим размером зерен, чем у МКК с электродами из благородных металлов (при меньшей толщине диэлектрика МКК с технологией ВМЕ имеют такую же надежность, что и МКК с электродами из благородных металлов), отсюда выше электрическая прочность. МКК с технологией ВМЕ могут быть изготовлены с большим количеством слоев (более 1000), чем МКК с электродами из благородных металлов (меньше разница между коэффициентами усадки материалов диэлектрика и электродов при обжиге).

ЛИТЕРАТУРА

1. Ротенберг Б.А. Керамические конденсаторные диэлектрики. СПб.: Типография ОАО НИИ «Гириконд», 2000. 246 с.
2. Иманов Г.М., Козловский Л.В., Ротенберг Б.А. Технология керамических конденсаторов. СПб.: ООО «ОМ-ПРЕСС», 2004. 232 с.

УДК 621.3

ГРНТИ 45.03.07

ИННОВАЦИОННЫЕ ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ НА БАЗЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ КОНДЕНСАТОРНЫХ СБОРОК

Гришин А.Д.

АО «НИИ «Гириконд»

Представлены инновационные решения в области проектирования электронной аппаратуры на базе отечественных многослойных низковольтных конденсаторов повышенной емкости с внешними металлическими выводами с улучшенными параметрами ESR и ESL. Освещены практические аспекты проектирования печатных плат, включая оптимизацию топологии и трассировку, а также эксплуатационные преимущества новых компонентов. Работа направлена на развитие технологического суверенитета и создание конкурентоспособной электронной аппаратуры нового поколения.

Ключевые слова: схемотехника, топология печатной платы, конденсатор, конденсаторная сборка, электронная аппаратура.

INNOVATIVE TOPOLOGICAL SOLUTIONS IN ELECTRONIC EQUIPMENT BASED ON DOMESTIC CAPACITOR ASSEMBLIES

Grishin A.D.

Research Institute Girikond, JSC

Innovative solutions for designing electronic equipment based on domestic multilayer low-voltage high-capacity capacitors with external metal terminals and improved ESR and ESL parameters are presented. Practical aspects of printed circuit board design, including topology optimization and routing, as well as operational advantages of the new components are highlighted. The work aims to develop technological sovereignty and create competitive next-generation electronic equipment.

Keywords: circuit design, circuit board topology, capacitor, capacitor assembly, electronic equipment.

В эпоху цифровой трансформации, достижения технологического суверенитета и технологического прорыва особую значимость приобретает развитие отечественного электронного машиностроения и приборостроения.

Технологический суверенитет становится необходимым условием устойчивого развития национальной экономики. В этом контексте разработка инновационных электронных компонентов выходит на передний план государственной политики импортозамещения.

Одними из самых важных, массовых в применении и необходимых электронных компонентов в данной отрасли являются многослойные керамические конденсаторы отечественного производства (МКК). Отечественные производители освоили МКК в соответствии с аналогами мировых производителей, на рисунке 1 представлены изображения отечественных конденсаторов К10-82 АО «НИИ «Гириконд».

Для проведения сравнительного анализа был выбран конденсатор К10-82 (АДПК.673511.023 ТУ) со следующими параметрами: номинальная емкость 1,0 мкФ; номинальное напряжение 50 В; группа по ТСЕ Н20 (интервал температуры при эксплуатации $-60/+125$ °С, изменение емкости в интервале рабочих температур $\pm 20\%$). Импортным аналогом является конденсатор производства Murata, GRM31MR71H105KA88L, со следующими параметрами: номинальная емкость 1,0 мкФ; номинальное напряжение 50 В; группа по ТСЕ Х7R (интервал температуры при эксплуатации $-55/+125$ °С, изменение емкости в интервале рабочих температур $\pm 10\%$).

В рамках исследования была сформирована комплексная методика детального анализа и сравнительной оценки параметрических характеристик МКК.

Критериями конкурентной способности изготавливаемых отечественных МКК являются следующие факторы: минимальное эквивалентное последовательное сопротивление (ESR) не превышает 10 мОм, а эквивалентная последовательная индуктивность (ESL) держится на уровне 400 пГн, что находится в таком же диапазоне, как и у зарубежных аналогов, менее 10 мОм и в диапазоне 350 – 425 пГн, соответственно.

Дополнительно были проведены испытания с конструкцией изделия, отличной от традиционных чип-конденсаторов наличием металлических выводов, поднимающими корпус

конденсатора на высоту до 1,0 мм относительно поверхности печатной платы, гарантируя отсутствие возможности передачи изгибающих сил между печатной платой и конденсатором и наоборот. Данная конструкция позволяет монтировать несколько конденсаторов (2-3) поверх другого, что позволяет удвоить эффективную ёмкость и достичь высоких значений ёмкости при сохранении площади посадочного места на печатной плате. Такое решение позволило улучшить следующие выходные параметры МКК, а именно: на всех сборках эквивалентное последовательное сопротивление (ESR) стабилизировалось на уровне менее 10 мОм (8,7 мОм), эквивалентная последовательная индуктивность стала измерять в диапазоне 325 – 375 пГн, но ключевым фактором является возможность легкого монтажа уже собранной конденсаторной сборки, что в условиях современной реальности (когда габаритные параметры готовых устройств стараются минимизировать) позволяет экономить место на плате и применять меньший термобарьер для монтажа компонентов.



Рисунок 1 – Отечественные конденсаторы
производства АО «НИИ «Гириконд»

Данные параметры открывают широкие возможности для применения в высокочастотных цепях с рабочей частотой до 1 ГГц. Температурная стабильность компонентов в пределах $\pm 20\%$ полностью соответствует требованиям ГОСТ 28250-89 для конденсаторов высшей категории качества, что позволяет использовать их в самых требовательных приложениях, где необходима максимальная надежность [1].

Коэффициент подавления помех не менее 60 дБ в диапазоне 100 МГц – 1 ГГц делает эти компоненты идеальными для современных цифровых систем.

Данные МКК эффективно используются в цепях развязки питания цифровых микросхем, обеспечивая стабильное электропитание и

подавление импульсных помех. В фильтрах высоких частот, схемах стабилизации напряжения и цепях согласования импедансов эти компоненты демонстрируют превосходные показатели электромагнитной совместимости, что особенно важно для современной электроники.

Но для того, чтобы полноценно использовать все максимально допустимые параметры МКК, необходимо обратить внимание на схемотехнические решения, которые позволяют добиться лучших параметров работы.

Проектирование печатных плат требует комплексного подхода к размещению компонентов. Особое внимание уделяется минимизации длины проводников до защищаемых элементов, которая не должна превышать 5 мм. При разработке силовых цепей критически важно обеспечить низкий импеданс через использование проводников шириной не менее 20 мил. Многослойные структуры в сочетании со сплошными земляными полигонами позволяют достичь оптимальных параметров электромагнитной совместимости.

Процесс трассировки требует тщательного подхода к каждому элементу. Дифференциальные пары должны поддерживать импеданс 100 ± 10 Ом для стабильной передачи сигнала. Изоляция высокочастотных цепей от низкочастотных осуществляется через заземляющие полигоны. Особое внимание уделяется размещению сигнальных проводников относительно силовых линий, которые должны находиться на расстоянии не менее 0,5 мм друг от друга. Группировка переходных отверстий ограничивается тремя элементами для минимизации паразитной индуктивности.

Методы совершенствования конструкции печатных плат включают использование технологии HDI, применение микропереходов диаметром до 0,3 мм и реализацию слепых и скрытых переходов. Контроль паразитных емкостей на уровне не более 0,1 пФ существенно влияет на высокочастотные характеристики устройств [2].

При монтаже компонентов необходимо учитывать допустимые в технических условиях (ТУ) требования к монтажу компонентов. Категорически запрещается нарушать технологию предварительного нагрева и превышать максимальные значения пайки по температуре и времени нагрева, в целях избегания термоударов, которые, в свою очередь, могут привести к неисправности конденсаторов [3].

Надежность МКК, а именно тестируемых К10-82, подтверждается широким спектром параметров. Температурная стабильность в диапазоне от -55 °C до +125 °C обеспечивает работоспособность в различных условиях эксплуатации. Усталостная

прочность, составляющая не менее 1000 циклов термоциклирования, гарантирует длительный срок службы. Механическая прочность, выдерживающая вибрацию до 50g, делает конденсаторы пригодными для использования в условиях жестких эксплуатационных нагрузок.

Перспективы дальнейшего развития включают расширение частотного диапазона, снижение паразитных параметров, увеличение рабочего напряжения и миниатюризацию корпусов, что позволит укрепить позиции отечественных производителей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смирнов А.Д. Технологии производства электронных компонентов в России: аналитический обзор // Электронная промышленность. 2023. № 2. С. 45–58.
2. Васильев В.А., Морозов П.С. Современные методы проектирования печатных плат: научно-технический журнал // Радиоэлектроника. 2022. № 4. С. 34–47.
3. Павлов С.В., Иванов Е.А. Применение конденсаторов в системах электропитания: сборник научных трудов. М.: Наука, 2021. 198 с. ISBN 978-5-02-040789-3.

УДК 666.3, 666.65

ГРНТИ 47.09.29, 47.09.31, 47.09.33, 47.09.35, 47.09.41

**МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПАССИВНЫХ
ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ.
МИРОВЫЕ ТРЕНДЫ В ИССЛЕДОВАНИЯХ
И РАЗРАБОТКАХ. КОМПЕТЕНЦИИ РТУ МИРЭА**

Корнюшин М.В., Смирнов А.В., Холодкова А.А.

РТУ МИРЭА

В данной работе представлены компетенции, которыми обладает РТУ МИРЭА в области исследования и разработки пассивных электронных компонентов для радиоэлектроники.

Ключевые слова: пассивная электроника, холодное спекание, гидротермальный синтез.

**MATERIALS FOR PASSIVE ELECTRONIC COMPONENTS.
GLOBAL TRENDS IN RESEARCH AND DEVELOPMENT.
COMPETENCIES OF MIREA - RUSSIAN TECHNOLOGICAL
UNIVERSITY**

Kornyushin M.V., Smirnov A.V., Kholodkova A.A.

Russian Technological University – MIREA

This paper presents the competencies that MIREA - Russian Technological University possesses in the field of research and development of passive electronic components for radio electronics.

Keywords: passive electronics, cold sintering process, hydrothermal synthesis.

В последние несколько десятилетий во всем мире активно развиваются исследования и разработки в области материаловедения и технологии материалов для пассивных электронных компонентов [1], [2]. В качестве основных трендов можно выделить следующие: поиск материалов с новыми или улучшенными свойствами,

повышение эффективности технологий с целью повышения производительности и снижения себестоимости, снижение температур в технологическом процессе с целью получения новых типов композиционных материалов и повышения энергоэффективности и экологичности. Особое внимание уделяется исследованиям нового низкотемпературного способа спекания керамики – «холодному спеканию» (англ. cold sintering process – CSP, далее ХС) [3], [4]. Консолидация керамики методом ХС заключается в совместном действии на порошок высокого давления одноосного прессования до 500 МПа и температуры до 450 °С при обязательном присутствии активирующей добавки – водосодержащей фазы. При нормальных условиях активирующая добавка может представлять собой воду или водные растворы солей, кислот или щелочей, иногда кристаллогидраты солей или гидроксидов. Выдержка при заданных условиях обычно составляет от нескольких минут до нескольких часов. Существенное снижение температуры формирования керамики при ХС дает возможности создания мелкозернистых структур за счёт ограничения роста зёрен, изготовления новых типов композитов (керамика-полимер, керамика-металл) и термически неустойчивых материалов.

В РТУ МИРЭА исследования в области материалов для пассивных электронных компонентов также активно развиваются в последнее время. Научными коллективами университета, а также с участием его сотрудников был решен ряд фундаментальных, поисковых и прикладных задач, и были приобретены соответствующие научные компетенции:

- разработан метод гидротермального синтеза ультрадисперсного однофазного и допированного BaTiO_3 для керамических конденсаторов;
- разработаны лабораторные технологии синтеза материалов и изготовления пьезоэлектрической бессвинцовой керамики методом 3D-печати;
- разработаны технологии изготовления резонаторной керамики с диэлектрической проницаемостью ~ 24 , и композиционной керамики для поглощения СВЧ-излучения;
- разработана технология синтеза керамического материала с диэлектрической проницаемостью ~ 200 для производства конденсаторов;
- разработан материал для многослойных конденсаторов высокой емкости на основе титаната бария и магний-ниобата свинца;
- разработаны материал и технология изготовления конденсаторной керамики с диэлектрической проницаемостью свыше 10000;
- разработаны материал и технология аддитивного производства прототипов устройств гибкой электроники;

– спроектирована и введена в эксплуатацию лабораторная установка для исследований процессов многоматериальной 3D-печати радиоэлектроники.

Исследования нового метода ХС также активно ведутся в РТУ МИРЭА. Впервые методом ХС при температуре от 390 °С до 450 °С при давлении 220 МПа и изотермической выдержке до 60 мин изготовлена пористая керамика из $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ с относительной плотностью от 53 % до 65 % [5]. В качестве исходных порошков использовали $\gamma\text{-Al}(\text{OH})_3$ или $\gamma\text{-AlO}(\text{OH})$, содержащие по 5 масс. % $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, которые в ходе ХС при данных условиях обеспечили образование пористой керамики, содержащей 100 % фазы $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. СЭМ-изображение образцов керамики представлено на рисунке 1 (а). Планируется дальнейшее проведение работ с подбором режимов и условий ХС для изготовления плотной электроизоляционной керамики из $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$.

Сотрудниками РТУ МИРЭА методом ХС при температуре от 200 °С до 400 °С и изотермической выдержке 1 ч изготовлена керамика BaTiO_3 с относительной плотностью до 95,0 % (Рисунок 1 (б)) с относительной диэлектрической проницаемостью до 2607 (20 °С, 1 кГц) и 1564 (20 °С, 1 МГц), что демонстрирует сопоставимые значения на уровне свойств керамики, изготовленной традиционным способом.

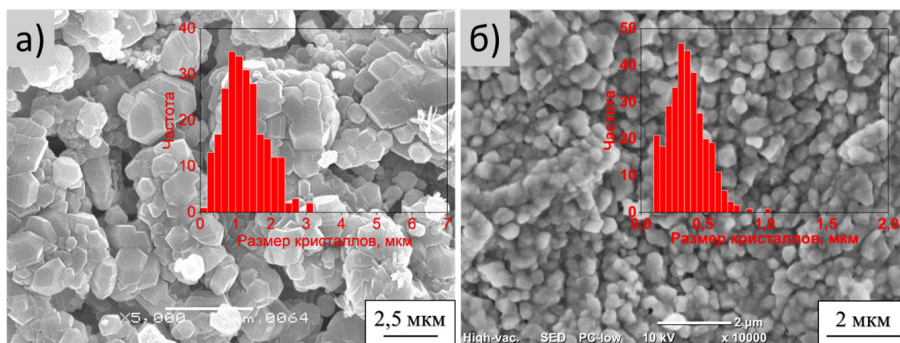


Рисунок 1 – СЭМ-изображения керамики Al_2O_3 , изготовленной методом ХС при 450 °С (а) и керамики из BaTiO_3 , изготовленной методом ХС при 250 °С (б)

Также совместно с Химическим факультетом Московского госу-

дарственного университета имени М.В. Ломоносова РТУ МИРЭА проводит работы по гидротермальному синтезу неорганических материалов в парах воды или среде сверхкритического водного флюида (СКВФ) в автоклаве. При температурах от 100 °С до 374 °С в парах воды может происходить синтез и/или изменение структурного состояния оксида за счет значительного изменения свойств паров воды как реакционной среды по сравнению с жидкой водой. При температурах больше или равной 374 °С и давлении более 22,1 МПа пары воды переходят в СКВФ. При изменении температуры и давления эта среда дает широкие возможности для синтеза неорганических материалов. Одним из основных достоинств обработки оксидов в парах воды или среде СКВФ является возможность контроля дисперсности и формы частиц синтезируемого или обрабатываемого порошкообразного материала в зависимости от давления, температуры и продолжительности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Raveendran A., Sebastian M.T., Raman S. Applications of microwave materials: a review // *Journal of Electronic Materials*. 2019. Vol. 48. No. 5. P. 2601–2634.
2. Yang H. et al. The latest process and challenges of microwave dielectric ceramics based on pseudo phase diagrams // *Journal of Advanced Ceramics*. 2021. Vol. 10. No. 5. P. 885–932
3. Galotta A., Sglavo V.M. The cold sintering process: A review on processing features, densification mechanisms and perspectives // *Journal of the European Ceramic Society*. 2021. Vol. 41. No. 16. P. 1–17.
4. Grasso S., Biesuz M., Zoli L. [et al.] A review of cold sintering processes // *Advances in Applied Ceramics*. 2020. Vol. 119. No. 3. P. 115–143.
5. Kholodkova A.A., Korniyushin M.V., Khrustalev A.N. [et al.] The Direct Cold Sintering of α -Al₂O₃ Ceramics in a Pure Water Medium // *Ceramics*. 2024. Vol. 7. No. 3. P. 1030–1042.

УДК 621.762
ГРНТИ 47.09.37

ТОКОПРОВОДЯЩИЙ ПОРОШОК СЕРЕБРО-ПАЛЛАДИЕВОГО СПЛАВА 70/30 ДЛЯ МЕЖСЛОЙНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ SMD КОНДЕНСАТОРОВ

**Адарчин С.А.¹, Васютин М.С.¹, Гурин В.М.¹, Косушкин В.Г.¹,
Хропов А.А.²**

¹ООО «Фокон»,

²ООО «ЭЛМА-ПАСТЫ»

В результате рассмотрения особенностей производства многослойных керамических конденсаторов с использованием токопроводящих порошков установлено, что использование композиции Ag-Pd 70/30 производства ООО «Фокон» и ООО «Элма-Пасты» обеспечивает необходимую высокую проводимость металлических слоёв на диэлектрических подложках в сочетании с высокой адгезией и термической стабильностью.

Ключевые слова: токопроводящие порошки, серебро-палладий, SMD конденсаторы.

CONDUCTIVE POWDER OF SILVER-PALLADIUM ALLOY 70/30 FOR INTERLAYER ELECTRODES OF SMD CAPACITORS

**Adarchin S.A.¹, Vasyutin M.S.¹, Gurin V.M.¹, Kosushkin V.G.¹,
Khropov A.A.²**

¹Fokon, LLC,

²ELMA PASTE, LLC

As a result of examining the features of multilayer ceramic capacitor manufacturing using conductive powders, it was established that the use of the Ag-Pd 70/30 composition produced by LLC «Fokon» and LLC «Elma-Pasty» provides the necessary high conductivity of the metal layers on dielectric substrates, combined with high adhesion and thermal stability.

Keywords: conductive powders, silver-palladium, SMD capacitors.

Конденсаторы являются одними из ключевых пассивных компонентов современной электроники. Они выполняют роль накопителей электрической энергии, обеспечивают стабильную работу схем путем фильтрации шумов, сглаживания пульсаций напряжения и разделения сигналов. Важно отметить, что SMD-конденсаторы способны работать в условиях ограниченного пространства, что отличает их от традиционных компонентов с выводами. Производители предлагают разнообразие типов, включая керамические, танталовые и алюминиевые электролитические, каждый из которых подходит для специфических условий применения, например для подавления электромагнитных помех или поддержки высоковольтных цепей [1].

SMD-конденсаторы способствуют снижению общей стоимости сборки благодаря возможности автоматизированного монтажа и повышению надежности устройств. С точки зрения энергоэффективности эти компоненты минимизируют потери тепла и повышают общий коэффициент полезного действия систем. Однако при их использовании необходимо учитывать такие факторы, как температурные режимы и характеристики ESR (эквивалентного последовательного сопротивления).

Изготовление поверхностно-монтируемых конденсаторов, особенно многослойных керамических (MLCC — Multi-Layer Ceramic Capacitors) и электролитических, представляет собой высокоточное многоэтапное производство, где токопроводящие порошки играют центральную роль в формировании электродов и обкладок [2]. Эти порошки, как правило, состоят из смесей серебра (Ag), палладия (Pd), графита или полупроводниковых материалов, обеспечивают низкое удельное сопротивление (от 0,1 до 1 Ом·мкм) и высокую адгезию к диэлектрику. Процесс оптимизирован для достижения субмикронных толщин слоев, что позволяет реализовывать емкости до 100 мкФ в крошечных корпусах (например, 0201).

Токопроводящие порошки в производстве SMD-конденсаторов играют решающую роль в формировании электродов, обкладок и внутренних структур, обеспечивая низкое сопротивление, высокую проводимость и стабильность. Эти порошки подбираются по химическому составу, размеру частиц, форме, чистоте и совместимости с диэлектриками или электролитами.

Компания ООО «Фокон» совместно с ООО «Элма-Пасты

разработали порошок серебро-палладий (Ag-Pd 70/30), отличающийся рентгеноаморфными спектрами при фазовом анализе для миниатюрных тонкопленочных SMD-конденсаторов.

Порошок, имеющий соотношение 70% серебра и 30% палладия, используется для формирования внутренних электродов многослойных керамических конденсаторов, обеспечивая оптимальный баланс между электропроводимостью, термической стабильностью и хорошим сродством к керамике. Высокая проводимость серебра ($\rho \approx 1,59 \times 10^{-8}$ Ом·м) снижает электрическое сопротивление слоев, а палладий стабилизирует структуру при высоких температурах спекания (до температур свыше 1000 °C), улучшает адгезию и противостоит окислению серебра.

На рисунке 1 представлен рентгеновский снимок конденсаторной структуры, изготовленной из полученного серебро-палладиевого порошка. Из рисунка видно, что полученная структура обладает ровной границей раздела, стабильной толщиной проводниковых слоев и отсутствием даже незначительных дефектов диэлектрика.

Полученный с применением технологии ООО «Фокон» и ООО «ЭЛМА-ПАСТЫ» порошок серебро-палладий (70/30) обладает высокими гранулометрическими показателями (насыпная плотность более 10000) и отсутствием в составе несвязанного серебра. Он оптимален для произ-



Рисунок 1 – Рентгеновская фотография межслойных проводников конденсаторной структуры из порошка ООО «Фокон»-ООО «ЭЛМА-ПАСТЫ»

водства высококачественных многослойных керамических конденсаторов, обеспечивая баланс между проводимостью, температурной стабильностью и механической прочностью электродов. Его преимущества выражаются в меньшем сопротивлении по сравнению с Pd и более высокой термической стабильностью по сравнению с чистым серебром.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рентюк В. Электролитические конденсаторы: традиционные или полимерные — вот в чем вопрос // Компоненты и технологии. 2017. № 9 (194). С. 11–16.
2. Чигиринский С. Особенности и преимущества производства многослойных структур на основе керамики (LTCC, HTCC, MLCC) // Компоненты и технологии. 2009. № 11 (100). С. 130–131.

УДК 621.37/39
ГРНТИ 47.09.53

ПРОБЛЕМЫ ПРЕЦИЗИОННОЙ ПЕЧАТИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПАССИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ КЕРАМИКИ

Батищева М.В.

АО «Омский научно-исследовательский институт приборостроения»

В работе приведены способы, позволяющие расширить технологические возможности при изготовлении изделий из низкотемпературной керамики и повысить процент выхода годных.

Ключевые слова: низкотемпературная керамика, толстоплёночные платы, трафаретная печать.

PROBLEMS OF PRECISION PRINTING IN THE PRODUCTION OF PASSIVE ELEMENTS BASED ON LOW TEMPERATURE CO-FIRED CERAMICS

Batishcheva M.V.

Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, JSC

The methods that allow to improve technological possibilities of manufacturing of products based on low temperature co-fired ceramics and to increase yield percentage are given in paper.

Keywords: low temperature co-fired ceramics, thick-film boards, screen printing.

В настоящее время пассивные устройства, особенно СВЧ-диапазона, где необходимо обеспечение высокоскоростной обработки сигналов, высоких тепловых и электрических параметров, зачастую выполняются на подложках из низкотемпературной совместно обжигаемой керамики (LTCC).

Технология LTCC предусматривает изготовление многослойных плат из отдельных листов, на которых предварительно сформированы межслойные отверстия, элементы полостей и окон, и методом

трафаретной печати нанесены пассивные элементы (резисторы, конденсаторы и катушки индуктивности). Одиночные листы собираются в пакет, который подвергается опрессовке. Пакет или отдельные платы обжигаются в едином цикле при температуре ниже 900 °С, что делает возможным применение золотых и серебряных проводящих паст [1].

Современный уровень развития технологии низкотемпературной совместно обжигаемой керамики на территории РФ позволяет обеспечить разрешение проводник/зазор до 100 мкм при стандартном технологическом процессе и 50 мкм (при применении фотопаст или формировании топологии лазером), диаметр переходных отверстий – до 50 мкм (при формировании отверстий лазером, однако, этот технологический процесс имеет также ряд ограничений и не может заменить установку пробивку в полной мере [2]). Толщина диэлектрических слоев может составлять от 50 до 500 мкм, толщина проводящего рисунка 8–12 мкм (при нанесении проводящей пасты в несколько слоев), а количество слоев – до 40.

Основными недостатками толстопленочных плат можно назвать:

- относительно невысокое разрешение проводник/зазор до 100 мкм (до 50/50 мкм при значительном усложнении технологического процесса);
- шаг отверстий (при стандартной линейке пробивки и керамических листах от 100 мкм минимально возможное расстояние – 300 мкм);
- неконтролируемый процесс усадки, что является критичным моментом для прецизионных изделий с малыми допусками на отклонения габаритных размеров и печатного рисунка.

Сложившаяся геополитическая обстановка и проблемы кооперации предприятий РФ с зарубежными коллегами влечёт за собой необходимость развития собственных технологий и расширение технологических возможностей внутри страны. Возникает необходимость адаптации стандартных технологических процессов для производства изделий с параметрами, находящимися на грани технологичности. При этом необходимо повышать процент выхода годных изделий. В ходе работы над изделиями с повышенными требованиями к технологическим нормам производства керамических пассивных элементов таких, как СВЧ устройства (фильтры, фазовращатели, амплитудные модуляторы, ответвители, смесители) и платы подложек микросхем, был проведен сравнительный анализ на основе которого был доработан ряд этапов технологического процесса. Как показал анализ ряд требований по КД значительно

превышает наиболее технологичные значения и в ряде случаев даже максимально допустимые.

Таким образом, при обработке изготовления изделий с повышенными требованиями к технологическим нормам производства возник ряд сложностей:

- недозаполнение переходных отверстий в слоях в соотношении $d/t < 1$ (где t – толщина керамического листа, а d – диаметр переходного отверстия);
- непропечатка проводников < 100 мкм;
- залипание пасты на участках между большими участками металлизации (полигонами), а зазоры < 100 мкм;
- необходимость уменьшения стандартного поля контактной площадки вокруг отверстия со 100 мкм до 20 мкм;
- уменьшение толщины линий и шага «земляной» сетки;
- сохранение геометрических параметров при спекании изделий размерами от $2,5 \times 3,2$ мм до 78×78 мм.

Для устранения данных проблем был проведён ряд корректирующих мероприятий. Так, например, в ходе подготовки производства и изготовления первых итераций макетов было выявлено, что при соотношении $d/t < 1$, количестве переходных отверстий на листе более 4000 и необходимости получения 100% выхода годных была выработана ручная методика заполнения отверстий, когда вместо принтера оператор точечно заполняет отверстия ручным ракелем, а само заполнение производится в три этапа с визуальным контролем после каждого. В результате чего после снятия майлара с нерабочей стороны керамики остается небольшой столбик пасты, что повышает надёжность соединения отверстий между слоями. Такой метод позволил увеличить процент заполняемости отверстий с 70 до 100 % даже при несоблюдении условия $d/t < 1$.

Как указано выше, стандартная прецизионная трафаретная печать подразумевает максимально допустимое значение проводник/зазор 100/100 мкм, для улучшения качества печати и получения разрешения 80/80 мкм была выбрана тонкая металлизированная сетка с двойным каландрированием для трафаретной печати (ASADA MS-400/19) и более тонкий фоторезистивный слой для трафарета (Capillex 25). Такие решения позволили улучшить качество трафаретной печати (уменьшить количество разрывов и залипаний рисунка) и уменьшить количество доработок печатного рисунка в процессе производства.

Кроме того, была разработана методика прецизионной печати,

которая включала в себя ряд дополнительных операций перед печатью непосредственно на лист керамики:

- проверка наличия сдвига камер оптического зрения установки трафаретной печати перед печатью каждого листа;
- предварительная печать на керамический лист, покрытый тонкой пленкой для проверки точности нанесения рисунка;
- задание предсказания (смещения) печати относительно отверстий, выведенное итеративным путем;
- проверка точности печати на пленке при кратности увеличения 5-10;
- при наличии дефектов печати изменение зазора между ракелем и сеткой трафарета отличные от стандартных;
- проверка печати на керамическом листе на установке оптической инспекции до и после сушки.

Такая методика позволила уменьшить смещение проводящего рисунка относительно керамического листа с заполненными отверстиями во время печати и сократить размер поля КП для отверстий до 20 мкм.

Для сохранения геометрии изделий больших размеров в процессе спекания на каждый слой закладывается дополнительная рамка из нескольких рядов переходных отверстий по всему периметру платы. После процессов сборки и прессования образуется армирующий контур из металлизированных столбцов, который позволяет компенсировать неравномерность усадки и утяжки изделия в процессе спекания.

Таким образом, в ходе работы был доработан ряд этапов технологического процесса, который позволил не только улучшить прецизионность трафаретной печати, но и в целом повысить процент выхода годных изделий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Потапов Ю.Н. Особенности технологии проектирования и производства LTCC модулей // Производство электроники: технологии, оборудование, материалы. 2008. № 1.
2. Черных В., Хохлун А., Штупар Ё. [и др.] Методы оформления отверстий в «сырых» LTCC и HTCC керамических картах // Компоненты и технологии. 2014. № 5. С. 188–191.

УДК 669.294
ГРНТИ 53.39.31

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПРОИЗВОДСТВА ТАНТАЛА КОНДЕНСАТОРНОГО КЛАССА В АО «ГИРЕДМЕТ»

**Будин О.Н., Фрадков М.Я., Котляров В.И., Васильев Д.И.,
Можевикин А.С.**

АО «Государственный научно-исследовательский
и проектный институт редкометаллической промышленности Гиредмет»

В работе освещены проблемы и перспективы развития производства тантала конденсаторного класса в Государственном научно-исследовательском и проектном институте редкометаллической промышленности в целях импортозамещения стратегических материалов.

Ключевые слова: тантал конденсаторного класса, осколочный тантал, высокочастотные порошки тантала, агломерированные порошки тантала.

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF CAPACITOR-GRADE TANTALUM PRODUCTION AT JSC GIREDMET

**Budin O.N., Fradkov M.Ya., Kotlyarov V.I., Vasil`ev D.I.,
Mozhevikin A.S.**

State Research and Design
Institute of Rare Metal Industry Giredmet, JSC

The paper highlights the problems and prospects of developing the production of capacitor-grade tantalum at the State Research and Design Institute of Rare-Metal Industry in order to import-substitute strategic materials.

Keywords: capacitor-grade tantalum, fragmented tantalum, high-capacity tantalum powders, agglomerated tantalum powders.

Танталовые порошки конденсаторного класса являются важным материалом для современной электронной промышленности. Они используются в производстве высоконадежных конденсаторов, которые применяются в микроэлектронике, радиоаппаратуре, оборонной

технике, медицинских устройствах и потребительской электронике. В России развитие этого направления стало особенно актуальным в свете импортозамещения и санкционных ограничений [1]. Перспективы производства танталовых порошков в России связаны с развитием сырьевой базы, технологий переработки и государственной поддержки.

Россия обладает значительными запасами тантала, но его промышленная добыча и глубокая переработка находятся на низком уровне [2]. Основными поставщиками порошков тантала являлись компании из Германии (H.C.Starck GmbH), Китая (Hunan Kuntal Engineering Co. Ltd, Ningxia Corp.) и Казахстана (Ульбинский металлургический завод).

До недавнего времени в России отсутствовали технологии производства танталовых порошков конденсаторного класса. Это повышало риски сбоев по цепочкам поставок отечественной электронной промышленности.

Совместная проработка вопросов импортозамещения порошков тантала, АО «Гиредмет» с производителями танталовых конденсаторов, позволила в период с 2023 по 2024 год освоить технологию производства осколочных порошков тантала класса TaП2Б, TaПЗ. О чем свидетельствуют технические отчеты АО «Завод Мезон» и АО «НЗР «Оксид» с положительными заключениями испытаний порошков тантала АО «Гиредмет» в производстве конденсаторов. На сегодняшний день разработаны технические условия на порошок тантала конденсаторный, согласованные с АО «НЗР Оксид».

Выполнение опытно-конструкторской работы в период с 2024 по 2025 года, в рамках государственного контракта с Минпромторгом позволит закрыть вопросы импортозамещения агломерированных осколочных порошков тантала емкостью до 6 мКл/г.

Активная проработка вопросов получения танталовой продукции, в том числе высокочистых порошков тантала из отечественного сырья начата в 2023 году сотрудниками АО «Гиредмет». Так из пентахлорида магния производства АО «СМЗ» получены образцы порошков емкостью до 150 мКл/г. В кооперации с АО «ЕЗ ОЦМ» проведены работы и получены положительные результаты по получению слитков электронно-лучевого переплава и танталовой ленты, предназначенной для производства корпусов конденсаторов.

Таким образом, перспективы производства порошков тантала конденсаторного класса в России связаны с преодолением технологической зависимости от импорта и развитием полного цикла переработки —

от добычи сырья до выпуска готовой продукции. Ключевыми факторами успеха являются:

- государственная поддержка в виде финансирования НИОКР и создания льготных условий для производителей;
- кооперация между предприятиями, такими как АО «Гиредмет», АО «СМЗ», АО «ЕЗ ОЦМ» и производителями конденсаторов, в том числе научными институтами.

ЛИТЕРАТУРА

1. О Стратегии развития электронной промышленности РФ на период до 2030 г. и плане мероприятий по ее реализации: распоряжение Правительства РФ от 17 января 2020 г. № 20-р.
2. О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2023 году: государственный доклад.

УДК 691.175:665.939.57

ГРНТИ 49.31.25

СВОЙСТВА НОВЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ АКРИЛОВЫХ МАТЕРИАЛОВ, РАЗРАБОТАННЫХ В АО «НИИ ПОЛИМЕРОВ»

Аронович Д.А., Ладилова Н.Ю., Синеокова О.А., Шалагинова И.А.

АО «Научно-исследовательский институт химии
и технологии полимеров имени академика В.А. Каргина с опытным заводом»

Приведены свойства разработанных и выпускаемых в производстве анаэробных, цианакрилатных, УФ-отверждаемых адгезивов, конструкционных пенопластов и оптических материалов.

Ключевые слова: адгезив, пенопласт, оргстекло, акрилаты.

PROPERTIES OF NEW STRUCTURAL ACRYLIC MATERIALS DEVELOPED AT JSC «NII POLYMER»

Aronovich D.A., Ladilova N.Y., Sineokova O.A., Shalaginova I.A.

V.A. Kargin Polymer Research Institute, JSC

The properties of anaerobic, cyanoacrylate, UV-curable adhesives, structural foams, and optical materials developed and manufactured are presented.

Keywords: adhesive, foam, plexiglass, acrylates.

АО «НИИ полимеров» (г. Дзержинск, Нижегородской области) в настоящее время является одним из ведущих отраслевых институтов, основными исследованиями которого являются синтез (мет) акриловых мономеров и (со)полимеров, создание новых адгезивных и полимерных материалов для различных отраслей техники.

Конструкционные акриловые адгезивы находят широкое применение при сборке изделий машиностроения, в оптике, радиоэлектронике, приборостроении благодаря высокой скорости

отверждения, хорошим прочностным характеристикам, стойкости в различных климатических условиях. АО «НИИ полимеров» выпускает более 70 марок адгезивов, отличающихся по механизму отверждения и физико-механическим характеристикам. Некоторые из адгезивов являются техническими аналогами адгезивов компании Henkel.

Анаэробные адгезивы применяются для контровки и герметизации резьбовых соединений, сборки вал-втулочных соединений, герметизации литья, уплотнения фланцев и склеивания металлических изделий [1]. В последние годы в институте разработаны анаэробные адгезивы Анатерм-114у и Анатерм-527 (аналоги Loctite 243 и Loctite 577), обеспечивающие герметизацию и разборность соединений без повреждений. Анаэробный адгезив Анатерм-120 (аналог Loctite 620) работоспособен при температуре до 250 °С. Адгезив марки Анатерм-118 (аналог Loctite 648) быстро и прочно склеивает детали из нержавеющей стали, латуни и алюминия. Анатерм-118K позволяет осуществлять контроль нанесения. Анаэробная прокладка Анатерм-508 (аналог Loctite 5182) надежно герметизирует фланцевые соединения и трубные резьбы [2].

Ассортимент быстроотверждающихся цианакрилатных адгезивов, составляющий более 10 различных марок, пополнился марками Анатерм ЭЦА, Анатерм ЭЦА-В, которые являются аналогами Циакрин ЭО и Loctite 406. Цианакрилатный адгезив Анатерм-ЭЭЦА отличается отсутствием запаха, сохранением рабочих характеристик в широком диапазоне температур от минус 196 до плюс 80 °С [3].

Разработанные УФ-отверждаемые композиции серии Квант® предназначены для покрытия кварцевых световодов с целью их защиты от механических воздействий и снижения светопотерь, в качестве клеевых материалов при сборке различных деталей в оптике и оптоэлектронике [4]. Оптические покрытия Квант-408/Квант-409 используются при изготовлении оптических волокон для телекоммуникационных систем, а Квант-410/Квант-411 применяются при создании волоконно-оптических гироскопов. УФ-адгезивы Квант-501, Квант-501М, Квант-502 применяют при создании различных оптических приборов. Адгезив марки Анатерм-53 отверждается в зазоре между металлами по анаэробному механизму, а на поверхности при УФ-облучении [5].

Однокомпонентный термоотверждаемый адгезив Анатерм-222 малочувствителен к замасленным поверхностям, обладает высокой прочностью на сдвиг, отрыв и удар, и предназначен для склеивания различных металлов. Анатерм-216, также отверждаемый при нагреве, прочно

склеивает керамику с металлами [6].

Институт выпускает линейку органорастворимых акрилатных адгезивов (Акрилат-85К, Акрилат-85КТ, Акрилат-50Т, Акрилат-45К, Акрилат-45КД, Акрилат К5), которые можно применять при получении тонких сплошных клеевых покрытий и в качестве связующих при изготовлении липких лент.

В НИИ полимеров разработана и внедрена в производство технология получения конструкционных полиимидных пенопластов марки Акримид на основе отечественного сырья – акрилонитрила и метакриловой кислоты. По физико-механическим свойствам Акримид превосходит пенопласты на основе полистирола, полиуретана и ПВХ. Прочностные свойства пенопласта позволяют применять его в качестве внутреннего заполнителя в ответственных композитных многослойных конструкциях. Разработаны три серии материалов: Акримид-А общего назначения, Акримид-Т пенопласт с повышенной теплостойкостью (до 195 °С), Акримид-С самозатухающий пенопласт [7].

Органические стекла на основе (со)полимеров метилметакрилата являются одним из основных материалов, применяемых для получения деталей авиационного остекления. Разработанные теплостойкие органические стекла с температурой размягчения до 160°С способны выдерживать в условиях одностороннего нагрева температуру до 230°С в течение нескольких часов при сохранении требуемого уровня оптических характеристик [8]. Для изготовления светофильтров с нормируемой спектральной характеристикой пропускания выпускается несколько марок органического стекла, окрашенных синтетическими красителями и техническим углеродом. Разработаны технологии получения триплексного остекления на основе органических и силикатных стекол с применением термо- и фотоотверждаемых (мет)акрилатных склеивающих композиций и технология получения оптического монолита на основе полиметилметакрилата толщиной 250-300 мм для применения в качестве заготовок для иллюминаторов сверхглубоководной техники.

Кроме конструкционных акриловых материалов институтом разработаны способы получения полифениленоксида [9] и термостойкого газонаполненного материала на основе ПВХ и изоцианатов [10].

Таким образом, конструкционные материалы, выпускаемые в НИИ полимеров, отвечают современным требованиям техники и могут применяться взамен импортных материалов при создании новых изделий и приборов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аронович Д.А. Анаэробные адгезивы: состав, свойства, применение: монография. Н. Новгород: Типография Гладкова О.В., 2024. 444 с.
2. Синеокова О.А., Мухомов А.Ф., Аронович Д.А. [и др.] Реакционно-способные клеевые и герметизирующие композиции производства АО «НИИ полимеров» и новые разработки // Крепеж, клеи, инструменты. 2023. № 2. С. 40–45.
3. Кленович О.Н., Аронович Д.А., Хамидулова З.С. [и др.] Модификация цианакрилатного клея для склеивания различных субстратов // Современные достижения в области клеев и герметиков: материалы, сырье, технологии: сб. трудов III Междунар. науч.-техн. конф. Дзержинск, 2019. С. 148–150.
4. Синеокова О.А., Сивохина О.С., Аронович Д.А. Исследование УФ-отверждаемых композиций для защитно-упрочняющих покрытий методом фото-ДСК // Клеи. Герметики. Технологии. 2019. № 7. С. 10–14.
5. Овчинникова И.А., Тарасов Д.А., Аронович Д.А. [и др.] Исследование оптического волокна с УФ-отверждаемыми акриловыми защитными покрытиями // Клеи. Герметики. Технологии. 2019. № 3. С. 2–8.
6. Сивохина О.С., Заитова Н.В., Хамидулова З.С. [и др.] Термоотверждаемый акриловый клей высокой прочности // Клеи. Герметики. Технологии. 2020. № 6. С. 42–43.
7. Ширшин К.В., Корниенко П.В., Шалагинова И.А. [и др.] Особенности получения наполненных вспененных композитов на основе поли(мет)акрилимидов // Пластические массы. 2023. № 3–4. С. 15–18.
8. Горелов Ю.П., Шалагинова И.А., Волосова Ю.В. [и др.] Теплоустойчивость и атмосферостойкость сополимерных органических стекол // Пластические массы. 2018. № 7–8. С. 20–22.
9. Лешина М.Н., Ладилова Н.Ю., Корниенко П.В. [и др.] Способ получения поли-2,6-диметил-1,4-фениленоксида: пат. 2806582 Рос. Федерация. № 32023101960; заявл. 30.01.23; опубл. 01.11.23.
10. Сафонов А.Н., Корниенко П.В., Ширшин К.В. [и др.] Имидсодержащие пенопласты на основе поливинилхлорида и реакционноспособных изоцианатов // Пластические массы. 2023. № 3–4. С. 16–19.

УДК 669.294
ГРНТИ 53.39.31

ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОЕМКИХ ПОРОШКОВ ТАНТАЛА КОНДЕНСАТОРНОГО КЛАССА

Можевикин А.С., Фрадков М.Я., Будин О.Н.

АО «Государственный научно-исследовательский и проектный институт
редкометаллической промышленности Гиредмет»

В исследовании предлагается технология, которая позволяет получить высокоемкие порошки тантала высокой чистоты различных классов для изготовления конденсаторов на их основе.

Ключевые слова: порошок тантала, конденсатор.

OBTAINING HIGH-CAPACITANCE TANTALUM POWDERS OF CAPACITOR GRADE

Mozhevikin A.S., Fradkov M.Y., Budin O.N.

State Research and Design
Institute of Rare Metal Industry «Giredmet, JSC

This study presents a technology for producing high-purity, high-capacitance tantalum powders of various grades intended for the manufacturing of capacitors based on them.

Keywords: tantalum powder, capacitor.

Развитие электронной промышленности в современном обществе привело к существенному росту объемов производства конденсаторов широкой номенклатуры. Ключевую роль в современном наукоемком производстве электронных изделий занимают танталовые конденсаторы различной емкости. Изделия из порошка тантала обладают комбинацией высокой объемной эффективности, стабильности, надежности и долговечности. Особенно актуальны высокоемкие порошки тантала, обладающие большой удельной поверхностью и позволяющие получать аноды объемно-пористых электролитических конденсаторов с

уникальными электрофизическими свойствами [1]. Однако в настоящее время в России нет действующих производств, выпускающих танталовый порошок конденсаторного класса, из-за чего компаниям, производящим конденсаторы, необходимо закупать сырье за рубежом, что усложняется импортными ограничениями. В связи с этим актуальной проблемой является разработка способа получения высокочастотных порошков тантала конденсаторного класса на базе отечественного производства [2].

В исследовании предлагается принципиально новый метод, который позволяет получать порошок тантала с высокой удельной поверхностью от 0,5 до 6 м²/г. Основой технологии является магнетермическое восстановление пентахлорида тантала производства АО «Соликамский магниевый завод».

В результате лабораторных исследований установлена возможность получения порошка тантала с удельным зарядом от 30 000 до 150 000 мкКл/г. Результаты сканирующей электронной микроскопии порошка тантала с удельным зарядом 80 000 мкКл/г и испытаний электрофизических свойств изготовленных анодов из порошков марок 80 kCV, 100 kCV и 150 kCV представлены на рисунке 1 и в таблице 1 соответственно.

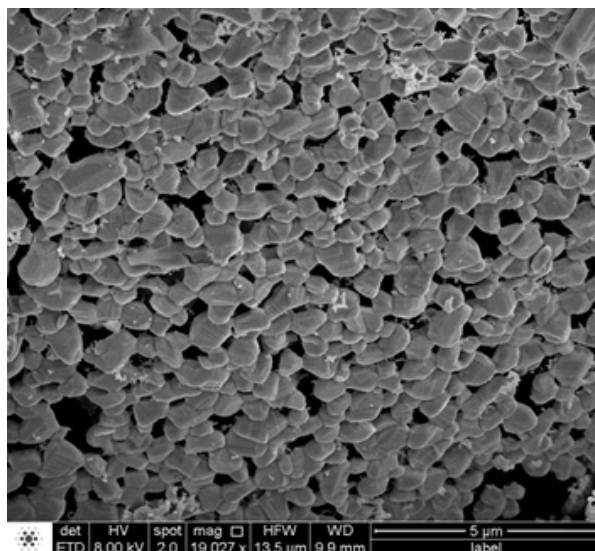


Рисунок 1 – Микрофотография СЭМ порошка тантала марки 80 kCV

Таблица 1 – Электрофизические свойства анодов, изготовленных из порошков тантала производства АО «Гиредмет»

Марка порошка	Напряжение формования, В	Ток утечки, мкА	Удельный заряд, мкКл/г
80 kCV	10	3,7	80 000
80 kCV	16	2,6	80 000
100 kCV	10	2,1	100 000
100 kCV	16	1,4	100 000
150 kCV	10	0,9	150 000
150 kCV	16	0,7	150 000

ЛИТЕРАТУРА

1. Обзор рынка тантала и его продуктов в России и мире. 7-е изд. М., 2019. URL: https://infomine.ru/files/catalog/51/file_51.pdf (дата обращения: 02.09.2025).

2. Старостин С.П. Физико-химические основы технологии производства танталовых анодов и катодов конденсаторов из агломерированных нанокристаллических порошков: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2016. 26 с.

УДК 621.382.8
ГРНТИ 01.05.01

ТЕРМОРЕЗИСТИВНЫЕ ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРЫ

**Адарчин С.А.¹, Васютин М.С.¹, Гурин В.М.¹,
Косушкин В.Г.¹, Хропов А.А.²**

¹ООО «Фокон»,

²ООО «ЭЛМА-ПАСТЫ»

В результате исследования таких электрических характеристик, как термический коэффициент сопротивления и термостатичность платиновых терморезисторов ООО «Фокон», выполненных по толстоплёночной технологии, установлена их высокая чувствительность к изменению температуры и стабильность электрического сопротивления.

Ключевые слова: терморезисторы, толстоплёночная технология, температурный коэффициент сопротивления.

THERMORESISTIVE TEMPERATURE SENSORS

**Adarchin S.A.¹, Vasyutin M.S.¹, Gurin V.M.¹,
Kosushkin V.G.¹, Khropov A.A.²**

¹Fokon, LLC,

²ELMA PASTE, LLC

As a result of studying such electrical characteristics as the temperature coefficient of resistance and thermostability of platinum thermistors produced by LLC “Fokon” using thick-film technology, their high sensitivity to temperature changes and stability of electrical resistance were established.

Keywords: thermistors, thick-film technology, temperature coefficient of resistance.

Терморезисторы представляют собой уникальные полупроводниковые приборы, электрическое сопротивление которых изменяется с изменением температуры. Благодаря этому свойству, терморезистивные компоненты являются неотъемлемой и незаменимой частью многих современных

систем и устройств. Терморезисторы разделяют на два основных типа:

NTC – терморезисторы, сопротивление которых уменьшается с повышением температуры. Обладают отрицательным температурным коэффициентом;

PTC – терморезисторы, сопротивление которых увеличивается с повышением температуры. Обладают положительным температурным коэффициентом.

Одной из разновидностей технологии изготовления терморезисторов- толсто пленочная технология. Такие терморезисторы часто используются в качестве датчиков температуры или элементов температурной компенсации в микроэлектронике. Иногда, для получения постоянного импеданса в определенном диапазоне температур используется комбинация термисторов NTC и PTC [1]. Терморезисторы, выполненные по толсто пленочной технологии, обладают преимуществами в размере корпуса и простоте интеграции в керамические схемы, а также в целом более низкой себестоимостью единицы продукции. Благодаря гибкости толсто пленочной технологии, можно получить прецизионные терморезисторы самой разной геометрической конфигурации и номинала.

В данной статье представлен обзор анализа характеристик толсто пленочного терморезистора, изготовленного на базе контрактного производителя гибридных интегральных схем ООО «Фокон» из линейки PTC типоразмера SMD 0805 и 1206 (далее просто терморезистор) с целью определения границ его работоспособности и, как следствие, выявления перспектив применения такого рода компонентов в различных областях микро- и нанoeлектронной промышленности в непростых условиях российского рынка.

Использование платины, в качестве чувствительного элемента, обусловлено её свойствами. За счет кубической кристаллической решетки, изменение температуры происходит изотропно: температура будет изменяться по всей поверхности равномерно. Чаще всего, для изготовления чувствительного элемента, платина используется в виде проволоки диаметром 0,02-0,05 мм или диаметром 0,05-0,07 мм для прецизионных датчиков номиналом 25, 50 или 100 Ом при нулевой температуре по шкале Цельсия. Характеристика платиновых датчиков близка к линейной функции, а измеряемый диапазон температур лежит от -200 до 850 °С. При изготовлении чувствительного элемента по пленочной технологии, диапазон рабочих температур расширяется от -260 до 1100 °С.

Платиновый чувствительный элемент изготавливается не только

путем наматывания проволоки из платины в спираль, но и по пленочной технологии, а именно тонкопленочное напыление и толстопленочное нанесение.

В результате экспериментальных исследований был установлен температурный коэффициент сопротивления терморезистора — параметр, характеризующий изменение электрического сопротивления материала в зависимости от температуры окружающей среды и являющийся ключевым показателем его качества [2].

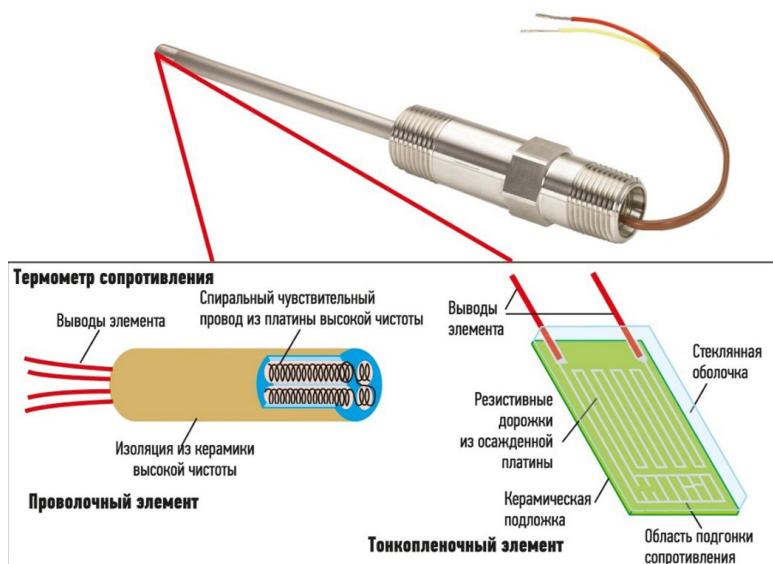


Рисунок 1 – Устройство платинового термодатчика

Определение температурного коэффициента сопротивления (ТКС) проводилось в соответствии со следующей методологией. В качестве объектов исследования были использованы толстопленочные терморезисторы, подвергнутые предварительной стабилизации в контролируемой климатической среде при температуре $25 \pm 0,1$ °C в течение 24 часов. Стабилизация преследовала цель минимизации влияния остаточных напряжений и влажности на результаты измерений. Температурное воздействие на терморезисторы осуществлялось посредством помещения их в камеру тепла-холода. Измерение электрического сопротивления

терморезисторов производилось цифровым мультиметром с базовой погрешностью 0,01 Ом. При каждой установленной температуре (-45, 25 и 125 градусов Цельсия) проводилась серия из десяти последовательных измерений сопротивления с интервалом в 60 секунд между измерениями. Полученные значения сопротивления усреднялись для уменьшения влияния случайных ошибок измерений. Далее эксперимент повторялся пять раз для достижения полной достоверности.

ТКС вычислялся на основе полученных данных по формуле:

$$\alpha_{RT} = \frac{R_2 - R_1}{R_1(T_2 - T_1)} \times 10^{-6}, \text{ppm/}^\circ\text{C},$$

где α_{RT} – температурный коэффициент сопротивления; T_1 и T_2 – температуры; R_1 – сопротивление при температуре T_1 ; R_2 – сопротивление при температуре T_2 .

Исследуемые образцы имели ТКС равный 3000 ppm, что свидетельствует об их высокой чувствительности к изменению температуры. Такие терморезисторы найдут применение в устройствах, где требуется чувствительность к изменению температуры и возможность быстрого реагирования на её колебания.

Также определено значение термостабильности – способность резистивного элемента сохранять своё электрическое сопротивление после воздействия высоких температур и последующего охлаждения до нормальных условий. Параметр термостабильности крайне важен для устройств, включающих в себя терморезистивные элементы и работающие в условиях, где возможны значительные колебания температуры.

Для проведения исследования термостабильности было отобрано 15 терморезисторов различного номинала, без лазерной подгонки. После контрольного замера сопротивления, резистивные элементы были помещены в камеру тепла-холода при температуре 150 °C на 500 ч. Результаты измерения приведены в таблице 1.

Как видно из результатов, максимальное процентное отклонение после испытания, незначительно превысило 1 % что свидетельствует о высокой точности полученных терморезистивных элементов.

Таблица 1 – Результаты исследования на термостабильность

№	Сопротивления до исследования, Ом	Сопротивление после исследования, Ом	Отклонение, %
1	95,920	96,154	0,243
2	102,590	102,670	0,078
3	84,480	84,480	0,000
4	77,980	78,225	0,313
5	78,990	75,578	0,524
6	143,200	143,102	0,068
7	187,440	187,558	0,063
8	308,800	308,960	0,052
9	218,50	218,570	0,032
10	187,050	187,030	0,011
11	88,970	89,920	1,056
12	53,250	53,740	0,912
13	95,390	95,202	0,197
14	24,760	24,724	0,146
15	37,240	37,184	0,151

ЛИТЕРАТУРА

1. Ковалёв В.И., Михайлова Т.С. Применение платиновых терморезисторов в микроэлектронике // Известия высших учебных заведений. Радиотехника. 2017. № 10. С. 18–26.

2. Фролов А.А., Сергеева Н.В. Исследование температурного коэффициента сопротивления толстопленочных терморезисторов // Электронные компоненты и приборы. 2021. № 4. С. 33–39.

УДК 621.377.622.323

ГРНТИ 47.45.99

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ТЕРМОСТАБИЛЬНЫХ СВЧ КОНДЕНСАТОРОВ

Дубровская А.А., Лосинская М.В.

АО «Центральное конструкторское бюро автоматики»

В материалах приведен пример разработки трех видов конденсаторов: однослойных керамических конденсаторов, однослойных тонкопленочных конденсаторов и тонкопленочных конденсаторов для поверхностного монтажа.

Ключевые слова: однослойные керамические конденсаторы, однослойные тонкопленочные конденсаторы, тонкопленочные конденсаторы для поверхностного монтажа.

PRECISION AND THERMALLY STABLE MICROWAVE CAPACITORS DESIGN AND FABRICATION EXPERIENCE

Dubrovskaya A.A., Losynskaya M.V.

Central Design Bureau of Automatics, JSC

This paper presents the design examples for three types of capacitors, namely, single-layer ceramic capacitors, single-layer thin film capacitors, and surface mount thin film capacitors.

Keywords: single-layer ceramic capacitors, single-layer thin film capacitors, surface mount thin film capacitors.

В начале 2000-х годов у нашего предприятия возникла острая потребность в прецизионных (ряд E96, максимально допустимое отклонением $\pm 3\%$), термостабильных (группа МПО), малогабаритных, высокочастотных (полуволновой резонанс не ниже 14 ГГц) конденсаторах. Ни одно из отечественных предприятий не могло удовлетворить возникшую потребность, поэтому необходимо было решать эту проблему самостоятельно. Среди первых, освоенных на нашем предприятии конденсаторов, были

однослойные керамические конденсаторы (ОКК) из подложек керамических марки В100 ТУ 6365-001-39474623 [1] производитель ООО “Керамика”. Конструкция ОКК приведена на рис. 1

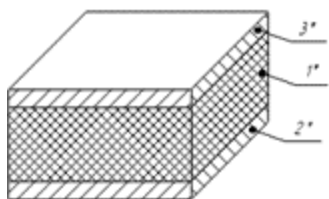


Рисунок 1 – Конструкция однослойного керамического конденсатора: 1* - изолирующий слой (материал В100); 2*, 3* - первая и вторая контактные площадки (обкладки)

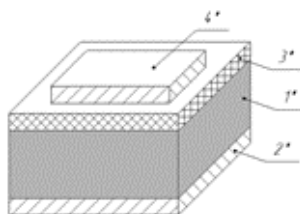


Рисунок 2 – Конструкция однослойного тонкопленочного конденсатора: 1* - подложка (высоколегированный полупроводник); 2*, 4* - первая и вторая контактные площадки (обкладки); 3* - изолирующий слой

В настоящее время на нашем предприятии производится для собственных нужд целая линейка малогабаритных (размерами от 0,5×0,5 мм до 1,0×1,0 мм), термостабильных (группа МПО) однослойных керамических конденсаторов с удельной емкостью 8 пФ/мм² (допуск по номиналу ±3%). Изготавливаемые конденсаторы имеют частоты полуволнового резонанса от 15 ГГц (при габаритах 1,0×1,0 мм) до 32 ГГц (при габаритах 0,5×0,5 мм) [2].

Следующим шагом было освоение конденсаторов с более широким диапазоном рабочих частот, чем ОКК. В кооперации с АО “НИИПП” г. Томск были разработаны конструкции и технологии двух видов тонкопленочных конденсаторов:

вид №1 – однослойные тонкопленочные конденсаторы (ОТК) (аналоги конденсаторов типа К26-4, [3] разработанные АО “НИИ “Гириконд” г. Санкт-Петербург). Конструкция ОТК приведена на рис. 2;

вид №2 – тонкопленочные конденсаторы для поверхностного монтажа (ТПКМ) (аналоги на 2010 г. отсутствуют, патент №2460164) [4, 5] Конструкция ТПКМ приведена на рис. 3а).

В настоящее время по отработанной технологии из пластин монокристаллического кремния со сформированным изолирующим слоем из оксида кремния (SiO₂) фиксированной толщины (0,2 мкм)

БПКЖ.90.01.000ТУ [6] производитель АО «Телеком-СТВ» производится для собственных нужд целая линейка малогабаритных (размерами от 0,5×0,5 мм до 1,0×1,0 мм), термостабильных (группа МПО) ОТК вида № 1 с удельной емкостью 160 пФ/мм² и номинальным напряжением 30 В.

По нашей просьбе сотрудники ЗАО «Планета - Аргалл» изготовили малогабаритные (размерами 0,5×0,5 мм и 1,0×1,0 мм), термостабильные (группа МПО), с номинальным напряжением 25 В ОТК вида № 1 с удельной емкостью 400 пФ/мм².

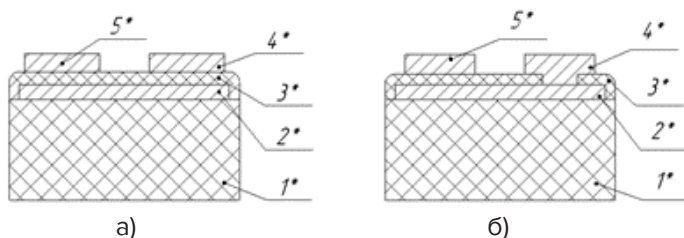


Рисунок 3 – Конструкция ТПКМ вид №2 (рисунок 3а), вид №3 (рисунок 3б): 1* - подложка; 2* - проводящий слой (общая обкладка конденсатора); 3* - изолирующий слой; 4*, 5* - первая и вторая контактные площадки (обкладки)

Также по отработанной технологии мы самостоятельно производим ТПКМ вида №2, только в качестве изолирующей несущей пластины используется не полупроводящий арсенид галлия (GaAs), а кварц кристаллический-02 ДИЛС.757657.001ТУ.

При использовании в качестве изолирующего слоя SiO₂ с толщиной от 0,5 до 2,5 мкм изготавливаются прецизионные, малогабаритные (размерами 0,46×0,46 мм), термостабильные (группа МПО) ТКПМ вида №2 с набором емкостей от 0,4 до 2,33 пФ, напряжением пробоя свыше 50 В, проводимостью в пределах от 0,01 до 0,05 мкСм.

Для увеличения емкости ТКПМ вида №2 была проведена доработка конструкции, где общую обкладку конденсатора замкнули на одну из внешних контактных площадок через металлизированное отверстие. Конструкция доработанного ТПКМ приведена на рис. 3б. Данные конденсаторы при указанных выше размерах и изолирующем слое SiO₂ имеют емкость от 0,77 до 4,7 пФ.

При использовании в качестве изолирующего слоя пентаоксид тантала (Ta_2O_5) с толщиной от 0,6 до 1,0 мкм изготавливаются неprecизионные, малогабаритные (размерами от 1,02×0,33 до 1,5×0,7 мм), термостабильные (М1500) ТПКМ вида №2 с емкостями 18 и 36 пФ, напряжением пробоя свыше 50 В, проводимость до 1 мкСм.

Описанные выше конденсаторы в настоящий момент активно используются в различных устройствах частотной селекции: (одиночных фильтрах и диплексерах), а также в цепях напряжений питания и смещения различных СВЧ устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Подложки керамические ПК-1, ПК-2: тех. условия ТУ 6365-001-39474623-2000.
2. Вольхин Ю.Н., Ворожцов А.Л., Дубровская А.А. [и др.] Опыт изготовления малогабаритных прецизионных термостабильных однослойных конденсаторов СВЧ из керамических материалов с высокой диэлектрической проницаемостью // Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем: материалы I всерос. науч.-техн. конф. Омск, 2006. С. 173–189.
3. Конденсаторы К26-4: тех. условия ОЖ0.464.240ТУ.
4. Вольхин Ю.Н., Глущенко В.А., Семенов А.В. [и др.] Тонкопленочный конденсатор для поверхностного монтажа в несимметричные полосковые линии: пат. 2460164 Рос. Федерация. № 2010148280/07; заявл. 25.11.2010; опубл. 27.08.2012.
5. Вольхин Ю.Н., Глущенко В.А., Дубровская А.А. [и др.] Опыт разработки и применения малогабаритных прецизионных термостабильных конденсаторов СВЧ... // Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем: материалы II всерос. науч.-техн. конф. Омск, 2008. С. 37–45.
6. Пластины монокристаллического кремния: тех. условия БПК-Ж.90.01.000ТУ.

УДК 537.874.72

ГРНТИ 47.09.35

**РАЗРАБОТКА И ОСВОЕНИЕ СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА
ФЕРРИТОВОГО МАТЕРИАЛА С УЛУЧШЕННЫМИ
ХАРАКТЕРИСТИКАМИ И ИЗДЕЛИЙ НА ЕГО ОСНОВЕ
ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В КАЧЕСТВЕ
РАДИОПОГЛОЩАЮЩЕГО МАТЕРИАЛА
В БЕЗЭХОВЫХ КАМЕРАХ**

**Егоров С.В., Иванова В.И., Ларионов М.И.,
Протченко А.И., Шарова Н.Н.**

АО «НИИ «Феррит-Домен»

В ходе выполнения работы был разработан ферритовый радио-поглощающий материал марки 2000ФРПМ и изделия на его основе для применения в безэховых камерах в интервале частот от 30 до 2000 МГц.

Ключевые слова: ферритовый радиопоглощающий материал, безэховая камера.

**DEVELOPMENT AND MASTERING OF SERIAL PRODUCTION
OF FERRITE MATERIAL WITH IMPROVED CHARACTERISTICS
AND PRODUCTS BASED ON IT FOR USE AS AN ABSORBING
MATERIAL IN ANECHOIC CHAMBERS**

**Egorov S.V., Ivanova V.I., Larionov M.I.,
Protchenko A.I., Sharova N.N.**

Research Institute «Ferrite-Domen, JSC

During the work, a ferrite radio-absorbing material of the 2000FRPM brand and products based on it were developed for use in anechoic chambers in the frequency range from 30 to 2000 MHz.

Keywords: ferrite radio-absorbing material, an anechoic chamber.

Безэховая камера радиочастотная (БЭК) – это помещение, в котором не возникает отражение ЭМВ от стен. Наиболее подходящим и перспективным материалом для обшивки внутренних стен БЭК является ферритовая керамика. Благодаря уникальным электромагнитным свойствам ферриты обладают рядом преимуществ по сравнению с другими радиопоглощающими материалами (РПМ): путём подбора действительной части магнитной (μ') и диэлектрической (ϵ') проницаемостей, можно добиться того, что волновые сопротивления феррита и свободного пространства окажутся равными, что обеспечит минимальное значение модуля коэффициента отражения; за счёт больших величин магнитных (μ'') и диэлектрических (ϵ'') потерь можно добиться высокого уровня поглощения электромагнитного излучения; ферриты позволяют создавать плотные широкополосные поглотители, работающие при низких частотах (от десятков МГц до нескольких ГГц).

Анализ литературы показал, что существующие ферритовые РПМ предназначены для узкого диапазона частот от 30 до 1000 МГц и не имеют достаточного уровня поглощения электромагнитных волн [1, 2, 3, 4, 5].

Цель работы – исследование и разработка серийной технологии создания ферритового материала и изделий на его основе для применения в безэховых камерах в широком интервале частот от 30 до 2000 МГц.

Изготовление ферритовых изделий – это сложный многостадийный процесс. Ферриты, как правило, получают по керамической технологии, которая включает следующие стадии: дозировка исходных оксидов/карбонатов, первый помол, ферритизация, второй помол, введение в шихту связующего, прессование заготовок изделий, обжиг заготовок. На электромагнитные параметры ферритовых изделий, в частности на радиопоглощающие свойства, оказывает влияние не только базовый химический состав феррита, но и технологические режимы, такие как способ и время измельчения; состав связующего вещества, технология изготовления пресс-порошка, давление прессования; время, температура и газовая среда обжига. Эффективность поглощения электромагнитного излучения в требуемом интервале частот будет определяться величиной комплексных магнитной и диэлектрической проницаемостей, микроструктурой и плотностью изделия.

В результате подбора состава и технологических режимов был получен радиопоглощающий Ni-Cu-Zn-Mn феррит (патент RU 2841748 С1) и изделия (пластины) на его основе. Аналогов данной продукции на территории Российской Федерации нет. Пластины выпускаются по

КЖГП.757120.001 ТУ двух типов: пластина 2000ФРПМ П100×100×7 (рис. 1а) пластина 2000ФРПМ П(100×100×7)/(10-1) (рисунок 1б). Геометрические размеры пластин представлены в таблице 1. В таблице 2 представлены характеристики разработанного РПМ.

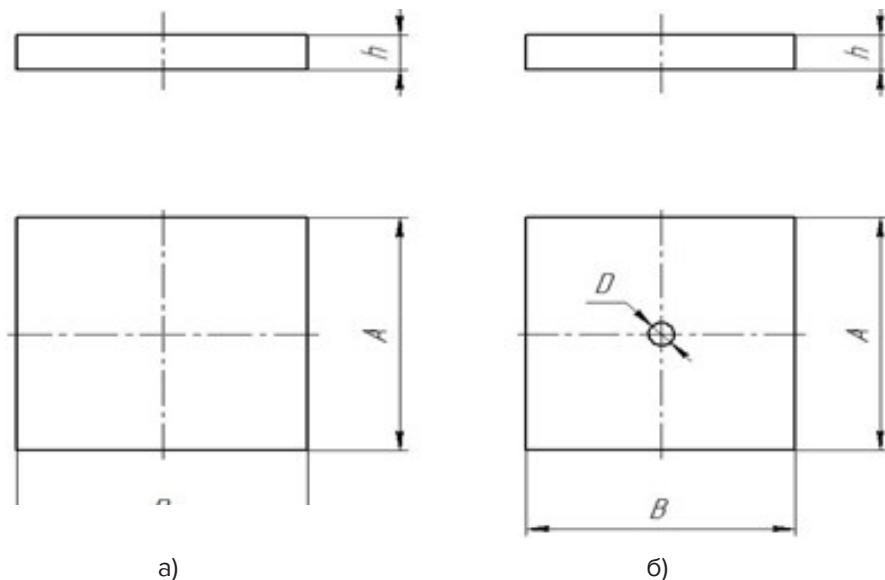


Рисунок 1 – Конструкция пластины из ферритового РПМ марки 2000ФРПМ: а) 2000ФРПМ П100×100×7; б) 2000ФРПМ П(100×100×7)/(10-1)

Таблица 1 – Геометрические размеры пластин

Тип пластин	A, мм	B, мм	h, мм	D, мм
2000ФРПМ П100×100×7	100±0,2	100±0,2	7±0,2	-
2000ФРПМ П(100×100×7)/(10-1)	100±0,2 100±0,2	100±0,2 100±0,2	7±0,2 6,7±0,2	10±0,3 10±0,3

Таблица 2 – Характеристики 2000ФРПМ

Характеристика	Обозначение, единицы измерения	Значения
Коэффициент отражения на 30 МГц	R_{30} , дБ	≤ -15
Коэффициент отражения на 100 МГц	R_{100} , дБ	≤ -19
Коэффициент отражения на 400 МГц	R_{400} , дБ	≤ -20
Коэффициент отражения на 800 МГц	R_{800} , дБ	≤ -17
Коэффициент отражения на 1000 МГц	R_{1000} , дБ	≤ -16
Коэффициент отражения на 1500 МГц	R_{1500} , дБ	≤ -13
Коэффициент отражения на 2000 МГц	R_{2000} , дБ	≤ -10
Начальная магнитная проницаемость на 10 кГц	μ_n	2000 ± 500
Кажущаяся плотность	ρ_k , г/см ³	Не менее 5,0

ЛИТЕРАТУРА

1. Бибииков С.Б., Титов А.Н., Черепанов А.К. Синтез материала с заданным коэффициентом отражения в широком диапазоне частот и углов падения // Радиолокация, навигация, связь: труды XV Междунар. науч.-техн. конф. Воронеж: Изд. НПФ «Саквое», 2009. С. 1578–1584.
2. Шольц Н.Н., Пискарева К.А. Ферриты для радиочастот. Л.: Энергия, 1966. 324 с.
3. Вергазов Р.М. Влияние легирующих добавок на диэлектрическую проницаемость Ni-Zn ферритов // Актуальные проблемы науки: XIII Междунар. науч.-практ. конф. Пенза: Изд-во ПГ, 2018. С. 235–240.
4. Покусин Д.Н., Чухлебов Э.А., Залесский М.Ю. Комплексная магнитная проницаемость ферритов в области естественного ферромагнит

ного резонанса // Радиотехника и электроника. 1991. № 36 (11). С. 2085–2091.

5. Меньшова С.Б., Бибилов С.Б., Вергазов Р.М. [и др.] Способ получения никель-цинкового феррита с высокими диэлектрическими потерями: пат. 2587456 Рос. Федерация. № 2011141351/07; заявл. 13.10.2011; опубл. 20.04.2013.

УДК 621.3.049.77

ГРНТИ 50.49.35

ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОРАЗМЕРНЫХ И СУБМИКРОННЫХ СТРУКТУР МЕТОДОМ АЭРОЗОЛЬНОЙ ПЕЧАТИ

Патарашвили А.Н., Патарашвили А.Н., Ефимов А.А., Иванов В.В.

Московский физико-технический институт

В исследовании представлен метод аэрозольной печати с электростатической фокусировкой заряженных ультрадисперсных наночастиц, который позволяет формировать на поверхности проводящих и полупроводниковых подложек металлические структуры с субмикронным разрешением.

Ключевые слова: печатная микроэлектроника, аэрозольная 3D-печать, аддитивное производство, электростатическая фокусировка.

FABRICATION OF MICROSCALE AND SUBMICRON STRUCTURES VIA AEROSOL PRINTING

Patarashvili A.N., Patarashvili A.N., Efimov A.A., Ivanov V.V.

MIPT

This study presents a method of aerosol jet printing with electrostatic focusing of charged ultrafine nanoparticles, which enables the fabrication of metallic structures with submicron resolution on the surface of conductive and semiconductor substrates.

Keywords: printed microelectronics, aerosol 3D printing, additive manufacturing, electrostatic focusing.

Применение аддитивных технологий в производстве элементов электронной компонентной базы с субмикронным разрешением печати способствует активному развитию производства современной микроэлектроники. Одним из методов формирования таких компо-

нентов является аэрозольная печать, суть которого заключается в получении и транспортировке аэрозольных наночастиц на поверхность подложки. Разрешение аэрозольной печати с использованием аэродинамической фокусировки ограничено десятками микронметров [1].

В исследовании предлагается метод сухой аэрозольной печати с электростатической фокусировкой заряженных наночастиц металлов, сплавов, полупроводников и их оксидов, позволяющий формировать микроразмерные и субмикронные структуры с разрешением печати до нескольких десятков нанометров [2]. Суть метода заключается в синтезе и электрической зарядке наночастиц с их последующей транспортировкой к печатной камере (рисунок 1), представляющей собой два электрода с расположенной между ними фокусирующей маской. Подобно конденсатору, под действием приложенной к электродам разности потенциалов между ними формируется электрическое поле.

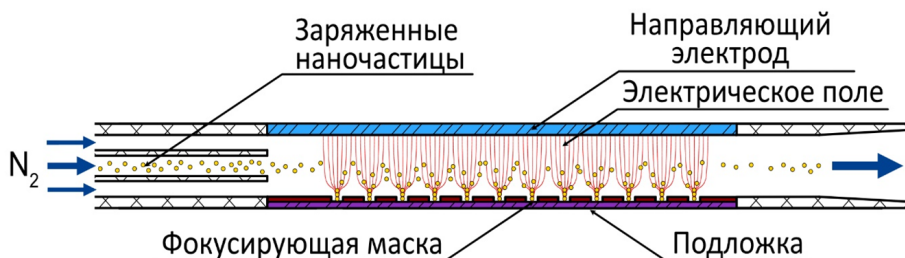


Рисунок 1 – Схема печатной камеры

Заряженные наночастицы вместе с ионами газа оседают на маску и заряжают ее, в результате чего возникает высокая неоднородность электрического поля вблизи подложки, приводящая к фокусировке заряженных наночастиц в центры отверстий в маске. В печати используются наночастицы размером до 10 нм, которые имеют высокую поверхностную активность и образуют сильные связи при осаждении. Постепенный рост структур приводит к эволюции электрического поля, определяющего их дальнейший рост. На рисунке 2 представлен результат осаждения наночастиц золота через отверстия в фоторезисте диаметром 2,5 мкм.

Полученные колонны диаметром от 0,3 мкм до 1,1 мкм демонстрируют в десятки раз более высокое разрешение аэрозольной печати с

электростатической фокусировкой по сравнению с аэродинамической фокусировкой. Развитие данной технологии позволит формировать 3D-структуры со сложной геометрией и субмикронным разрешением для разнообразных применений в печатной микроэлектронике, фотонике, производстве метаматериалов и сенсорных устройств.

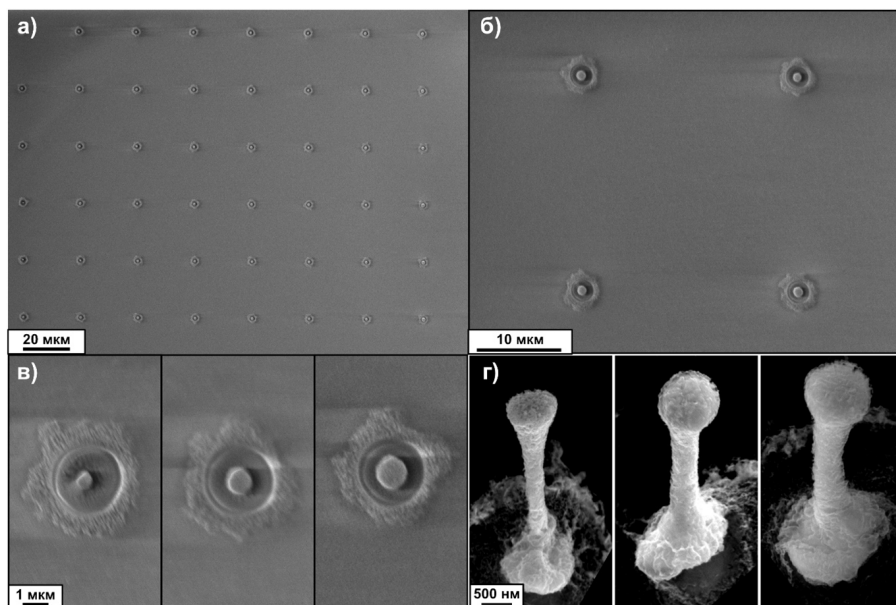


Рисунок 2 – РЭМ-изображения структур золота, осаждённых через диафрагмы в фоторезисте толщиной 3 мкм и диаметром 2,5 мкм: а, б, в – в различных областях матрицы до сжигания фоторезиста, г – в различных областях матрицы после плазменного травления фоторезиста

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственный контракт № 075-03-2025-662, идентификатор проекта FSMG-2025-0056).

ЛИТЕРАТУРА

1. Wilkinson N.J. [et al.] A review of aerosol jet printing—a non-traditional hybrid process for micro-manufacturing // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019. Vol. 105. No. 11. P. 4599–4619.
2. Liu B. [et al.] Metal 3D nanoprinting with coupled fields // Nature Communications. 2023. Vol. 14. No. 1. P. 4920.

УДК 621.3.032.27

ГРНТИ 47.13.11

ТЕХНОЛОГИЯ СУХОЙ АЭРОЗОЛЬНОЙ ПЕЧАТИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОДОВ ТРАНЗИСТОРОВ

**Лизунова А.А., Корнюшин Д.В., Власов И.С.,
Каменева Е.И., Иванов В.В.**

Московский физико-технический институт

В исследовании представлена технология сухой аэрозольной печати для создания пассивных электронных компонент на примере серебряных электродов для транзисторов на углеродных нанотрубках.

Ключевые слова: сухая аэрозольная печать, серебряные электроды, транзисторы.

DRY AEROSOL PRINTING TECHNOLOGY FOR FORMATION OF ELECTRODES FOR TRANSISTORS

Lizunova A.A., Korniyushin D.V., Vlasov I.S., Kameneva E.I., Ivanov V.V.

MIPT

The study presents a dry aerosol printing technology for creating passive electronic components by means of silver electrodes for carbon nanotube transistors.

Keywords: dry aerosol printing, silver electrodes, transistors.

В настоящее время методы печатной электроники интенсивно внедряются в производство различных электронных компонентов, таких как фотодиоды, фотоприемники, дисплеи, солнечные батареи и сенсорные системы (механические, газовые, химические и биологические), RFID-метки и межсоединения [1]. Печатные технологии имеют такие преимущества, как низкая стоимость, высокая степень перенастраиваемости производственных линий, что очень важно для мелкосерийной отрасли, возможность нанесения функциональных слоев и компонентов на гибкие, плоские и

трехмерные подложки. На сегодняшний день двумя ведущими технологиями аддитивного нанесения материалов являются струйная и аэрозольная печать [2]. Аэрозольная печать, в свою очередь, делится на два типа: с использованием жидких чернил и сухая печать. Сухая аэрозольная печать — это передовая технология, при которой наночастицы нужного материала синтезируются непосредственно перед нанесением в газовой фазе и осаждаются через фокусирующее сопло на любую поверхность с последующим лазерным спеканием для формирования прочной структуры и хорошей адгезии. Главные преимущества сухого метода в том, что он полностью исключает трудоемкие этапы приготовления стабильных чернил, удаления поверхностно-активных веществ и спекания изделий в разных технологических процессах [3].

Методом сухой аэрозольной печати были сформированы серебряные электроды транзисторов поверх слоя углеродных нанотрубок, полученного методом микроплоттерной печати с использованием чернил из коммерческих одностенных углеродных нанотрубок. В качестве подложки для транзистора была использована кремниевая пластина, покрытая диэлектрическим слоем оксида кремния толщиной 100 нм.

Синтез наночастиц серебра для изготовления электродов проводился в газовом разряде в атмосфере чистого аргона при потоке 75 мл/мин, емкости конденсатора 132 нФ, частоте импульсов 500 Гц. Напечатанные электроды характеризовались высокой проводимостью, которая составляла более 80 % от объемного материала серебра. Получены транзисторы с каналами от 80 до 300 мкм с максимальным отношением токов включения к току выключения 105. На рисунке 1 представлены фотографии серии электродов с различной длиной канала и микроструктура поверхности электродов, визуализированная в растровом электронном микроскопе (РЭМ).

Разработанная технология печати является эффективным и перспективным методом для одновременного формирования пассивных электронных компонентов и межсоединений в составе различных электронных устройств.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения №075-15-2024-560.

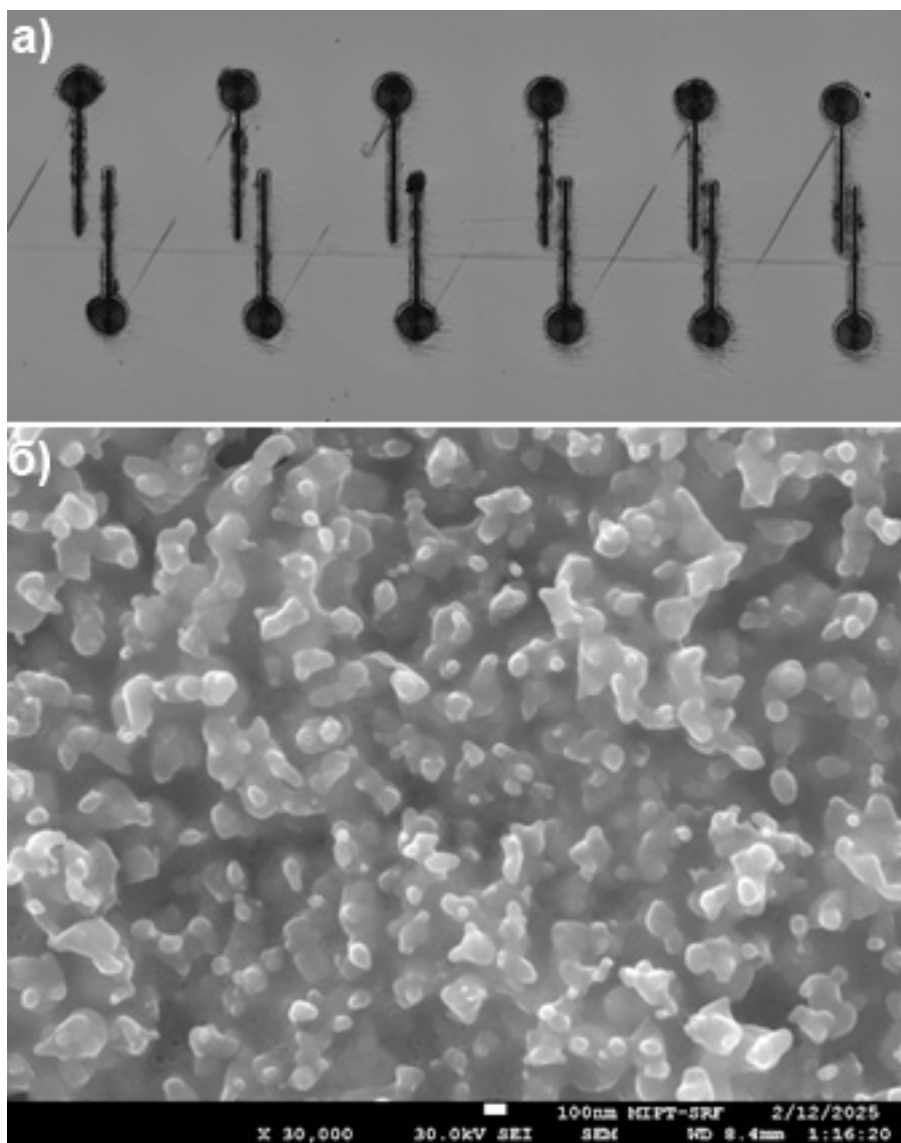


Рисунок 1 – Серебряные электроды: а) фотография серии и б) характерное РЭМ-изображение поверхности

ЛИТЕРАТУРА

1. Wilkinson N.J., Smith M.A.A., Kay R.W. [et al.] A review of aerosol jet printing—a non-traditional hybrid process for micro-manufacturing // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019. Vol. 105. P. 4599.
2. D'Angelo P., Vurro D. Direct Writing: Inkjet and Aerosol-Jet Printing // High Resolution Manufacturing from 2D to 3D/4D Printing. Springer, Cham, 2022.
3. Kameneva E., Lizunova A., Filalova E. [et al.] Technology of manufacturing thin-film aluminum nanostructures by dry aerosol printing // St Petersburg State Polytechnical University Journal Physics and Mathematics. 2023. Vol. 16. No. 3.2. P. 282–287.

УДК 621.319.42
ГРНТИ 45.35.29

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОДУГОВОЙ СТАДИИ ПРОЦЕССА САМОВОССТАНОВЛЕНИЯ В МЕТАЛЛОПЛЁНОЧНЫХ КОНДЕНСАТОРАХ

Печников А.В., Ходжамов А.А., Плотников А.П.

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»

Цель исследования — усовершенствовать существующую методологию и пересмотреть экспериментальные результаты, представленные в литературе, касающиеся энергии самовосстановления и других характеристик. Приведена экспериментальная методика изучения характеристик микродуги в процессе самовосстановления в металлизированных пленочных конденсаторах.

Ключевые слова: самовосстановление, микродуговой разряд, металлопленочные конденсаторы.

STUDY OF SELF-HEALING MICRO-ARC DISCHARGE CHARACTERISTICS IN METAL-FILM CAPACITORS

Pechnikov A.V., Hojamov A.A., Plotnikov A.P.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

The study aims to refine current methodology and revise experimental results presented in literature regarding self-healing energy and other characteristics. The experimental methodology for studying micro arc characteristics during self-healing process in metallized film capacitors is given.

Keywords: self-healing, micro-arc discharge, metallized film capacitors.

Металлопленочные конденсаторы (МПК) в настоящее время, являются неотъемлемой частью силовой преобразовательной техники

(фильтры переменного тока, DC-link, снабберы) [1]. МПК получили широкое распространение благодаря их отличительной особенности — способности к самовосстановлению (СВ). Процесс СВ заключается в изоляции места пробоя диэлектрика при помощи тока высокой плотности, подтекающего к каналу разряда, который испаряет тонкий напыленный металлический электрод. Вследствие чего микродуговой разряд погасает, а конденсатор может нормально функционировать без существенной потери электрической ёмкости [2]. Однако во время горения микродугового разряда, помимо испарения металлического электрода, полимерный диэлектрик подвергается высокотемпературной деструкции. Как следствие, в зоне СВ формируются электропроводящие элементы, которые в дальнейшем оседают как на поверхности электрода, так и в канале разряда [3]. При малых значениях поверхностного сопротивления электродов или высокого межслоевого давления концентрация и плотность электропроводящих соединений, осевших на электрод и на внутреннюю поверхность остывшего канала разряда, превышают некоторый предельный уровень и обкладки конденсатора замыкаются накоротко, приводя к резкому падению сопротивления изоляции и постоянной времени конденсатора. Такой вид СВ предлагается называть неэффективным. В таком случае дальнейшее нормальное функционирование МПК является невозможным. Формирование подходов и критериев к оценке эффективности процесса СВ позволят ведущим производителям МПК существенным образом повысить надежность, удельные и массогабаритные характеристики выпускаемых конденсаторов.

В ходе исследования была разработана методика получения характеристик микродуговой стадии процесса СВ, в частности зависимостей сопротивления канала разряда от времени, для различных значений межслоевых давлений. Анализ данных зависимостей позволяет сделать первый шаг к разработке методики оценки эффективности процессов СВ. Было получено выражение для сопротивления канала разряда в зависимости от времени, учитывающее особенности экспериментальной установки и индуктивностей экспериментальных образцов и подводящих проводов:

$$R_{SH}(t) = \frac{u_x(t)}{i(t) + C_x \cdot \frac{du_x(t)}{dt}}$$

$$u_x(t) = u(t) - (L_{wire} + L_{sample}) \cdot \frac{di(t)}{dt} - (R_{\square} + R_{contact}) \cdot i(t),$$

Где L_{wire} – индуктивность подводящих проводов, L_{sample} – индуктивность образца, $u(t)$ – зависимость напряжения разряда от времени, $R_{\square}$ – сопротивление квадрата металлизации, R_{contact} – контактное сопротивление электродов установки и экспериментального образца, C_x – электрическая ёмкость экспериментального образца.

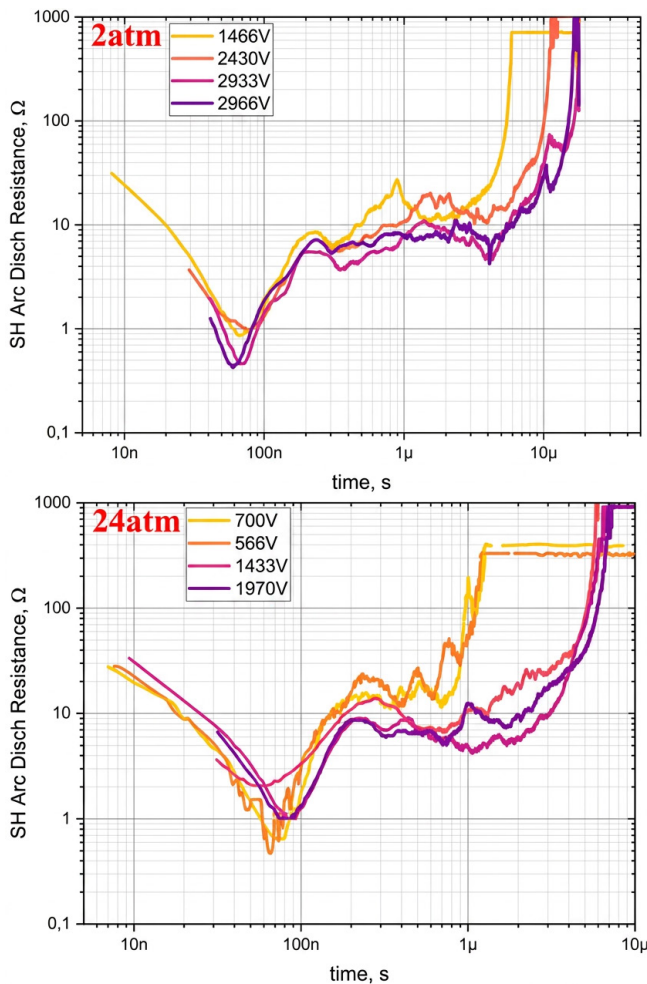


Рисунок 1 – Графики зависимостей сопротивления канала разряда от времени

С помощью данного выражения, на основе экспериментальных данных (осциллограмм тока и напряжения), были получены зависимости сопротивления канала разряда от времени для различных значений межслоевых давлений и пробивных напряжений.

Согласно полученным данным, прослеживается четкая зависимость между минимальным сопротивлением канала разряда и пробивным напряжением. С ростом величины пробивного напряжения минимальное сопротивление канала разряда уменьшается. Вероятно, это связано с увеличением выделяемой энергии во время СВ, что, как следствие, сопровождается повышением степени ионизации плазмы микродугового разряда. Явного влияния величины межслоевого давления на сопротивление канала разряда обнаружено не было, однако было обнаружено, что с ростом межслоевого давления напряжения пробоя имеют тенденцию к уменьшению. Данный факт можно объяснить уменьшением величины воздушного зазора и растяжением полимерной металлизированной плёнки и, как следствие уменьшением толщины диэлектрика.

Разработанная методика и полученные результаты будут использованы в дальнейших исследованиях по разработке подходов и критериев к оценке эффективности процесса СВ, а впоследствии и в создании мультифизической модели процесса СВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Li H. [et al.] Threshold current density of metallized film under multiple current pulses // IEEE Transactions on Plasma Science. 2020. Vol. 48. No. 7. P. 2523–2530.
2. Jow T.R., MacDougall F.W., Ennis J.B. [et al.] Pulsed power capacitor development and outlook // 2015 IEEE Pulsed Power Conference (PPC). 2015. P. 1–7.
3. Kammermaier J. Chemical processes during electrical breakdown in an organic dielectric with evaporated thin electrodes // IEEE Transactions on Electrical Insulation. 1987. No. 2. P. 145–149.

УДК 549.641.1
ГРНТИ 29.19.25

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕГРАДАЦИИ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК CsPbX_3 МЕТОДАМИ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА

Бобков А.А., Урмурзин Д.Д.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова

В рамках данной работы изучался механизм деградации квантовых точек CsPbX_3 в условиях окружающей среды с использованием неразрушающего аналитического метода — комбинационного рассеяния света. В качестве основного метода исследования использовалась рамановская спектроскопия с возбуждением на нескольких длинах волн. Эксперименты проводились *in situ*.

Ключевые слова: галогенидные перовскиты, квантовые точки CsPbX_3 , деградация, стабильность, рамановская спектроскопия, комбинационное рассеяние света.

STUDY OF THE DEGRADATION OF CsPbX_3 QUANTUM DOTS BY RAMAN SCATTERING METHODS

Bobkov A.A., Urmurzin D.D.

Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI» named after V. I. Ulyanov (Lenin)

In this work, the mechanism of degradation of CsPbX_3 quantum dots in environmental conditions was studied using a non—destructive analytical method - Raman scattering of light. Raman spectroscopy with excitation at several wavelengths was used as the main research method. The experiments were conducted *in situ*.

Keywords: halide perovskites, CsPbX_3 quantum dots, degradation, stability, Raman spectroscopy, Raman scattering.

Перовскитные нанокристаллы (НК) состава CsPbX_3 , где X – атом

галогена (Br, I или Cl), вызывают особый интерес как материалы активного слоя солнечных элементов [1], лазеров [2], светодиодов [3] или дисплеев нового поколения [4]. Галогенидные перовскиты снискали широкую популярность в научной среде благодаря своему уникальному комплексу физико-химических характеристик. Эти соединения относятся к классу прямозонных полупроводников, обладают высоким коэффициентом преломления и демонстрируют замечательную способность к тонкой настройке ширины запрещённой зоны в интервале от 1,7 до 3 эВ путём варьирования их химической формулы. Важной отличительной чертой перовскитов является их высокая устойчивость свойств к образованию дефектов: они сохраняют способность к эффективной фотолюминесценции даже при высокой плотности дефектов, достигающей 10^{17} см⁻³. Ещё одним ключевым достоинством данных материалов выступает их экономическая эффективность, обусловленная возможностью синтеза с применением простых и недорогих материалов.

Однако основной проблемой, ограничивающей их коммерческое применение, остается низкая стабильность. Перовскиты подвержены быстрой деградации под влиянием кислорода и влаги, что приводит к значительному сокращению срока службы созданных на их основе устройств, таких как светодиоды и солнечные элементы [5-7].

В рамках данной работы были получены пленки состава CsPbBr₃ и исследована их деградация методом комбинационного рассеяния света. Пленки перовскита наносились на кремниевые подложки методом распыления. Образцы были исследованы различными методиками на оборудовании семейства NTEGRA.

ЛИТЕРАТУРА

1. Boudjemila L. [et al.] Electrical characteristics of CsPbI₃ and CsPbBr₃ lead halide Perovskite nanocrystal films deposited on Si-c solar cells for highefficiency photovoltaics // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. 2022. Vol. 15. No. S3.2. P. 91–96.

2. Yakunin S. [et al.] Low-threshold amplified spontaneous emission and lasing from colloidal nanocrystals of caesium lead halide perovskites // Nature communications. 2015. Vol. 6. No. 1. P. 8056.

3. Sun C. [et al.] Efficient and stable white LEDs with silica-coated inorganic perovskite quantum dots // Advanced Materials. 2016. Vol. 28. No. 45. P. 10088–10094.

4. Shan Q. [et al.] Perovskite quantum dots for the next-generation displays: progress and prospect // *Advanced Functional Materials*. 2024. Vol. 34. No. 36. P. 2401284.

5. Phillips L.J. [et al.] Dispersion relation data for methylammonium lead triiodide perovskite deposited on a (100) silicon wafer using a two-step vapourphase reaction process // *Data in brief*. 2015. Vol. 5. P. 926–928.

6. Ermolaev G. [et al.] Giant and tunable excitonic optical anisotropy in single-crystal halide perovskites // *Nano Letters*. 2023. Vol. 23. No. 7. P. 2570–2577.

7. Муратова Е.Н. [и др.] Исследование и оптимизация процессов кристаллизации растворов гибридных галогенидных перовскитов состава $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ // *Fizika i himiâ stekla*. 2023. т. 49. № 6. С. 662–671.

УДК 666.651

ГРНТИ 47.09.41

РАЗРАБОТКА И МОДЕРНИЗАЦИЯ СОСТАВОВ КОРУНДОВОЙ КЕРАМИКИ ДЛЯ НУЖД МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Григорьев М.В., Жуков И.А., Ткачев Д.А.

Национальный исследовательский Томский государственный университет

Исследование направлено на изучение процессов формирования анортитных включений в корундовой керамике темного и белого цвета, предназначенной для применения в металлокерамических корпусах интегральных схем.

Ключевые слова: оксид алюминия, диэлектрическая керамика, анортит, пористость, размер зерна.

DEVELOPMENT AND MODERNIZATION OF CORUNDUM CERAMIC COMPOSITIONS FOR THE NEEDS OF MICROELECTRONICS

Grigoriev M.V., Zhukov I.A., Tkachev D.A.

National Research Tomsk State University

The study focuses on the formation processes of anorthite inclusions in dark and white corundum-based ceramics used for metal-ceramic packages of integrated circuits.

Keywords: aluminum oxide, dielectric ceramics, anorthite, porosity, grain size.

При получении вакуумплотной корундовой керамики в качестве минерализаторов, образующих расплав и способствующих жидкофазному спеканию, применяют CaO , SiO_2 , MgO , а как добавки, понижающие температуру спекания и образующие твердый раствор с $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ — Cr_2O_3 и TiO_2 [1]. Встречается информация о добавлении циркона (ZrSiO_4) в шихту корундовой керамики для обеспечения

повышенной трещиностойкости и сопротивляемости тепловому удару [2]. Таким образом, понимание причин появления в вакуумплотной корундовой керамике с добавлением большого количества разных минерализаторов до 10 масс. % анортитных дефектов является сложной задачей и требует детального изучения.

В работе за основу были взяты два базовых промышленных состава вакуумплотной корундовой керамики белого и темного цвета. По причине конфиденциальной информации конкретика по соотношению компонентов в составе керамических масс не раскрывается. При производстве вакуумплотной белой (БК) и темной (ТК) корундовой керамики используются следующие шихтовые материалы: глинозем глубокопрокалённый, низкощелочной ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$); обожжённый тальк $3(\text{SiO}_2 \cdot \text{MgO}) + \text{SiO}_2$; концентрат цирконовый (ZrSiO_4); карбонат кальция (CaCO_3) и кварцевый песок (SiO_2). Темная керамика кроме перечисленных ингредиентов ещё имеет в составе оксид хрома (Cr_2O_3) и оксид титана (TiO_2) которые образуют твердый раствор с окисью алюминия и в зависимости от среды обжига придают керамике либо красновато-коричневый оттенок, либо темно-серый. В спеченных керамиках БК и ТК количество $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ составляет величину порядка 90 масс. %, остальное приходится на перечисленные добавки.

После спекания базовых составов белой и темной керамик на их поверхности были визуально обнаружены пятна, отличающиеся оттенком от основного цвета. По данным РФА базовые ТК и БК имеют в составе две кристаллические фазы: корунд $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, и анортит $\text{CaAl}_2\text{SiO}_8$. Объемная доля анортита $\text{CaAl}_2\text{SiO}_8$ для ТК составила ~6 %, а для БК ~8 %. СЭМ и ЭДС исследования на ТК и БК в области анортитных пятен фиксировали повышенное количество Zr и Ca по сравнению с областями вне этих пятен.

С целью исключения образования следов анортита при обжиге керамики были разработаны предложения по корректировке составов керамической массы для получения керамики ТК-М и БК-М.

В настоящей работе на основании изученной последовательности изменения фазового состава при спекании согласно тройной диаграмме состояния $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ предложены и реализованы способы получения плотной керамики с более совершенной структурой без анортитных включений. Основным нововведением работы явилось исключение циркона из классических составов шихт керамик ТК и БК, а также введение в шихту карбоната магния (MgCO_3) и корректировка содержания CaCO_3 . В результате были сделаны следующие основные выводы:

1. Наиболее вероятное наличие следов анортита и анортитовых пятен в керамике связано с взаимодействием оксида кальция (CaO) с цирконом (ZrSiO_4) с образованием оксида циркония и волластонита $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ при температурах выше 1250°C , что приводит при взаимодействии с оксидом алюминия и кварцем к появлению анортита. Таким образом, исключение циркона из шихт керамических материалов позволит избежать наличия остаточного анортита и анортитовых пятен на керамических изделиях.

2. Анализ полученных экспериментальных данных свидетельствует о позитивном влиянии исключения циркона из состава шихты на структуру спеченных керамик. Для модифицированных составов ТК-М и БК-М наблюдается уменьшение среднего размера зерна, уменьшение размеров пор, уменьшение пористости, увеличение плотности и усадки относительно базовых керамик. Такой характер изменений свойств свидетельствует о более высокой степени спекания модифицированных составов. Исключение циркона в новых составах шихт ТК-М и БК-М по сравнению с базовыми ТК и БК обеспечивает снижение водопоглощения. Кроме этого, в структуре спеченных образцов керамики с модернизированными составами шихт отсутствуют визуальные следы «анортитовых пятен» и по данным рентгенофазового анализа отсутствует фаза анортита.

ЛИТЕРАТУРА

1. Толкачева А.С., Павлова И.А. Технология керамики для материалов электронной промышленности. Ч. 1: учеб. пособие. Екатеринбург: Уральский университет, 2019. 124 с.
2. Wahsh M., Khattab R.M., Awaad M. Thermo-mechanical properties of mullite/zirconia reinforced alumina ceramic composites // Materials & Design. 2012. Vol. 41. P. 31–36.

УДК 621.319.42
ГРНТИ 45.35.29

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ КОНДЕНСАТОРНОЙ ПОЛИМЕРНОЙ ПЛЁНКИ С ПРОФИЛЬНОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИЕЙ

Ходжамов А.А., Печников А.В., Плотников А.П.

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра Великого»

В работе представлены результаты комплексного исследования металлизированных полимерных пленок, широко применяемых в электротехнической промышленности для создания конденсаторов и элементов изоляции. Исследование включало экспериментальные методы анализа поверхностного сопротивления металлизации, относительной диэлектрической проницаемости, а также микроскопические и химические исследования поверхности пленок. Параллельно была разработана и реализована мультифизическая численная модель распределения плотности тока в условиях профильной металлизации с использованием пакета COMSOL Multiphysics. Полученные результаты позволили выявить закономерности распределения сопротивления по поверхности, оценить точность измерительных методик, а также сопоставить экспериментальные данные с расчетными. Выдвинуты гипотезы о влиянии структурных дефектов полимера (сферолитов) на адгезию металлического слоя. Работа имеет практическое значение для повышения надежности и долговечности металлизированных пленок в составе электротехнических устройств.

Ключевые слова: поверхностное сопротивление, профильная металлизация, металлоплёночные конденсаторы.

FEATURES OF SURFACE RESISTANCE MEASUREMENT FOR CAPACITOR POLYMER FILM WITH PROFILED METALLIZATION

Hojamov A.V., Pichnikov A.A., Plotnikov A.P.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

This paper presents the results of a comprehensive study of metallized polymer films, which are widely used in the electrical industry for creating capacitors and insulation elements. The study included experimental methods for analyzing the surface resistance of the metallization, relative permittivity, as well as microscopic and chemical studies of the film surfaces. In parallel, a multiphysics numerical model of current density distribution under profiled metallization conditions was developed and implemented using the COMSOL Multiphysics package. The obtained results revealed patterns of resistance distribution across the surface, assessed the accuracy of measurement techniques, and allowed for a comparison of experimental data with calculated values. Hypotheses were put forward regarding the influence of structural polymer defects (spherulites) on the adhesion of the metal layer. This work has practical significance for improving the reliability and durability of metallized films in electrical devices.

Keywords: surface resistance, profiled metallization, metallized film capacitors.

Металлизированные полимерные пленки на основе двуосноориентированного полипропилена (БОПП) являются ключевым материалом для производства пленочных конденсаторов и элементов изоляции [1]. Качество металлизации и однородность структуры определяют эксплуатационные характеристики устройств, такие как электрическая прочность, уровень потерь и долговечность [2]. Современные тенденции миниатюризации и повышения рабочих напряжений требуют разработки надежных методов контроля и уточненного моделирования процессов протекания тока в металлизированных слоях [3]. Настоящая работа направлена на комплексное исследование образцов пленок различных производителей с целью выявления факторов, влияющих на электрические и структурные параметры.

В исследовании использовались металлизированные пленки производителей Filmet, Anhui и Birkelbach с различной толщиной полимерной основы и типом металлизации (Al, Zn, Al+Zn). Для экспериментальных измерений были применены следующие приборы:

- измеритель поверхностного сопротивления тонких пленок HELPASS HPS2524;
- анализатор иммитанса (RLC-метр) HIOKI IM3570;
- оптический микроскоп с увеличением до $\times 100$;
- оптиметр для измерения толщины пленок с точностью $\pm 0,5$ мкм;

- сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) Zeiss SUPRA 55VP-25–78 с ЭДС-анализатором.

В качестве расчетного инструмента использовался программный комплекс COMSOL Multiphysics.

Для определения поверхностного сопротивления применялся четырехзондовый метод, реализованный в приборе HELPASS HPS2524. Измерения выполнялись по двум координатам с последующим усреднением данных. Относительная диэлектрическая проницаемость оценивалась методом плоского конденсатора с использованием насыщенного раствора NaCl в качестве верхнего электрода.

Микроструктура пленок изучалась методами светлопольной микроскопии и СЭМ. Химический состав металлизированного слоя анализировался с помощью энергодисперсионного рентгеновского спектрометра. Для уточнения влияния геометрии образца и положения электродов была построена трехмерная модель распределения плотности тока в COMSOL Multiphysics с использованием модулей Electric Currents и Electric Currents in Shells.

Экспериментальные исследования позволили получить профили сопротивления металлизации для различных пленок. Установлено, что средние значения сопротивления не превышают 20 % от паспортных данных производителей. Микроскопические исследования показали наличие сферолитов эллиптической формы в пленках китайского производства, в то время как для пленок Filmet подобные дефекты не выявлены. СЭМ-анализ подтвердил наличие зернистой структуры металлизации, свидетельствующей об использовании нескольких металлов.

Мультифизическое моделирование в COMSOL показало, что кажущийся рост поверхностного сопротивления на краях пленки обусловлен перераспределением линий тока и увеличением пути его протекания. Численные расчеты подтвердили зависимость измеряемого сопротивления от положения электродов, а также позволили оценить погрешность метода, составляющую не менее 10 %. Для корректных измерений рекомендуется использование прямоугольных образцов с соотношением сторон $L/B \geq 1$.

В результате исследований установлены следующие факты:

1. Поверхностное сопротивление пленок находится в допустимых пределах и в среднем соответствует данным производителей.

2. Относительная диэлектрическая проницаемость пленок Filmet согласуется с литературными значениями (2,2–2,4), тогда как пленки

китайских производителей показали несколько заниженные значения.

3. Сферолиты, возникающие в процессе двуслойной ориентации полипропилена, оказывают влияние на однородность поверхности и адгезию металла.

4. СЭМ и химический анализ выявили преобладание цинка в толстой части металлизации китайских пленок, в то время как в пленках Filmjet наблюдались следы меди.

5. Модель COMSOL подтвердила релевантность экспериментальных данных и показала характерные краевые эффекты, что важно учитывать при разработке методик измерений.

6. Вклад профильной металлизации в потери конденсатора оказался значительным, что требует учета в инженерных расчетах.

Комплексное исследование металлизированных полимерных пленок показало, что сочетание экспериментальных методов и мультифизического моделирования позволяет достоверно оценить параметры металлизации и выявить факторы, влияющие на их стабильность. Основными источниками нестабильности являются островковая структура тонких слоев алюминия, наличие сферолитов, а также краевые эффекты при измерении сопротивления. Для практического применения рекомендуется уточнение методик измерения с учетом поправочных коэффициентов, а также разработка альтернативных бесконтактных методов контроля. Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования технологий производства БОПП-пленок, повышения их надежности и долговечности в составе электротехнических устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pechnikov A.V., Hojamov A.A., Ermilov V. Efficiency Evaluation of the Self-Healing Process of Metallized Film Capacitors for Polymer Films with Various Chemical Composition // 2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElCon). Saint Petersburg, 2024. P. 620–624.

2. Grundmeier G., Stratmann M. Adhesion and de-adhesion mechanisms at polymer/metal interfaces: Mechanistic understanding based on in situ studies of buried interfaces // Annual Review of Materials Research. 2005. Vol. 35. P. 571–615.

3. Bhushan B. Nanomechanical characterization of solid surfaces and thin films // Nanotribology and nanomechanics. Springer, 2017. P. 131–154.

УДК 53.082.531
ГРНТИ 50.09.37

РАЗРАБОТКА ЛАЗЕРНОГО ДАТЧИКА ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЯ НАЛИЧИЯ СУБМИЛЛИМЕТРОВЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЭКБ И ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Чеботарев А.А.^{1,2}, Ахмадуллин Р.М.¹

¹АО «НИИ «Гириконд»,

²Университет ИТМО

В настоящей работе рассматривается разработка датчика, на основе модификации оптической схемы лазерных диффузионных датчиков, для решения задачи неразрушающего контроля наличия субмиллиметровых металлических элементов (200-800 мкм) при производстве ЭКБ и электротехники на расстоянии 100 мм. Осуществлён подбор электронных и оптических компонентов, экспериментально подтверждено, что датчик с излучателем на длине волны 808 нм обеспечивает надёжное распознавание контролируемого компонента с изменением уровня сигнала на осциллограмме порядка 4 В при изменении статуса наличия элемента.

Ключевые слова: лазерный датчик, система управления, детектирование, технология автоматизации.

DEVELOPMENT OF A LASER SENSOR FOR NON-DESTRUCTIVE DETECTION OF SUB-MILLIMETER METALLIC ELEMENTS IN ELECTRONICS AND ELECTRICAL ENGINEERING MANUFACTURING

Chebotarev A.A.^{1,2}, Akhmadullin R.M.¹

¹Research Institute Girikond, JSC,

²ITMO University

This paper discusses the development of a sensor, based on a modified optical design of laser diffuse sensors, to solve the problem of non-destructive detection of sub-millimeter (200-800 μm) metallic components at a distance

of 100 mm in the manufacturing of electronic components and electrical equipment. The selection of electronic and optical components was carried out, and it was experimentally confirmed that the sensor, equipped with an 808 nm wavelength emitter, ensures reliable detection of the target component. This is demonstrated by a signal level change on the waveform of approximately 4 V, corresponding to the change in the element's presence status.

Keywords: laser sensor, control system, detection, automation technology.

Применение автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) и инструментов диагностики становится необходимым условием качественного производства сложных изделий, включающих мелкоразмерные элементы, нуждающиеся в тщательном контроле положения и исправности, в связи с этим возникает потребность в разработке новых датчиков с улучшенными характеристиками для таких приложений как:

- контроль целостности пуансона во время работы пробивного станка, который используется для создания керамических микросхем;
- контроль корректности изготовления контакта детали геркона;
- контроль наличия пружины изгиба из проволоки диаметром 200 мкм в устройстве защиты от дугового пробоя (УЗДП) при его сборке;
- контроль положения выводов пассивных электронных компонентов (конденсаторов, варисторов, терморезисторов и т.д.).

На сегодняшний день существует множество различных типовых бесконтактных оптических модулей для автоматических систем управления технологическими процессами. При этом определение металлического объекта размером 200–800 мкм, который будет находиться на фоне других объектов из пластмассы и металла, без использования высокоточных систем позиционирования не представляется возможным с помощью существующих стандартных модулей. Наиболее гибкая для тонкой настройки и способная решить эту задачу система технического зрения представляется нам экономически нецелесообразной, требует энергоемких и ресурсоемких алгоритмов обработки данных, что обуславливает необходимость поиска новых технических решений.

Однако можно сделать вывод, что наиболее подходящий метод контроля для решения данной задачи – диффузионный лазерный датчик. Тем не менее, существующие датчики не могут быть напрямую применены для решения рассматриваемой задачи и требуют увеличения

разрешения при сохранении дальности детектирования не менее 100 мм. Выбранное расстояние обусловлено необходимым свободным пространством для осуществления работы оператором при реализации решения полуавтоматизации технологического процесса.

Таблица 1 – Модели популярных фирм производителей датчиков диффузионного отражения

№ п/п	Производитель	Модель	Мини- мальный иденти- фици- руемый объект, мм	Рассто- яние до объек- та, мм	Время сра- баты- вания, мс	Длина вол- ны, нм	Ссыл- ка
1	Autonics Corporation	BTS30	0,15	10	1	650	[1]
2	Autonics Corporation	BJN50	0,2	50	1	650	[2]
3	Autonics Corporation	BJN100	0,2	100	1	650	[2]
4	ifm electronic	OJ5158	0,8	150	1	650	[3]
5	Autonics Corporation	BJ1M	20	100	1	850	[2]
6	KIPPRIBOR	OK50	200	2000	10	880	[4]
7	Autonics Corporation	BMS300	60	300	1	940	[5]

Таким образом, целью настоящей работы был поиск подходов к модификации оптической схемы лазерных диффузионных датчиков для решения задачи неразрушающего контроля наличия субмиллиметровых металлических элементов при производстве ЭКБ и электротехники. Основные задачи включают технико-экономическое обоснование выбора компонентов устройства, изучение спектральных характеристик материалов, экспериментальные исследования воздействия лазерного излучения на детали, проектирование и расчёт оптической схемы датчика, анализ нагревания элементов конструкции, подбор компонентов устройства, создание трёхмерной модели прототипа, изготовление опытного

образца, проверку работоспособности электрической схемы и проведение лабораторных испытаний системы регистрации сигналов.

Проведены экспериментальные исследования порогов модификации поверхности деталей УЗДП и соответствующих спектральных зависимостей коэффициентов отражения до начала модификаций. Установлено минимальное значение порога лазерной модификации поверхности, равное $0,9 \text{ кДж/см}^2$, наблюдаемое для двуплечего рычага. Анализ спектров выявил оптимальную длину волны возбуждающего излучения в диапазоне 750-825 нм, характеризующемся максимальным различием коэффициентов отражения ($\sim 25\%$) среди исследуемых деталей.

Используя полученные данные, была разработана оптическая схема датчика с применением программного обеспечения Zemax OpticStudio (рис. 1). Подбор оптических компонентов обеспечил функционирование устройства на длине волны 808 нм при мощности лазера 1 Вт. При исследовании объекта (пружина изгиба из проволоки диаметром 200 мкм), была оптимизирована величина рабочего расстояния до наблюдения равного 100 мм. Проведено численное моделирование методом конечных элементов влияния изменения взаимного положения излучателя и контролируемых объектов, демонстрирующее способность системы обнаруживать присутствие или отсутствие элемента даже при линейных отклонениях до $\pm 3 \text{ мм}$ в плоскости установки и до $\pm 15 \text{ мм}$ вдоль направления распространения излучения.

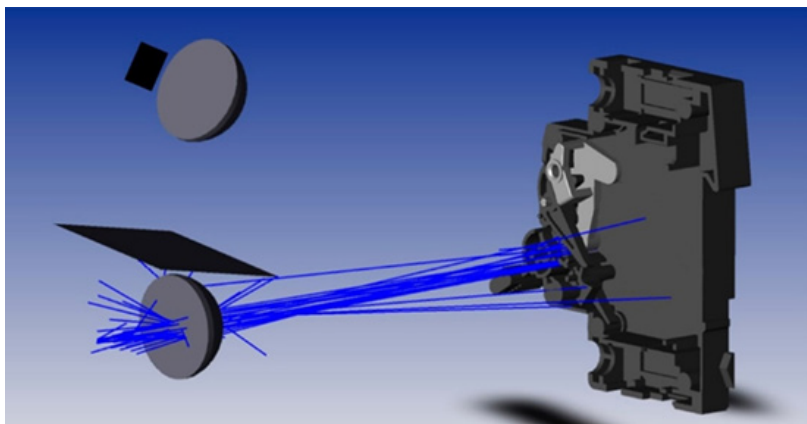


Рисунок 1 – Изометрическое изображение оптической схемы в программе Zemax OpticStudio

Выполнен расчёт теплового нагрева в COMSOL Multiphysics, который подтвердил стабильность температурных условий эксплуатации при многократных (до пяти циклов) процедурах мониторинга.

Осуществлён подбор электронных компонентов, проектирование электрической схемы, изготовление опытного образца платы управления лазерным датчиком и составление алгоритма функционирования устройства.

Создана трёхмерная CAD-модель конструкции датчика (рис. 2). Изготовлены опытные образцы механических узлов и деталей согласно разработанным чертежам, проведена проверка работоспособности собранного прототипа.

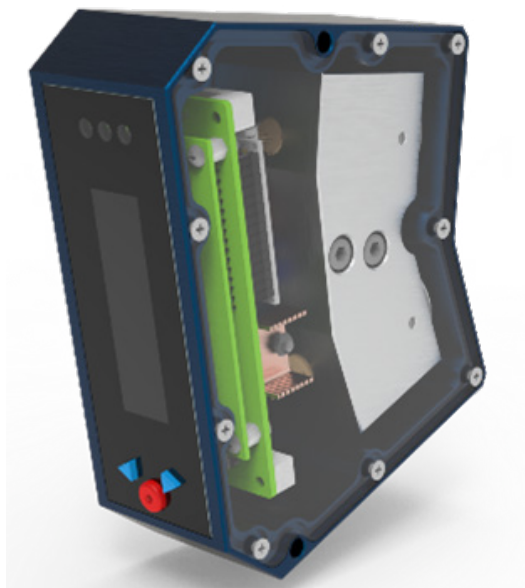


Рисунок 2 – Разработанная CAD-модель датчика

Экспериментально подтверждено, что прототип датчика обеспечивает надёжное распознавание контролируемого компонента (пружины изгиба из проволоки диаметром 200 мкм) с изменением уровня сигнала излучателя (с рабочей длиной волны 808 нм) на осциллограмме порядка 4 В при изменении статуса наличия пружины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Информация с сайта продавца компонентов для автоматизированных линий РусАвтоматизация. URL: <https://rusautomation.ru/catalog/documents/autonics-bts-catalog.pdf> (дата обращения: 22.09.2025).
2. Информация с сайта продавца компонентов для автоматизированных линий РусАвтоматизация. URL: <https://rusautomation.ru/catalog/documents/autonics-bj-catalog.pdf> (дата обращения: 22.09.2025).
3. Информация с сайта производителя ifm electronic модуля лазерного датчика диффузного отражения. URL: <https://www.ifm.com/ru/ru/product/OJ5158> (дата обращения: 10.11.2022).
4. Информация с сайта производителя ОВЕН: оптический бесконтактный датчик диффузного отражения. URL: <https://owen.ru/product/ok50/specifications> (дата обращения: 22.09.2025).
5. Информация с сайта продавца компонентов для автоматизированных линий РусАвтоматизация. URL: <https://rusautomation.ru/promavtomatika/bms-series> (дата обращения: 10.11.2022).

УДК 666.1.013
ГРНТИ 61.35.31

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СВОЙСТВ СТЕКОЛ РАЗНЫХ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РАСТРОВ

Хренкова Е.А., Буренкова Н.А., Рыбакова М.Е.

АО «ЦНИИ «Электрон»

В докладе приводится исследование проблемы подбора свойств, критерии выбора производителя стекла и технологии для производства стеклянных растров мелкоструктурных сеток фотоэлектронных приборов.

Ключевые слова: стеклянный растр, скрайбирование, химический состав стекла, твердость стекла.

INVESTIGATION OF INFLUENCE OF GLASS PROPERTIES OF DIFFERENT MANUFACTURERS ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF RASTERS

Khrenkova E.A., Burenkova N.A., Rybakova M.E.

Central Research Institute Electron, JSC

The report provides a study of the problem of selecting properties, criteria for choosing glass manufacturer and technologies for the production of glass rasters of fine-structured grids of photoelectronic devices.

Keywords: glass raster, scribing, chemical composition of glass, glass hardness, glass density.

Стеклянный растр представляет собой стеклянную пластину правильной геометрической формы в виде квадрата размером 130х130 мм и толщиной от 4 до 6 мм. Обе стороны пластины механически обработаны, с одной стороны выведена плоскость посредством шлифовки, с другой стороны пластина полностью заполирована. Для изготовления растра

используется листовое стекло высшего сорта по ГОСТ 111-2014 [1]. Данное изделие является матрицей для производства мелкоструктурных сеток фотоэлектронных приборов [2].

Технология изготовления растров была разработана во второй половине XX века, когда производство листового стекла осуществлялось методом вертикального вытягивания [3]. На данный момент листовое стекло производится флоат способом.

В связи с возникновением большого количества дефектов после механической обработки на стеклянном растре, изготовленном флоат методом, было принято решение изучить параметры стекла, произведенного в современных условиях. Известно, что в зависимости от способа изготовления стекла и его марки процессы механической обработки будут иметь ряд особенностей [4]. В работе был поставлен ряд задач: проанализировать возможные причины возникновения дефектов на стеклянном растре, найти зависимость влияния физико-химических свойств на механическую обработку стеклянного растра и выявить, в условиях ограниченности импортозамещения, подходящих производителей листового стекла для изготовления растров.

Работа была выполнена по трем этапам. Первый этап – теоретическое исследование – заключался в поиске информации об использовании различных марок стекол для изготовления растров. Был проведен первичный анализ рынка возможных поставщиков этих стекол, а также проведена закупка материалов у некоторых из них.

Второй этап – производственная проба – заключался в исключении неподходящих образцов стекла на процессах механической обработки. Часть образцов была исключена на этапе шлифовки и полировки, так как по чистоте поверхности были получены неудовлетворительные результаты для дальнейшего использования растров. Также часть стекол была исключена при проведении процесса скрайбирования.

Третий, заключающий этап, более детальное исследование свойств стекол, прошедших производственную пробу.

В исследовании приводятся результаты анализов основных свойств для четырех образцов стекол различных производителей. Исследуемыми параметрами являлись: химический состав и твердость материала.

Для проведения анализа химического состава был использован Спектрометр ЯМР (ядерного магнитного резонанса). Полученные результаты [5] показали, что во всех образцах основу структуры стекла

составляют четыре основных компонента SiO_2 (72,58÷74,31 мас.%), Na_2O (12,56÷13,37 мас.%), CaO (6,35÷8,46 мас.%), K_2O (0,19÷0,62 мас.%), которые и являются стеклообразователями в листовом стекле.

Анализ твердости стекол проводилась по методу Виккерса [6]. Анализ показал, что твердость используемого в производстве листового стекла марки М1 варьируется в диапазоне 581÷603 Па. Твердость материала определяет особенности технологии процессов механической обработки и чем выше ее значения, тем стекло более устойчиво к механической деформации при дальнейшей обработке.

На сегодняшний день было опробовано 7 марок стекол. Были сделаны дополнительные углубленные исследования свойств для образцов, представляющих наибольший интерес для сравнения и понимания влияния физико-химических свойств на дальнейшее использование в производстве.

Выявлено, что у разных производителей стекла, выпускаемые под одной и той же маркой согласно ГОСТ, могут иметь абсолютно разные свойства, что подтверждается результатами химического анализа и определением твердости стекла. Для получения годных растров твердость должна быть не менее 595 Па [7].

В ходе анализа стекол нескольких производителей выявлены наиболее подходящие стекла и исключен ряд стекол, не удовлетворяющих нашим требованиям по нескольким критериям на этапах механической обработки. Для дальнейшей оптимизации процессов механической обработки стеклянных растров необходимо продолжить исследование стекол подходящих нам производителей, провести производственные пробы еще не исследуемых стекол и рассмотреть возможность использования оптических стекол по этому направлению в условиях действующих технологических режимов.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 111–2014. Стекло листовое бесцветное. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2015. 12 с.
2. Буренкова Н.А., Ключник А.С., Селицкий В.А. Оптимизация технологии изготовления высококачественных сеточных узлов для электровакуумных приборов // Материалы XI ежегодной науч.-техн. конф. молодых специалистов «Техника и технология современной фотоэлектроники». СПб., 2020. URL: <https://www.niielectron.>

ru/optimizaciya-tehnologii-izgotovleniyavysokokachestvennyh-setochnyh-uzlov-dlya-elektrovakuumnyh-priborov/ (дата обращения: 02.09.2025).

3. Павлушкин Н.М. Химическая технология стекла и ситаллов. М.: Стройиздат, 1983. 432 с.

4. Качалов Н. Технология шлифовки и полировки листового стекла. Л.: Изд-во Акад. наук СССР, 1958. 382 с.

5. Гурина К.Э. Отчет по производственной практике (Технологической (проектно-технологической) практике). СПб.: СПбПУ, 2025.

6. ГОСТ ISO 9385–2013. Стекло и изделия из него. Метод определения твердости. М.: Стандартиформ, 2014. 8 с.

7. Хренкова Е.А., Рыбакова М.Е. Влияние химического состава стекла на физико-механические свойства раstra // Труды XIII науч.-техн. конф. молодых специалистов «Техника и технология современной фотоэлектроники». СПб., 2025. С. 56.

УДК 546.57
ГРНТИ 47.09.61

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИИ МЕЖДУ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ СЕРЕБРА И ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬЮ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ZnO/Ag

Радайкин Д.Г.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова

В работе рассматривается корреляция между концентрацией серебра и теплопроводностью пасты. Отмечается положительный эффект осаждённого серебра на теплопередающие характеристики пасты. Осаждение 2 масс. % серебра привело к росту проводимости тепла в 5 раз.

Ключевые слова: оксид цинка, наночастицы серебра, теплопроводящие пасты.

STUDY OF CORRELATION BETWEEN SILVER CONCENTRATION AND THERMAL CONDUCTIVITY OF ZnO/Ag COMPOSITE MATERIALS

Radaykin D.G.

Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI» named after V. I. Ulyanov (Lenin)

The paper examines the correlation between silver concentration and paste thermal conductivity. A positive effect of deposited silver on the paste's heat transfer properties is noted. A deposition of 2% silver by weight resulted in a fivefold increase in thermal conductivity.

Keywords: zinc oxide, silver nanoparticles, thermally conductive pastes.

Разработка высокоэффективных теплопроводящих паст является ключевой задачей в условиях импортозамещения и роста мощности электронных устройств. В качестве теплопроводящей основы могут выступать различные соединения такие как: металлы,

керамические материалы и углеродные материалы. Каждый из них обладает своими преимуществами и недостатками. Выбор основы зависит от требуемых характеристик пасты: теплопроводности, электрической изоляции, стоимости и условий эксплуатации.

Среди наполнителей для теплопроводящих паст оксид цинка является самым сбалансированным вариантом для массового применения. Это обусловлено оптимальным сочетанием цены, теплопроводности и диэлектрических свойств. Но в свою очередь чистый оксид цинка в составе паст дает довольно низкий коэффициент теплопроводности (около 1 Вт/(м·К)).

Одним из перспективных направлений повышения теплопроводности паст является модифицирование оксида цинка наночастицами серебра для создания композитных материалов с улучшенными теплофизическими свойствами.

В исследованиях [1, 2] было проведено модифицирование порошков ZnO наночастицами серебра методом химического осаждения, подобная методика уже использовалась в предыдущих работах по модифицированию оксида цинка [3-5]. Были синтезированы образцы с содержанием Ag: 0,2; 0,5 и 2 масс.%. Измерения теплопроводности проводились на экспериментальной установке, основанной на методе выравнивания температур двух медных шайб, разделённых слоем пасты. Изучение поверхностной структуры оксида цинка, модифицированного серебром, происходило с помощью сканирующей микроскопии [6].

Результаты показали прямую корреляцию между концентрацией серебра и коэффициентом теплопроводности λ .

Таблица 1 – Результаты исследования теплопроводности композита

Образец	Содержание серебра, масс. %	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К)
Чистый ZnO	0	1,03–1,06
ZnO/Ag-0,2	0,2	3,17–3,47
ZnO/Ag-0,5	0,5	4,09–4,74
ZnO/Ag-2	2	5,32–5,49

Полученные данные объясняются рядом эффектов, возникающих в теплопроводящих пастах:

1) Высокая электронная теплопроводность серебра (около 429 Вт/(м·К)) способствует формированию проводящих перколяционных

кластеров внутри композита [7]. В свою очередь наночастицы серебра создают дополнительные пути для переноса тепла через электронные механизмы, что особенно важно в материалах с диэлектрической матрицей.

2) На теплопроводящие характеристики также влияет морфология полупроводникового материала (ZnO). Использование наноразмерных частиц ZnO (например, нанопорошки) увеличивает удельную поверхность и улучшает дисперсность в полимерной матрице [8].

3) Самым важным аспектом повышения теплопроводности в данном исследовании является синергетический эффект. Комбинация ZnO и Ag позволяет совместить фононный механизм переноса тепла (характерный для оксидов) и электронный (обеспечиваемый металлом). Модификация поверхности ZnO наночастицами Ag снижает межфазное тепловое сопротивление и уменьшает рассеяние фононов на границах раздела фаз.

В заключение к данной работе можно отметить, что наночастицы серебра значительно повышают теплопроводность композитных паст. Наибольший эффект был достигнут при содержании 2 масс. % наночастиц серебра. Дальнейшие исследования будут направлены на оптимизацию морфологии частиц [9], изучение гибридных наполнителей и применение новых методов диспергирования для улучшения стабильности и эксплуатационных характеристик паст.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев С., Лукьянов В., Радайкин Д. Разработка новых образцов современных теплопроводных паст для отечественной промышленности путем модифицирования нанопорошков // Полупроводниковая светотехника. 2024. № 3. С. 42–46.
2. Радайкин Д. Разработка композитных материалов для создания высокоэффективных теплопроводящих паст // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2025». М.: МАКС Пресс, 2025.
3. Радайкин Д., Бобков А. Влияние плазмонного эффекта наночастиц серебра на каталитическую активность оксида цинка // Сенсорное Слияние — 2023: докл. IV Всесоюз. конгр. по сенсорике и экономике. СПб., 2023. С. 153–157.
4. Maraeva E., Radaykin D., Bobkov A. [et al.] Sorption analysis of

composites based on zinc oxide for catalysis and medical materials science // *Chimica Techno Acta*. 2022. Vol. 9. No. 4. P. 20229422.

5. Наночастицы, наносистемы и их применение. Каталитические наносистемы / под ред. В.А. Мошникова, А.И. Максимова. СПб.: Изд. СПб-ГЭТУ (ЛЭТИ), 2022. 219 с.

6. Бобков А.А., Козодаев Д.А. Основы атомно-силовой микроскопии: лабораторный практикум. СПб.: Изд. СПбГЭТУ (ЛЭТИ), 2024. 128 с.

7. Тарасевич Ю. Перколяция: теория, приложения, алгоритмы. М.: Едиториал УРСС, 2002. 112 с.

8. Козодаев Д., Муратова Е., Мошников В. От нанотехнологии к наноархитектонике // Научно-техническая конференция СПб НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио. 2024. № 1 (79). С. 350–352.

9. Максимов А., Мошников В., Таиров Ю. [и др.] Основы золь-гель-технологии нанокompозитов. 2-е изд. СПб.: Элмор, 2008. 255 с.

УДК 621.762
ГРНТИ 53.39.00

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВТОРИЧНОГО ТАНТАЛОВОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПОРОШКОВ КОНДЕНСАТОРНОГО КЛАССА

Акаев Е.Э., Будин О.Н., Котляров В.И., Приходько А.С.

АО «Государственный научно-исследовательский и проектный
институт редкометаллической промышленности Гиредмет»

В работе представлен обзор литературы, связанной с переработкой танталовых отходов различными методами (электронно-лучевая плавка, иодизация, выщелачивание) с целью получения порошков конденсаторного класса, способных удовлетворить потребности различных типов конденсаторов.

Ключевые слова: танталовый порошок, отходы, переработка.

POSSIBILITIES OF APPLICATION TANTALUM SCRAP FOR PRODUCTION CAPACITOR GRADE TANTALUM POWDER

Akaev E.E., Budin O.N., Kotlyarov V.I., Prikhodko A.S.

The federal state research and design
institute of rare metal industry Giredmet, JSC

The paper presents a review of the articles related to the processing of tantalum waste by various methods (electron beam melting, iodization, leaching) in order to obtain capacitor grade powders capable of meeting the needs of various types of capacitors.

Keywords: tantalum powder, scrap, processing.

Тантал – редкий металл, ключевым потребителем которого является электронная промышленность. По сравнению с бедными на тантал рудами, вторичное сырье содержит многократно более высокую долю тантала. Это делает его переработку крайне интересной. Существует несколько способов получения танталового порошка:

1) HDH – основан на хрупкости гидрида тантала, который измельчают в мельницах и дегидрируют. Продукт – низкозарядный порошок с зарядом анодов от 1000 до 6500 мкКл/г [1];

2) Натрийтермическое восстановление K_2TaF_7 – основан на химической реакции восстановления. Продукт – порошок с зарядом анодов от 10000 до 100000 мкКл/г [2];

3) Магнийтермическое восстановление $Ta_2O_5/TaCl_5$ – основан на химической реакции восстановления. Продукт – порошок с зарядом анодов от 85000 до 150000 мкКл/г [3].

В исследовании предлагается обзор литературы, посвященной переработке танталовых отходов в порошок.

В работе [4] представлены способы переработки элементов печей и анодов танталовых конденсаторов, забракованных на разных стадиях производства: спеченные, заформованные, после пиролиза. Схема для переработки элементов печей: травление в соляной кислоте для очистки поверхности, гидрирование, измельчение и отмывка от железа, агломерировали с последующим раскислением и выщелачиванием. Схема для переработки анодов после пиролиза: измельчение анодов, выщелачивание марганца раствором H_2SO_4 или HCl с добавлением H_2O_2 , довыщелачивание марганца в растворе HCl и HF , раскисление порошка магнием, выщелачивание магния раствором HCl , гидрирование, измельчение, выщелачивание железа раствором HCl , агломерация. Данными схемами удается получить порошок, состав которого представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Содержание примесей в агломерированном порошке, мас.%

Fe	Mn	Mg	O	C
0,001-0,002	≤0,0005	≤0,0005	0,12-0,17	0,002-0,003

В работе [5] представлен способ переработки танталового лома электронно-лучевым переплавом с получением слитков, содержание тантала в которых достигает 99,987 мас.%. Состав исходного сырья и одного из полученных слитков, представлены в таблице 2.

В работе [6] освещается способ переработки танталового сплава Ta-2,5W и продуктов измельчения иодизацией с последующим восстановлением водородом в дуге. Метод иодидного рафинирования высоко-селективен по отношению к танталу, так как летучесть его иодида (TaI_5) существенно выше, чем у большинства примесных элементов, что позво

ляет получать порошок высокой чистоты и высокой удельной поверхностью.

Таблица 2 – Содержание примесей в ломе и слитке

Тип	Fe	Nb	W	Al	Mo	Mn	Cr	O	C
Лом	0,12	0,03	0,03	0,09	0,03	0,02	0,02	0,38	0,19
Слиток	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,003	0,001

На основании проведенного обзора литературных источников можно сделать следующий вывод: существующее разнообразие методов переработки предоставляет технологическую гибкость, позволяя выбирать и оптимизировать процесс в зависимости от вида, морфологии и состава исходного сырья, а также от целевых параметров конечного танталового порошка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Орлов В.М. [и др.] Высокотехнологичная продукция из редкометалльного сырья Кольского полуострова // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2017. № 14. С. 248–251.
2. Небера А.Л. Физико-химические основы получения нанокристаллических порошков тантала и разработка способа получения из них порошков конденсаторного класса: дис. ... канд. техн. наук. М., 2016. 175 с.
3. Нечаев А.В. [и др.] Получение танталового порошка магнийтермическим методом // Труды Кольского научного центра РАН. 2015. № 5 (31). С. 176–178.
4. Орлов В.М., Киселев Е.Н. Переработка отходов производства танталовых конденсаторов // Новые подходы в химической технологии минерального сырья. Применение экстракции и сорбции. 2013. С. 103.
5. Vutova K., Stefanova V., Iliev P. Application of electron beam melting method for recycling of tantalum scrap // Materials Research Express. 2024. Vol. 11. No. 10. P. 106505.
6. Lessard J.D. [et al.] A new technology platform for the production of electronic grade tantalum nanopowders from tantalum scrap sources // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2015. Vol. 48. P. 408–413.

УДК 621.357
ГРНТИ 31.15.33

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО ПОРИСТОГО АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

Соколов А.М., Муратова Е.Н.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова

В работе рассматриваются особенности формирования пористого оксида алюминия методом электрохимического анодирования. Представлены результаты исследования морфологии поверхности. Рассмотрен ряд возможных применений полученных структур.

Ключевые слова: пористый анодный оксид алюминия, порообразование, электрохимическое травление, растровая электронная микроскопия.

FEATURES OF FORMATION AND APPLICATION AREAS OF NANOSTRUCTURED POROUS ANODIC ALUMINUM OXIDE

Sokolov A.M., Muratova E.N.

Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI» named after V. I. Ulyanov (Lenin)

This research examines the features of the formation of porous aluminum oxide by the method of electrochemical anodization. The results of surface morphology studies are presented. A number of possible applications of the obtained structures are discussed.

Keywords: porous anodic aluminum oxide, pore formation, electrochemical etching, scanning electron microscopy.

Пористый анодный оксид алюминия (далее ПАОА) – это материал, получаемый в результате электрохимического анодирования алюминия. Он представляет собой оксидную плёнку Al_2O_3 с упорядоченной системой нанопор, расположенных перпендикулярно поверхности алюминиевой

подложки (рисунок 1а). ПАОА востребован за счет регулярности структуры, большой удельной площади поверхности и возможности управления морфологией.

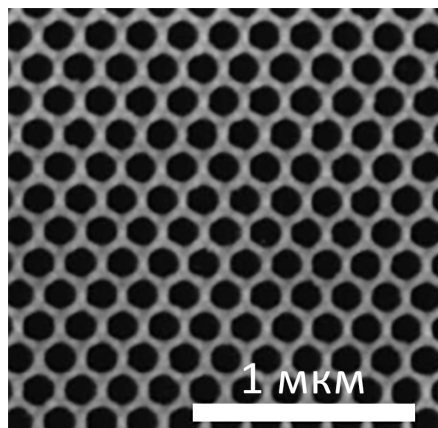
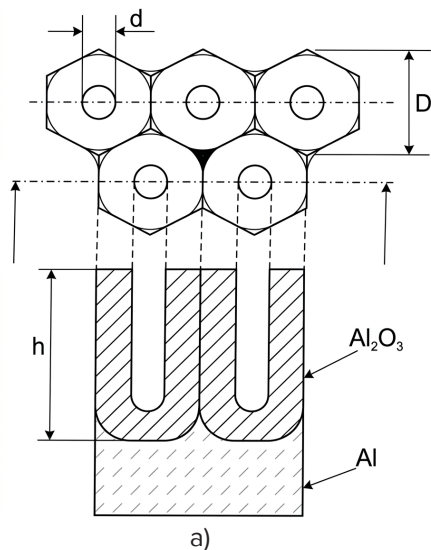


Рисунок 1 – а) Схематическое изображение фрагмента ПАОА (d - диаметр поры, D - диаметр ячейки, h - высота поры и пористого оксида) [1], б) РЭМ изображение морфологии поверхности ПАОА [2]

Формирование пористого алюминия методом ЭХТ проходит в вертикальной электролитической ячейке прижимного типа, схема которой приведена на рисунке 2.

Перед началом ЭХТ необходимо обработать фольгу ацетоном спиртом и водой поочередно для удаления грязи. Далее фольга размещается в ячейку с уплотнителем полностью закрывая отверстие для анодирования, снизу прижимается текстолитовым электродом. Затем ячейка заполняется электролитом на основе щавелевой кислоты ($0,3\text{M}(\text{COOH})_2$). Далее установка помещается в морозильную камеру для охлаждения на 25 минут. По истечении этого времени к установке подключаются электроды, а также подается питание на мешалку для электролита.

Оставшийся слой алюминия на обратной стороне удаляется в

такой же ячейке только обратной стороной, но вместо электролита используется пересыщенный водный раствор хлорида меди.

Полученные структуры определяют области возможного их применения. В данной работе рассматриваются такие области применения как сквозная мембрана для фильтрации веществ и ростовая платформа для биообъектов, например колоний бактерий [3, 4].

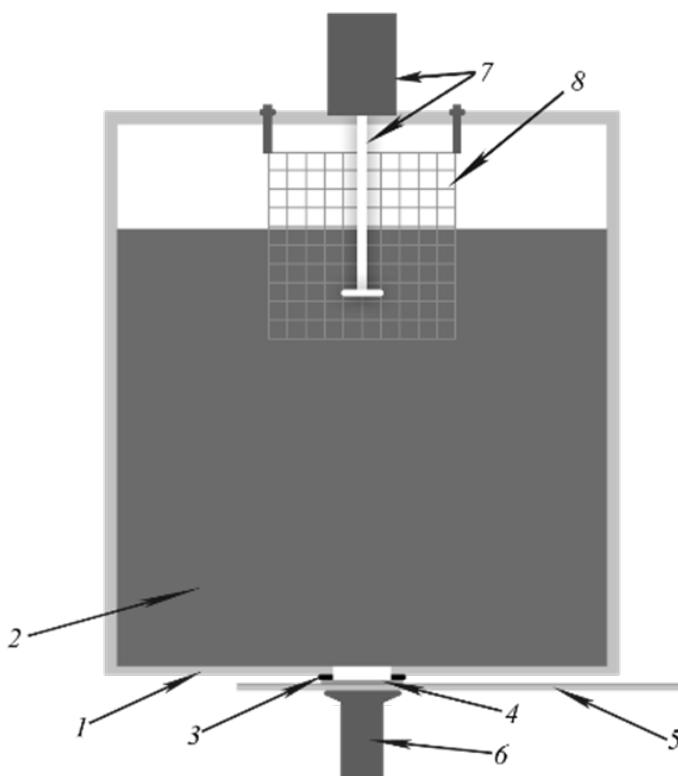


Рисунок 2 – Схема вертикальной электролитической ячейки прижимного типа: 1 – фторопластовая ванна; 2 – раствор электролита; 3 – резиновая прокладка; 4 – алюминиевая фольга; 5 – электрод – анод (медный); 6 –струбина; 7 – электродвигатель с мешалкой; 8 – электрод – катод (алюминиевый)

Важную роль в процессе порообразование играет качество исходной поверхности. В работах [4-6] подробно описано влияние шероховатости поверхности и различных способов полировки поверхности на качество получаемых слоев.

Исследование структур ПАОА проводилось с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ). Результаты исследований представлены на рис. 3

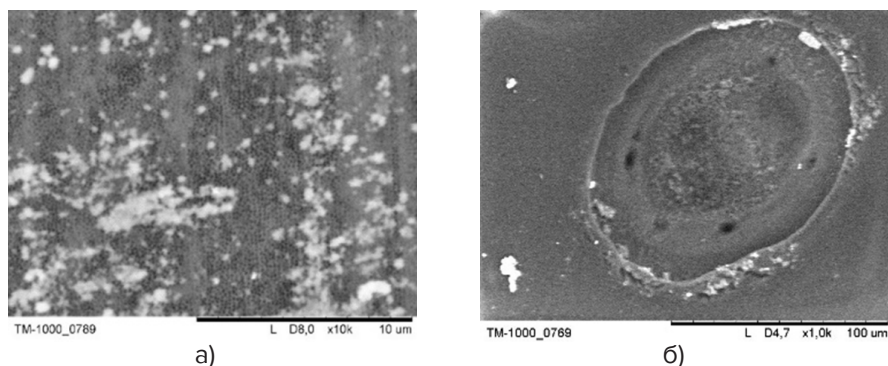


Рисунок 3 – РЭМ изображения образцов: а – наноразмерная мембрана; б – микро-наноразмерный ПАОА

Таким образом в ходе работы были получены и исследованы микро- и нанопористые слои оксида алюминия и рассмотрены некоторые возможности их применения.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при поддержке гранта российского научного фонда № 23-42-10029 от 20.12.2022, <https://rscf.ru/project/23-42-10029>.

ЛИТЕРАТУРА

1. Основы наноэлектроники. Ч. 4: Технологии наноэлектроники: курс лекций / под ред. Н.В. Богач. Севастополь: СевНТУ, 2013. 208 с.
2. Петухов Д.И., Валеев Р.Г., Решетников С.М. Пористые анодные

оксиды алюминия и титана: структура, свойства, синтез: учеб. пособие. Ижевск: Удмуртский ун-т, 2018. 119 с. С. 9–11.

3. Муратова Е.Н., Лучинин В.В., Мошников В.А. [и др.] Особенности формирования свободных наноразмерных пористых мембран оксида алюминия из фольги и новые области применения // Физика и химия стекла. 2017. т. 43. № 2. С. 207–215.

4. Муратова Е.Н., Мошников В.А. Наноархитектоника и новые материалы: от электроники до медицины // Функциональные материалы: Синтез. Свойства. Применение (YOUNG ISC 2024). 2024. С. 20–21.

5. Козодаев Д.А., Тюлягин П.Е., Муратова Е.Н. Управляемая технология формирования мембран на основе пористого анодного оксида алюминия // Нано и микросистемная техника. 2025. т. 27. № 3. С. 117–121.

6. Muratova E., Kozodaev D., Tyulagin P. Effect of Aluminum Foil Polishing on the Morphology of Membranes Based on Porous Anodic Aluminum Oxide // IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). 2025.

УДК 620.3
ГРНТИ 47.09.48

ИЕРАРХИЧЕСКИЕ ПОРИСТЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ САМОСБОРКИ НАНОЧАСТИЦ КРЕМНИЯ И ОКСИДА НИКЕЛЯ ДЛЯ СЕНСОРИКИ

Халугарова К., Спивак Ю.М.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова

В работе исследуется возможность создания композиционных материалов на основе наночастиц оксида никеля и наночастиц пористого кремния при различных соотношениях их геометрических размеров.

Ключевые слова: наночастицы, оксид никеля, пористый кремний, композиции.

HIERARCHICAL POROUS MATERIALS BASED ON SELF-ASSEMBLY OF SILICON AND NICKEL OXIDE NANOPARTICLES FOR SENSORS

Khalugarova K., Spivak Yu.M.

Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI» named after V. I. Ulyanov (Lenin)

The paper explores the possibility of creating composite materials based on nanoparticles of nickel oxide and porous silicon at different ratios of their geometric dimensions.

Keywords: nanoparticles, nickel oxide, porous silicon, compositions.

В настоящее время для применения наноматериалов в таких областях, как сенсорика, альтернативная энергетика, растущие технологические требования привели к разработке и изучению наноматериалов, сочетающих свойства классических наноматериалов с низкой объемной плотностью и высокой площадью поверхности пористых наноматериалов [1-3]. Наличие пористой текстуры с каналами и/или пустотами различных

форм и размеров позволяет увеличивать удельную площадь поверхности и улучшать адсорбционные свойства. Кроме того, пористость способствует улучшению таких важных свойств материала, как каталитическая активность в том числе и за счет увеличения площади взаимодействия, увеличения оборванных связей в поверхностных атомах и изменение количества соседей по сравнению с объемом.

В работе для получения наночастиц оксида никеля (NiO) методом зеленого синтеза в качестве восстанавливающего соль никеля и стабилизирующего агента получаемых наночастиц применялся экстракт растения Дымянки лекарственной (*Fumaria officinalis*). В качестве экстрагента был выбран 50% водный раствор изопропилового спирта [4, 5]. РЭМ-изображения полученных частиц оксида никеля приведены на рис. 1.

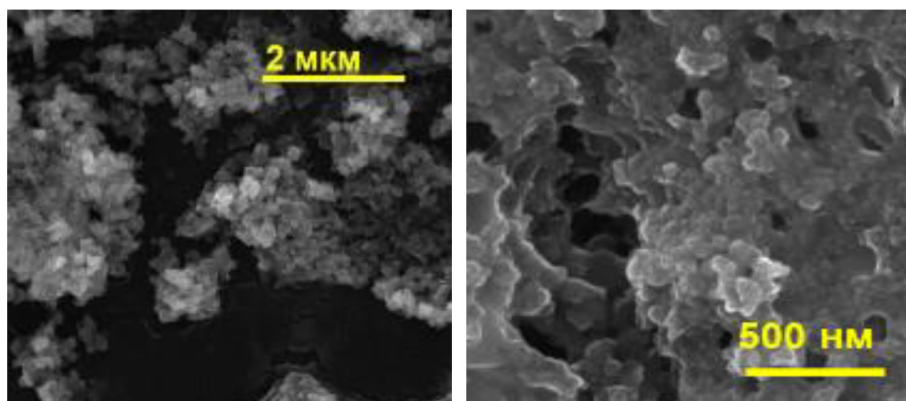


Рисунок 1 – РЭМ-изображения полученных частиц оксида никеля

Частицы оксида никеля исследовались методом тепловой десорбции для определения объема и распределения пор по размерам. Как можно отметить, для иерархии (дизайна) наночастиц характерны две группы размеров пор, диаметрами 33 ± 3 (50,9% в общем объеме пор) и 56 ± 5 нм (49,1%). Приблизение, описывающее образование систем с дискретными по размерам порами коррелирует моделью сборки фрактальных агрегатов по Жюльена с учетом особенностей реального эксперимента.

Было показано влияние на строение иерархических пористых наночастиц оксида никеля таких технологических условий (табл. 1).

В таблице 2 приведены исходные частицы и сформированные композиции и их значения дзета-потенциала.

Таблица 1 – Результаты полученных значений удельной площади поверхности в зависимости от технологических условий

Скорость центрифугирования, об/мин	Удельная площадь поверхности, м ² /г
3500	8,6±0,2
5500	47,2±2,7
7500	130,7±6,7
10500	59±1,2
13500	58,8±1,2
Температура отжига, °C	Удельная площадь поверхности, м ² /г
300	9,0±0,3
400	47,2±2,7
500	130,7±6,7

Для получения нанокomпозиций пористый кремний (por-Si) формировался методом электрохимического анодного растворения монокристаллического кремния. Нанокomпозиции на основе пористых частиц оксида никеля и кремния формировались методом смешивания двух типов дисперсий с последующей ультразвуковой обработкой. При этом все изучаемые дисперсии разделялись на две фракции по размеру методом центрифугирования – осадок и супернатант. Для композиций подбирались пары разных типов частиц с различным соотношением размеров. Исследовались сборки таких нанокomпозиций при различных значениях дзета-потенциалов исходных частиц.

В работе методом зеленого синтеза были получены нанокomпозиции на основе иерархических пористых наночастиц оксида никеля и пористого кремния. Была разработана методика получения пористых наночастиц оксида никеля с высокой удельной площадью поверхности.

Было определено, что комбинациями размеров и типов наночастиц можно влиять на значение дзета-потенциала, и, соответственно, на агрегативную устойчивость таких нанокomпозиционных частиц. При создании композиций важным фактором являются размеры частиц и дзета-потенциал, при чем с NiO-ядром и «оболочкой» из частиц пористого кремния большее значение дзета-потенциала (ζ -потенциал = -46,7 мВ с супернатантом n-por-Si и дзета-потенциал = -32,2 мВ с супернатантом p-por-Si).

Таблица 2 – Исходные наночастицы и сформированные нанокomпозиции и их значения дзета-потенциала

№	Образец	Размер	Дзета-потенциал, мВ
NiO			
N1	Малые НЧ por-NiO	69 – 311 нм	-17,5
N2	Крупные НЧ por-NiO	170 – 489 нм	-8,1
por-Si			
S1	Малые НЧ n-por-Si	69 – 311 нм	-2,4
S2	Крупные n-por-Si	170 нм – 2,5 мкм	-49,6
S3	Малые p-por-Si	170 нм – 311 нм	-12,5
S4	Крупные p-por-Si	661 нм – 1209 мкм	-14,8
Композиции			
C1	Малые por-NiO + крупные n-por-Si	420 нм – 1,9 мкм	-15,9
C2	Малые por-NiO + крупные p-por-Si	770 нм – 1,64 мкм	-10,5
C3	Крупные por-NiO + малые n-por-Si	110 – 360 нм	-46,7
C4	Крупные por-NiO + малые p-por-Si	490 нм – 1,21 мкм	-32,2

ЛИТЕРАТУРА

1. Moshnikov V.A., Gracheva I.E., Kuznezov V.V. [et al.] Hierarchical nanostructured semiconductor porous materials for gas sensors // Journal of Non-Crystalline Solids. 2010. Vol. 356. No. 37–40. P. 2020–2025.
2. Gracheva I.E., Moshnikov V.A., Maraeva E.V. [et al.] Nanostructured materials obtained under conditions of hierarchical self-assembly and modified by derivative forms of fullerenes // Journal of Non-Crystalline Solids. 2012. Vol. 358. No. 2. P. 433–439.
3. Korepanov O.A., Moshnikov V.A., Kozodaev D.A. [et al.] New diagnostic techniques for incorporated porous materials // 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). IEEE, 2022. P. 975–977.

4. Халугарова К., Спивак Ю.М., Мошников В.А. [и др.] Зеленый синтез для получения наночастиц металлов и их оксидов // Нано- и микросистемная техника. 2025. т. 27. № 1. С. 24–36.

5. Халугарова К., Спивак Ю.М., Мошников В.А. Особенности формирования иерархических пористых наночастиц оксида никеля методом зеленого синтеза // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2024. т. 27. № 6. С. 55–67.

УДК 620.3

ГРНТИ 47.13.07

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ НА ОСНОВЕ СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ В ПЕРИОД РАЗВИТИЯ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ ОТ НАНОТЕХНОЛОГИИ К НАНОАРХИТЕКТОНИКЕ

Бобков А.А.¹, Козодаев Д.А.², Мошников В.А.¹

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина),

²ООО «Активная фотоника»

В работе представлены результаты исследований и разработанные технические решения необходимые при переходе от нанотехнологии к нанoarхитектонике.

Ключевые слова: нанотехнологии, нанoarхитектоника, атомно-силовая микроскопия.

DEVELOPMENT OF DIAGNOSTIC METHODS BASED ON SCANNING PROBE MICROSCOPY IN THE PERIOD OF DEVELOPMENT OF MATERIALS SCIENCE FROM NANOTECHNOLOGY TO NANOARCHITECTONICS

Bobkov A.A.¹, Kozodaev D.A.², Moshnikov V.A.¹

¹St. Petersburg Electrotechnical University «LETI» named after V. I. Ulyanov (Lenin),

²Active Photonics, LLC

The paper presents the results of the research and the developed technical solutions necessary for the transition from nanotechnology to nanoarchitecture.

Keywords: nanotechnology, nanoarchitectonics, atomic force microscopy.

В настоящее время наблюдается переход от нанотехнологии к

наноархитектонике [1]. Концепция постнанотехнологического этапа основана на понятии наноархитектоники. Сущность заключается в том, что на интерфейсе двух (или более) нанообъектов возникают новые свойства, связанные с образованием на интерфейсе электрических полей, образование проводящих прослоек из-за перетекания зарядов и др. Это позволяет усилить каталитические свойства, создать новые сенсорные устройства, развивать новые приборы нано и оптоэлектроники.

В результате особенностей постнанотехнологического этапа актуальное значение приобретает развитие методов локальной диагностики, в том числе методов сканирующей зондовой микроскопии.

ООО «Активная фотоника» и СПбГЭТУ «ЛЭТИ» занимают ведущее место в развитии методов синтеза наноматериалов и их нанодиагностики. В данной работе представлены результаты развития методов локальной метрики по возникшим направлениям, таким как: модификация методов измерения, функционализации зондов сканирующей микроскопии, развитие методик интерпретации результатов измерений, применение разработок в наноматериаловедении.

Разработки, представленные авторским коллективом, основаны на пионерских исследованиях, выполняемых в течение более 20 лет. Прежде всего отметим работу [2], в которой использовали струйную печать для получения библиотек донорно-акцепторных систем, используемых в объёмных гетеропереходных солнечных элементах, и их характеризацию с помощью УФ-видимого/флуоресцентного планшетного ридера и оптического профилометра.

Технология струйной печати позволяет печатать массивы донорно-акцепторных систем различного состава на одной подложке, а также проводить последующее быстрое оптическое скрининговое исследование процессов переноса электронов [2]. Развитие такой технологии представляет большой интерес для создания так называемых фрактальных солнечных полимерных элементов [3]. Особенности возникновения фрактального интерфейса является наличие контактирующих слоев с наночастицами п- и р- типов. Это связано со значением Дебаевской длины экранирования, управление которой можно эффективно изменять площадь контакта [4].

В настоящее время нами изучаются возможности изменения размеров и формы наночастиц, а также использование в струйной печати совместно с полимером [5].

Другое направление развития этой базовой работы связано с

развитием концепции библиотек. Это направление интенсивно развивается в совместных исследованиях ООО «Активная фотоника» и центра инфохимии ИТМО. В данной работе мы ограничимся только ссылками для более подробного изучения [6-9]. Здесь же отметим, что шероховатость поверхности, например, полиэлектролитов, нанесенных слоем за слоем (LbL), изучается методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) и анализируется с использованием новых методов, включая топологический анализ данных (TDA) и машинное обучение (ML), для корреляции многомасштабной шероховатости с количеством бислоев и распознавания типов полиэлектролитов (ПЭ).

Второй базовой работой положенной в основу развития новых нанокомпозитов является работа [10]. В этой работе на основе функционализированных терпиридином полиэтиленоксида (ПЭО) и полистирола (ПС) был эффективно синтезирован ряд светоизлучающих соединений иридия(III). Была проведена одномерная и двумерная ЯМР-характеристика, выявившая ожидаемые резонансы. Гель-проникающая хроматография (ГПХ) подтвердила стабильность и чистоту целевых материалов.

Также, серия работ была направлена на эффективное присоединение к боковым ветвям блок-сополимеров наночастиц. Такая концепция наноархитектоники позволяет закреплять наночастицы практические имобилизируя их положения. В качестве последних работ можно привести статьи [11-12]. Такой подход обеспечил возможность размерно-селективного осаждения для получения нескольких фракций наночастиц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козодаев Д.А., Муратова Е.Н., Мошников В.А. От нанотехнологии к наноархитектонике // Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио. 2024. № 1. С. 350–352.
2. Marin V. [et al.] Ink-jet printing of electron donor/acceptor blends: towards bulk heterojunction solar cells // *Macromolecular Rapid Communications*. 2005. Vol. 26. No. 4. P. 319–324.
3. Васильева М.А. [и др.] Композитные материалы — новое направление развития нанотехнологий // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. 2013. № 2 (170). С. 212–223.
4. Godovsky D.Y. Device applications of polymer-nanocomposites

// Biopolymers · PVA hydrogels, anionic polymerisation nanocomposites. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2000. P. 163–205.

5. Бобков А.А. Физико-технологические основы управления функциональными свойствами газочувствительных сенсоров на основе наностержней оксида цинка. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019.

6. Скорб Е.В., Козодаев Д.А., Новиков О.П. [и др.] База данных изображений атомно-силовой микроскопии (АСМ) самоорганизованных структур на основе каликсаренов и их мономерных аналогов на твердой подложке: свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2025623701. № заявл. 2025623310. Заявл. 01.08.2025. Опубл. 08.09.2025. 3 с.

7. Aglikov A.S. [et al.] Topological data analysis of nanoscale roughness of layer-by-layer polyelectrolyte samples using machine learning // ACS Applied Electronic Materials. 2023. Vol. 5. No. 12. P. 6955–6963.

8. Zhukov M.V. [et al.] AFM-Topological Data Analysis of Brass after Ultrasonic Surface Modification // ACS Applied Engineering Materials. 2023. Vol. 1. No. 8. P. 2084–2091.

9. Aglikov A.S. [et al.] Numerical and topological description of contact areas at different size scales for the contact of rough solid surfaces // Materials Horizons. 2025.

10. Holder E. [et al.] Iridium (III) complexes with PEO and PS polymer macroligands and light-emitting properties: Synthesis and characterization // Macromolecular Chemistry and Physics. 2005. Vol. 206. No. 10. P. 989–997.

11. Korepanov O. [et al.] Polyvinylpyrrolidone as a stabilizer in synthesis of AgInS₂ quantum dots // Nanomaterials. 2022. Vol. 12. No. 14. P. 2357.

12. Korepanov O. [et al.] Temperature- and size-dependent photoluminescence of CuInS₂ quantum dots // Nanomaterials. 2023. Vol. 13. No. 21. P. 2892.

УДК 537.3

ГРНТИ 81.81.17

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ОКСИДНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Пщелко Н.С.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина)

В работе анализируются особенности электропроводности оксидных диэлектриков, применяемых в конденсаторостроении. Показано, что для выявления потенциально опасных дефектов, имеющих тенденцию к долговременному росту, токовые измерения следует проводить на постоянном напряжении и в слабых электрических полях.

Ключевые слова: конденсатор, электропроводность, дефекты структуры, диэлектрики, электрическое поле, неразрушающий контроль.

NON-DESTRUCTIVE QUALITY TESTING OF OXIDE CAPACITORS BY ELECTRICAL METHODS

Pshchelko N.S.

St. Petersburg Electrotechnical University «LETI» named after V. I. Ulyanov (Lenin)

This paper analyzes the electrical conductivity properties of oxide dielectrics used in capacitor manufacturing. It is shown that to identify potentially dangerous defects that tend to grow over time, current measurements should be performed at a constant voltage and in weak electric fields.

Keywords: capacitor, electrical conductivity, structural defects, dielectrics, electric field, non-destructive testing.

Для рабочих диэлектрических материалов оксидных, в частности, металлоксидных конденсаторов характерна структурная разупорядоченность. Используемые в конденсаторостроении некристаллические (аморфные и стеклообразные) диэлектрики являются неупорядоченными системами, а для кристаллических диэлектриков (например, керамики)

неупорядоченность проявляется в их дефектной структуре. Кроме того, для технических диэлектриков характерна структурная и фазовая неоднородность.

Указанные особенности создают предпосылки, например, для такого процесса как миграционная поляризация [1] – наиболее медленного из всех механизмов поляризации. Рассмотренная в [2] картина переноса заряда в диэлектрических материалах была положена в основу поиска подхода к неразрушающему контролю качества оксидных конденсаторов электрическими методами. В качестве критериальных требований выступали:

- чувствительность исследуемых характеристик к воздействию электрического поля;
- информативность используемых методов измерений для выявления потенциально опасных дефектов.

Этим требованиям соответствуют статические электрические характеристики изучаемых конденсаторных материалов [2]. Для реализации этих измерений предложен ряд методик, в частности в [3].

Представляет интерес вопрос о величине электрического напряжения, которое следует применять при измерениях. В [3] было показано, что доля тока через участок диэлектрика, содержащий дефект со слабосвязанными ионами, которые с большой вероятностью будут активированы и примут участие в создании тока $I_{\text{деф}}$ в общем токе $I_{\text{общ}}$ через диэлектрический слой составляет величину:

$$\frac{I_{\text{деф}}}{I_{\text{общ}}} = \frac{1}{1 + BU^m},$$

где B – постоянная, зависящая от вида диэлектрика и вида дефектов в нем.

Из представленного выражения видно, что для выявления дефектов по токовым измерениям эти измерения следует проводить при малых напряжениях U , т.к. при $U \rightarrow 0$ получаем $I_{\text{деф}}/I_{\text{общ}} \rightarrow 1$. При больших же измерительных напряжениях вклад тока, обусловленного дефектами в общий ток, может оказаться незаметен, и в этом случае выявить различия между потенциально ненадежным и годным образцами окажется невозможным.

Сделанные рассуждения подтверждаются простым проделанным экспериментом: измерялись сопротивления утечки одинаковых алюмооксидных конденсаторов с рабочим напряжением 100 В. При номинальном

напряжении разброс сопротивлений не превышал 20%, а при напряжении 5 В эти сопротивления отличались в разы и даже более, чем на порядок величины.

Таким образом, для выявления потенциально опасных дефектов, имеющих тенденцию к долговременному росту, токовые измерения следует проводить, во-первых, на постоянном напряжении, а во-вторых – при малых напряжениях, т.е. в слабых электрических полях.

Представляется также перспективным измерение величины абсорбированного заряда металл-оксидных конденсаторов [4] для прогноза их долговременной надежности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пщелко Н.С., Томаев В.В. Поляризация приповерхностных слоев ионных диэлектриков на границе электроадгезионного контакта с проводником // Физика и химия стекла. 2016. т. 42. № 1. С. 153–159.
2. Пщелко Н.С. Электрофизические методы неразрушающего контроля и формирования металлодиэлектрических структур: дис. ... докт. техн. наук. СПб., 2011. 372 с.
3. Пщелко Н.С., Царева О.С. Неразрушающий контроль керамики по результатам измерения ее диэлектрической проницаемости в СВЧ-диапазоне и на постоянном напряжении // Техника связи. 2021. № 2 (49). С. 85–95.
4. Пщелко Н.С., Кузнецов В.И. Экспериментальное исследование абсорбированного заряда металл-оксидных конденсаторов // Физическое образование в ВУЗах. 2023. т. 29. № 2. С. 130–144.

УДК 535.015
ГРНТИ 29.33.17

РЕГУЛИРУЕМЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ИЗОЛЯТОР ДЛЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ ИК-ДИАПАЗОНА

Козодаев Д.А.¹, Пщелко Н.С.²

¹ООО «Активная Фотоника»,

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина)

В работе представлен оптический изолятор Фарадея, в котором предусмотрена возможность регулировки величины магнитного поля, а также угла между поляризаторами. Степень оптической изоляции разработанного устройства для полупроводникового лазера с длиной волны 785 нм составила не менее 42 дБ при прямом пропускании не менее 95%.

Ключевые слова: эффект Фарадея, оптический изолятор, отражение света, лазеры, магнитное поле, юстировка.

ADJUSTABLE OPTICAL ISOLATOR FOR INFRARED SEMICONDUCTOR LASERS

Kozodaev D.A.¹, Pshchelko N.S.²

¹Active Photonics, LLC,

²St. Petersburg Electrotechnical University «LETI» named after V. I. Ulyanov (Lenin)

This paper presents an optical Faraday isolator with adjustable magnetic field strength and polarizer angle. The optical isolation of the developed device for a 785 nm semiconductor laser is at least 42 dB with a forward transmittance of at least 95%.

Keywords: Faraday effect, optical isolator, light reflection, lasers, magnetic field, alignment.

Оптический изолятор – это устройство, пропускающее свет только в одном направлении и соответственно не пропускающее в обратном. По сути, правильной было бы называть это устройство оптическим

диодом, однако среди специалистов закрепилось название именно «оптический изолятор». Этот прибор защищает чувствительное оптическое оборудование от дестабилизирующих обратных отражений лазерного луча, к которым относится, в частности, возникающее в лазерных полупроводниковых диодах усиление стимулированного излучения, частотная нестабильность колебаний, релаксация колебаний и другие вредные явления. Указанное особенно относится к полупроводниковым лазерам ИК диапазона – именно в них, как показывают наблюдения, дестабилизирующее воздействие отраженного сигнала наиболее сильно влияет на стабильность характеристик генерируемого лазерного излучения [1,2]. Оптические изоляторы необходимы для предотвращения повреждения самих лазерных источников отраженным светом в мощных лазерных системах, востребованы в волоконно-оптических сетях – используются для поддержания качества сигнала, нужны в научных исследованиях для защиты лазерных компонентов при проведении экспериментов. Таким образом, разработка и исследование оптических изоляторов является актуальной задачей.

По ряду причин, наиболее работоспособными оказались изоляторы, основанные на эффекте Фарадея. Разработанный в работе изолятор Фарадея состоит из входного поляризатора, ротатора, т.е. магниточувствительного элемента, представляющего собой материал в виде стержня, имеющего свойство поворачивать плоскость поляризации света при создании магнитного поля вдоль его оси, и выходного поляризатора (анализатора). Оси поляризаторов повернуты друг относительно друга на 45° . Отличительной особенностью разработанного устройства является возможность механической регулировки величины магнитного поля, а также угла между поляризаторами [3]. Работа изолятора осуществляется следующим образом: пусть ось первого поляризатора принята за 0° , ось второго – наклонена на 45° . Свет распространяется в прямом направлении, после прохождения через входной поляризатор будет линейно поляризован вдоль оси 0° . Затем пучок попадает в регулируемый вращатель Фарадея, плоскость поляризации поворачивается ровно на 45° благодаря точно отрегулированной величине магнитного поля, и свет беспрепятственно проходит через второй поляризатор. Отраженный свет будет распространяться в обратном направлении, и сразу после второго поляризатора его плоскость поляризации будет наклонена на 45° . Так как направление поворота не зависит от направления распространения света, вращатель Фарадея при дальнейшем распространении

света повернёт плоскость его поляризации на дополнительные 45° в том же направлении. В итоге на первый поляризатор свет попадет поляризованным вдоль оси 90° и будет поглощен.

Степень оптической изоляции разработанного устройства для полупроводникового лазера с длиной волны 785 нм по результатам измерений [4] составила не менее 42 дБ при прямом пропускании не менее 95%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козодаев Д.А., Погонышев А.О., Пщелко Н.С. [и др.] Особенности конструкции и юстировки регулируемого оптического изолятора // Енисейская Фотоника — 2024: тезисы докладов Всерос. науч. конф. Красноярск, 2024. т. 2. С. 223–224.
2. Козодаев Д.А., Погонышев А.О., Пщелко Н.С. [и др.] Регулируемый оптический изолятор на основе эффекта Фарадея // ХОЛОЭКСПО 2024: тезисы докладов XXI Междунар. конф. М., 2024. С. 66–68.
3. Козодаев Д.А., Погонышев А.О., Пщелко О.С. [и др.] Изолятор Фарадея с кристаллическим магнитооптическим ротатором для лазеров: пат. 2822210 Рос. Федерация. № 2024103829; заявл. 15.02.2024.
4. Козодаев Д.А., Пщелко Н.С., Цыганов А.Б. Широкодиапазонный измеритель мощности оптического излучения // Вестник Псковского государственного университета. Сер.: Естественные и физико-математические науки. 2024. т. 17. С. 114–123.

УДК 621.315.592

ГРНТИ 29.19.16

УНИВЕРСАЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ БАЗА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ОТ РЕНТГЕНОВСКОГО ДО ДАЛЬНОГО ИК ДИАПАЗОНА

Терещенко О.Е.¹, Шайблер Г.Э.¹, Русецкий В.С.²

¹ИФП СО РАН,

²АО «Экран ФЭП»

Представлена концепция создания рентгеновских, ультрафиолетовых и неохлаждаемых тепловизионных приборов с высоким пространственным разрешением на базе инфраструктуры стандартных арсенид галлиевых и мультищелочных электронно-оптических преобразователей.

Ключевые слова: фотокатод, электронно-оптический преобразователь.

UNIVERSAL TECHNOLOGICAL BASE FOR THE CREATION OF ELECTRON-IMAGE INTENSIFIERS FROM X-RAY TO FAR INFRARED RANGE

Tereshchenko O.E.¹, Scheibler G.E.¹, Rusetsky V.S.²

¹ISP SB RAS,

²Ekran FEP, JSC

The concept of creating X-ray, ultraviolet and uncooled thermal imaging devices with high spatial resolution based on the infrastructure of standard gallium arsenide and multi-alkali electron-optical converters is presented.

Keywords: photocathode, electron-image intensifier.

Создание универсальной инфраструктуры для разработки и производства вакуумных фотоприемных устройств на основе электронно-

оптических преобразователей (ЭОП) чувствительных в широкой области спектра (0.0001-100 мкм) позволит решить ряд важных технических и экономических задач, а также задач импортозамещения. Основная цель работы – реализация концепции создания рентгеновских, ультрафиолетовых и неохлаждаемых тепловизионных приборов с высоким пространственным разрешением на базе инфраструктуры стандартных арсенид галлиевых и мультищелочных ЭОП.

Для УФ фотоприемников (100-360 нм), так называемых, «солнечно слепых», важными практическими задачами являются: мониторинг внешних ситуаций на высоковольтных электроэнергетических объектах; диагностика состояния контактных сетей железных дорог; мониторинг территорий, загрязнённых радиоактивными веществами; мониторинг промывочных вод, связанный с поисковым бурением нефтеносных скважин; исследование космоса в УФ диапазоне. Кроме того, применение УФ оптико-электронных систем в качестве дополнительного информационного канала в составе многоспектральных систем может значительно повысить их информативность. В качестве фотокатодов для УФ диапазона используются соединения $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ (200-360 нм) [1,2], Cs_2Te (200-290 нм) и CsI (150-220 нм).

Стандартные арсенид галлиевые и мультищелочные ЭОП диапазона 300-900 нм могут успешно применяться в лидарных и пассивных системах космического зондирования с необходимым пространственным и временным разрешением [3].

Преимущество в ближнем ИК-диапазоне (1.1-1.7 мкм) проявляется при естественной спектральной освещенности, которая составляет $2 \cdot 10^{-7}$ Вт/см²·мкм, что на два порядка выше освещенности в области чувствительности GaAs и мультищелочного катода. Для продвижения в ИК область 1.1-1.7 мкм проводятся работы по созданию полевых фотокатодов с тянущим полем на основе структур InP/InGaAs/InP с отрицательным электронным сродством [4].

Дальний ИК (8-14 мкм) и ТГц диапазоны в настоящее время в технике ЭОП не представлены. Неохлаждаемые пироэлектрические преобразователи теплового изображения (пириконы) в дальнем ИК и ТГц диапазонах спектра, обладают свойством неселективности по спектру и детектируют только изменение интенсивности падающего излучения. Благодаря этим свойствам они находят широкое применение в ИК-технике для точных спектральных измерений, наблюдения и распознавания объектов, медицинской и промышленной диагностике, а также для

специальных применений. Одним из решений сдвига чувствительности ЭОП в дальний ИК диапазон было создание пироэлектрического электронно-оптического преобразователя (ПЭОП) [5]. Однако реализовать этот прибор не удалось в силу технических трудностей совмещения вакуумной технологии ЭОП и органической основы пиромишени.

В настоящее время нами разрабатываются рентгеновские детекторы с пространственным разрешением на базе ЭОП с CsI фотокатодом, которые возможно использовать в различных отраслях промышленности, а также пироэлектрический электронно-оптический преобразователь с пиромишенью на диапазон длин волн 8-14 мкм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рожков С.А. [и др.] Испускание фотоэлектронами каскада оптических фононов на интерфейсе p-GaN (Cs,O)-вакуум // Письма в ЖЭТФ. 2016. т. 104. № 2. С. 128.
2. Tereshchenko O.E. [et al.] Low-Temperature Method of Cleaning p-GaN(0001) Surfaces for Photoemitters with Effective Negative Electron Affinity // Phys. Solid State. 2004. Vol. 46. P. 1949.
3. Плехотниченко В.Л. [и др.] Фотоприемное устройство на базе 16-электродного координатно-чувствительного детектора высокого временного разрешения // Астрофизический Бюллетень. 2020. т. 75. № 1. С. 66.
4. Егоренков А.А. [и др.] Гибридный матричный фотоприемник // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2021. т. 4. С. 15.
5. Зорин С.М. [и др.] Свойства дифенил–2,2',4,4'–тетрамина и тонкопленочная мишень пироэлектрического электронно–оптического преобразователя на его основе // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2015. т. 18. С. 205.

УДК 544.032.65, 621.373.8

ГРНТИ 49.01.31, 29.01.31, 47.01.61

ЛАЗЕРНЫЕ СИСТЕМЫ И ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ МИКРОЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Васильев О.С.

ООО «Лазерный центр»

В работе представлено промышленное лазерное оборудование для обработки материалов микроэлектронной отрасли. Описаны технологии лазерной обработки материалов на примере некоторых процессов, таких как резка, скрайбирование, деметаллизация, формирование поверхностной микроструктуры, перфорация и т.д.

Ключевые слова: лазеры, лазерные системы, технология обработки, материалы микроэлектронной промышленности.

LASER SYSTEMS AND LASER TECHNOLOGIES FOR PROCESSING MATERIALS IN THE MICROELECTRONIC INDUSTRY

Vasilev O.S.

Laser Center, LLC

The paper presents industrial laser equipment for processing materials in the microelectronic industry. It describes laser material processing technologies using the example of some processes, such as cutting, scribing, demetallization, formation of surface microstructure, perforation, etc.

Keywords: lasers, laser systems, processing technology, materials for the microelectronic industry.

На сегодняшний день лазеры и лазерные системы все больше укрепляются в производственных процессах многих современных предприятий. Это связано с их уникальными характеристиками, такими как субмикронный размер пятна лазерного излучения, бесконтактность,

отсутствие расходных материалов, multifunctionality и других преимуществ, часто недостижимых традиционными механическими и химическими методами обработки. Индустрия микро- и нанoeлектроники также предъявляет свои требования к обработке материалов. Одно из них заключается в принципиальной возможности работы со специализированными материалами, например, арсенид галлия, нитрид бора, кристаллический кремний, различного рода керамики, в том числе LTTC, поликор и ситалл, а также металлы, сплавы и другие материалы. Еще одно требование заключается в сути процесса обработки материалов, например, резка, перфорация, скрайбирование, деметаллизация, формирование поверхностной топологии, сварка и т.д. И последнее принципиальное требование относится к точности и стабильности обработки, учитывающей геометрические характеристики изготавливаемых компонентов. В компании ООО «Лазерный центр» более 20 лет разработчики создают оборудование для изучения взаимодействия лазерного излучения с веществом, имеют многолетний опыт работы с материалами микро- и нанoeлектроники, на основе которого ведутся разработки уникальных лазерных систем и технологий.

Одним из наиболее востребованных решений является комплексная обработка кристаллического кремния. А именно скрайбирование, резка и создание топологий на пластине материала за одну установку изделия.

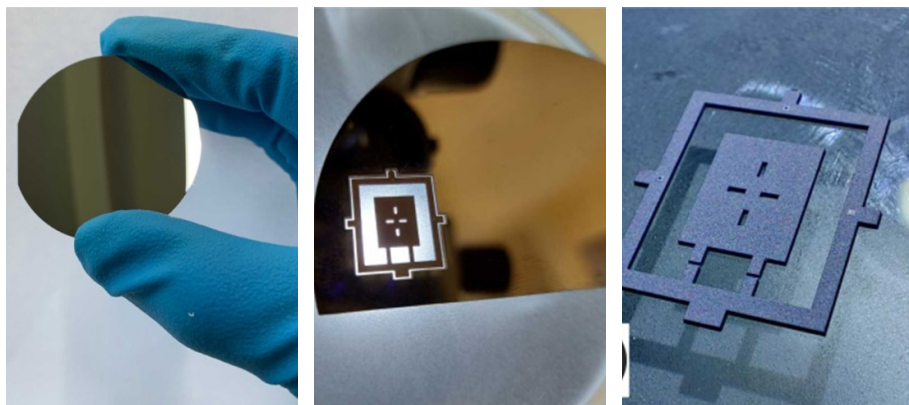


Рисунок 1 – Заготовка и результат обработки образца из кристаллического кремния

Другим не менее важным процессом является обработка полико-ра и прочей алюмооксидной керамики. Наиболее популярными процес-сами является скрайбирование, резка, перфорация, формирование топо-логии и подгонка резисторов на подложках из подобных материалов.



Рисунок 2 – Образцы скрайбирования, резки и перфорации керамики

Применение лазерных технологий позволяет заменить ряд традиционных механических процессов, таких как обработка режущими дисками, сверлами и также различными алмазными инструментами. Обработка материалов лазерным излучением не имеет контакта, благодаря чему исключается необходимость использования расходных материалов. Кроме того размер сфокусированного пятна лазера может достигать 8 мкм, а точность позиционирования 2,5 мкм, что позволяет осуществлять обработку в соответствующих размерных диапазонах.

Сегодня развитие лазерной техники и технологии, благодаря запросам технологических компаний, привело к необходимости использования лазеров со сверхкороткой длительностью импульсов: пико- и фемтосекунды. Такие длительности импульсов позволяют существенно снизить глубину прогретого слоя материала, что открывает возможности уменьшения зоны обработки не только по плоскости, но и в глубину. Иными словами, открываются возможности испарения материалов на субмикронную глубину при минимальной зоне термодформации и других явлений, связанных с применением сконцентрированного источника энергии. Кроме того ультракороткая длительность импульса позволяет

осуществить «холодную» испарительную обработку: процесс при котором твердый материал переходит в плазму без промежуточных агрегатных состояний.

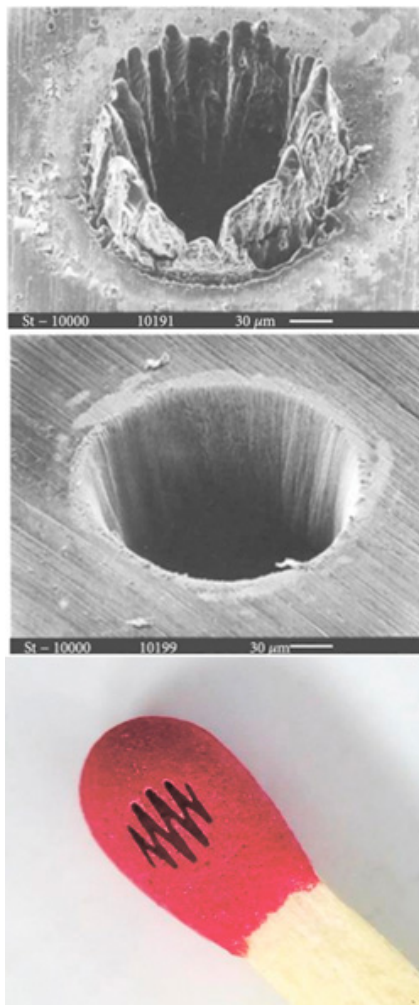


Рисунок 3 – Сверху: воздействие нс-лазера (3,3 нс, 0,5 Дж/см²); центр: фс-лазера (200 фс, 0,5 Дж/см²); снизу: результат обработки фс-лазера термочувствительных материалов

В данной статье невозможно уместить весь более чем двадцатилетний практический опыт компании ООО «Лазерный центр», в области обработки материалов микро- и радиоэлектроники. Остались не раскрыты ещё множество процессов, таких как лазерная сварка, демультипликация, формирование топологий, резка масок и фотошаблоном и т.д. Тем не менее автор статьи надеется на проявленный интерес к возможностям компании и будущую совместную плодотворную работу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки: учеб. пособие. М.: МГТУ им. Баумана, 2006. 664 с. ISBN 5-7038-2701-9.
2. Либенсон М.Н., Яковлев Е.Б., Шандыбина Г.Д. Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика). Лазерный нагрев и разрушение материалов: учеб. пособие. СПб.: НИУ ИТМО, 2014. 181 с.
3. Вейко В.П. Лазерные микро- и нанотехнологии в микроэлектронике. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2011. 141 с.

УДК 621.383.5
ГРНТИ 29.19.31

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПЕРОВСКИТНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Гаджей А.О., Муратова Е.Н.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина)

Данная работа посвящена изучению особенностей формирования перовскитных солнечных элементов, их преимуществам и недостаткам по сравнению с другими. Рассматриваются различные способы повышения стабильности работы солнечных элементов.

Ключевые слова: перовскит, солнечный элемент, деградационная устойчивость, межслойный дизайн.

FEATURES OF PEROVSKITE SOLAR CELLS FORMATION

Gadzhey A.O., Muratova E.N.

St. Petersburg Electrotechnical University «LETI» named after V. I. Ulyanov (Lenin)

This work is devoted to the study of formation characteristics of perovskite solar cells, their advantages and disadvantages compared to other solar cells, and discusses various methods for improving the operational stability of solar cells.

Keywords: perovskite, solar cell, degradation resistance, interlayer design.

Климатические изменения подталкивают к поиску альтернативных источников энергии, более энергоэффективных технологий и экологических материалов. В этом смысле солнечная энергия широко распространена и удовлетворяет потребность в доступной и чистой энергии [1].

В настоящее время солнечные элементы на основе перовскитоподобных материалов показывают высокую эффективность (более 22%) и представляют собой перспективные альтернативные солнечные элементы, характеризующиеся низкой стоимостью производства, а также

обладающие полупрозрачностью, легкостью и гибкостью.

Солнечные элементы преобразуют энергию электромагнитного излучения непосредственно в электричество за счет применения в них кремния или органо-неорганических перовскитоподобных материалов в качестве активного слоя [2, 3]. В этом случае эффективно поглощаются фотоны с энергией, превышающей энергию их запрещенной зоны, что приводит к генерации носители заряда, которые за счет возникающего обратного смещения попадают в соответствующие транспортные слои [4,5] и собираются во внешней цепи. Типовая архитектура устройства перовскитных солнечных элементов и его послойная структура представлены на рис. 1.

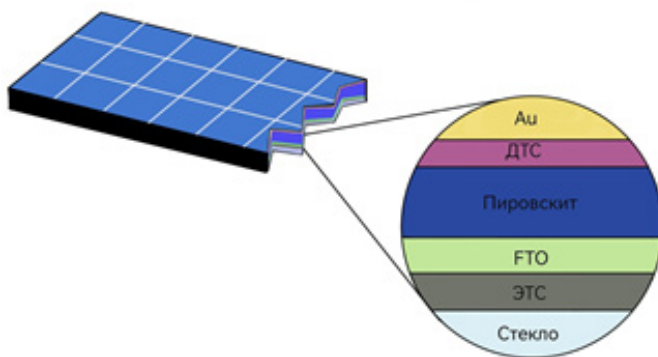


Рисунок 1 – Типовая архитектура устройства перовскитных солнечных элементов

Органо-неорганические или гибридные перовскиты привлекают значительное внимание в последние годы из-за их многообещающих применений в оптоэлектронике. Основные факторы, приводящие к деградации солнечных элементов, можно разделить на две категории – внешние и внутренние. К внешним факторам относятся условия окружающей среды: влажность, ультрафиолет, температура и другое. К внутренним – точечные дефекты такие как атомные вакансии, интерстиции и антиструктурные дефекты.

При образовании перовскитной пленки часто встречаются вакансии в структуре перовскита. Эти дефекты могут стимулировать миграцию

ионов через пленку перовскита, что приводит к плохой или неустойчивой работе СЭ.

Для улучшения фотоэлектрических характеристик и стабильности неорганических ПСЭ в ходе работы были рассмотрены варианты применения различных пассивирующих добавок [6, 7] для устранения/пассивации дефектов и снижения потерь безызлучательной рекомбинации в ПСЭ на основе MAPbI_3 и CsPbI_3 .

Задачи уменьшения деградации приводят к новым приемам дизайна активного и транспортных слоев. При определенных условиях синтеза формируются структуры с иерархическим строением, которые обладают более высокими значениями энергии активации диффузионных процессов, а значит меньше подвергнутся деградации. Образование фрактальной поверхности сопровождается изменением электрофизических свойств. Результаты, представленные в [8], показали, что элементы фрактальной структуры на границе затрудняют диффузию ионов и тем самым потенциально повышает стабильность материала.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при поддержке гранта российского научного фонда № 23-42-10029 от 20.12.2022, <https://rscf.ru/project/23-42-10029>.

ЛИТЕРАТУРА

1. Муратова Е.Н., Мошников В.А. Наноархитектоника и новые материалы: от электроники до медицины // Функциональные материалы: Синтез. Свойства. Применение (YOUNG ISC). 2024. С. 20–21.
2. Muratova E.N., Moshnikov V.A., Aleshin A.N. [et al.] Research and optimization of crystallization processes of solutions of hybrid halide perovskites of the $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ composition // Glass Physics and Chemistry. 2023. Vol. 49. No. 6. P. 672–679.
3. Spivak Y., Muratova E., Moshnikov V. [et al.] Improving the Conductivity of the PEDOT:PSS Layers in Photovoltaic Cells Based on Organometallic Halide Perovskites // Materials. 2022. Vol. 15. No. 3. P. 990.
4. Гагарина А.Ю., Безверхний В.П., Муратова Е.Н. [и др.] Получение и свойства наноразмерной пленки диоксида титана для транспортного слоя n-типа фотовольтаической ячейки // Физика и техника полупроводников. 2024. т. 58. № 11. С. 591–593.

5. Moshnikov V.A., Muratova E.N., Vrublevsky I.A. [et al.] Charge Carrier Transport and Localized States in Graphite-like Amorphous Carbon Films at Room Temperatures // *Materials*. 2025. Vol. 18. P. 3977.

6. Nenashev G.V., Kryukov R.S., Istomina M.S. [et al.] Carbon quantum dots: organic–inorganic perovskite composites for optoelectronic applications // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2023. Vol. 34. No. 31. P. 2114.

7. Nenashev G.V., Aleshin A.N., Ryabko A.A. [et al.] Effect of barium doping on the behavior of conductivity and impedance of organic-inorganic perovskite films // *Solid State Communications*. 2024. Vol. 388. P. 115554.

8. Muratova E., Kozodaev D., Moshnikov V. [et al.] AFM for monitoring interphase interfaces of solar cells // *European Materials Research Society. B. Advancing sustainable organic photovoltaics: from experiments and materials to applications and device models*. 2024. P. 00370.

УДК 538.958
ГРНТИ 49.19.31

ВЫБОР ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ InAs И ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ InAsSb, InAsSbP С ЦЕЛЬЮ ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА В РАЗНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ

**Стоянов Н.Д., Кизжаев С.С., Черняев А.В.,
Молчанов С.С., Калюжный Н.А.**

ООО «ЛЕД Микросенсор НТ»

Рассматривается возможность расширения температурного диапазона работы сенсоров метана на базе светодиодов средней инфракрасной области за счет создания ряда оптоэлектронных пар светодиод – фотодиод с разным составом твердого раствора в активной области.

Ключевые слова: сенсор метана, средний инфракрасный диапазон, светодиод, фотодиод.

SELECTION OF EPITAXIAL STRUCTURES BASED ON InAs AND InAsSb, InAsSbP SOLID SOLUTIONS FOR THE PURPOSE OF MEASURING METHANE CONCENTRATION UNDER DIFFERENT TEMPERATURE CONDITIONS

**Stoyanov N.D., Kizhaev S.S., Chernyaev A.V.,
Molchanov S.S., Kalyuzhnyy N.A.**

LED Microsensor NT, LLC

It is proposed to expand the operating temperature range of methane sensors based on mid-infrared LEDs by creating a series of optoelectronic LED-photodiode pairs with different solid solution compositions in the active region.

Keywords: methane sensor, middle infrared range, LED, photodiode.

Газовые сенсоры на базе светодиодов средней инфракрасной

области спектра обладают существенным преимуществом перед сенсорами на основе тепловых источников – на порядки более низким энергопотреблением. Светодиодные сенсоры могут работать автономно (от батареек) более 3 лет. При таком подходе становится возможно создание больших беспроводных сетей сенсоров. Однако существует проблема, которая препятствует процессу массовой замены сенсоров на базе тепловых источников на светодиодные: сильные температурные зависимости параметров светодиодов и спектрально согласованных с ними фотодиодов. В диапазоне температур ($-35 \div 100$) °C из-за изменения ширины запрещённой зоны полупроводника в активной области длинноволновая граница чувствительности фотодиода сдвигается (по уровню 0.5 от максимума) на 420 нм (рис.1). Аналогичным образом сдвигается длина волны максимума излучения светодиода.

В классическом варианте сенсоров на основе тепловых источников с помощью интерференционных фильтров из широкого спектра излучения теплового источника вырезаются две полосы для измерительного и опорного канала. Подобную схему можно использовать и в сенсорах на основе светодиодов средней ИК области (рис.2). Но в широком температурном диапазоне степень перекрытия спектров пропускания фильтров, спектров излучения светодиода и чувствительности фотодиода меняются сильно и не всегда монотонно. Это вызывает сложности при калибровке сенсора; кроме того, увеличиваются погрешности при определении концентрации газа при низких и высоких температурах.

Применяемая нами технология роста светодиодных и фотодиодных гетероструктур методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений позволяет прецизионно варьировать ширину запрещённой зоны полупроводника E_g , меняя состав твердого раствора в активной области. Это позволяет достаточно точно управлять длинноволновой границей спектра. Например, из сопоставления рис.1 и рис.2 видно, что при понижении температуры существенно уменьшается перекрытие линий оптического поглощения метана и спектра чувствительности фотодиода с активной областью на основе InAs (в отрицательной области температур). Соответствующие добавки сурьмы позволяют улучшить ситуацию (путем уменьшения E_g активной области): красная граница сдвигается вправо по шкале длин волн.

В зависимости от требований к температурному диапазону и допустимой погрешности возможно использование в одном приборе двух или трех пар светодиод – фотодиод с различными параметрами спектров.

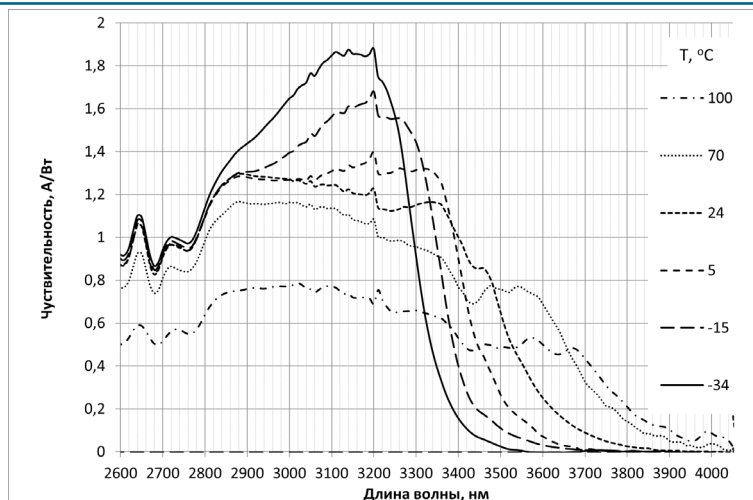


Рисунок 1 – Спектры ампер-ваттной чувствительности фотодиода с активной областью на основе InAs, измеренные при разных температурах в диапазоне (-34 – +100) °С

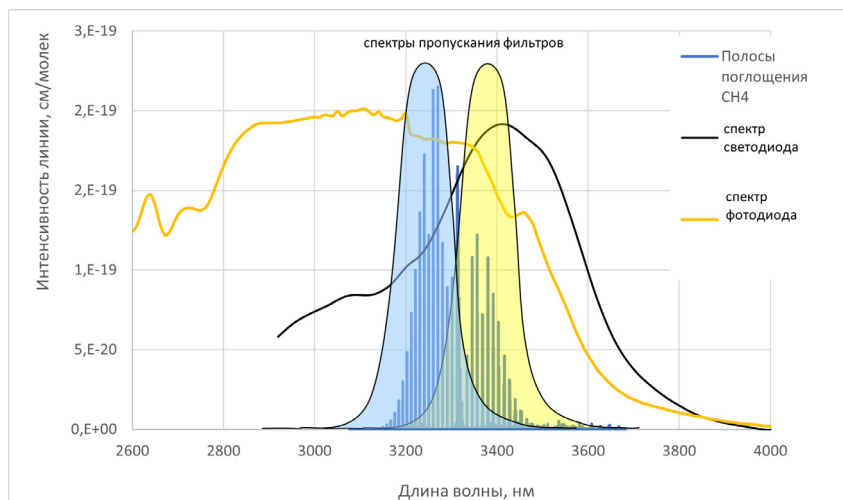


Рисунок 2 – Интенсивность линий оптического поглощения метана, а также спектры излучения светодиода, чувствительности фотодиода и пропускания фильтров при комнатной температуре

В зависимости от требований к температурному диапазону и допустимой погрешности возможно использование в одном приборе двух или трех пар светодиод – фотодиод с различными параметрами спектров. Использование бинарного соединения InAs, тройного твердого раствора InAsSb с содержанием Sb до 3% в активной области и четверного твердого раствора InAsSbP с содержанием P до 4% позволяет создать светодиоды с максимумом излучения на 3200 нм, 3400 нм, 3600 нм и 3800 нм и спектрально согласованные с ними фотодиоды. Это открывает новые возможности при конструировании сенсоров для метана и других углеводородов, работающих в широком температурном диапазоне.

ЛИТЕРАТУРА

1. Swart H.C., Motaung D.E. LED-based gas sensors: A review // Current Opinion in Environmental Science & Health. 2023. Vol. 36. No. 100506. P. 1–10.
2. Семакова А.А., Смирнов А.М., Баженов Н.Л. [и др.] Спектральные и электрические свойства светодиодных гетероструктур с активной областью на основе InAs // Физика и техника полупроводников. 2021. т. 55. № 8. С. 682–687.

УДК 621.383.45

ГРНТИ 47.57

ВЛИЯНИЕ МИГРАЦИИ ПОДВИЖНЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ПРИМЕСЕЙ НА ПАРАМЕТРЫ ФОТОРЕЗИСТИВНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК СЕЛЕНИДА СВИНЦА

Бойко С.Б.

АО «НИИ «Гириконд»

Представлены результаты исследований влияния миграции подвижных заряженных примесей на электрические и фотоэлектрические характеристики фоторезистивных структур на основе поликристаллических пленок селенида свинца.

Ключевые слова: селенид свинца, фоторезистор, миграция заряженных примесей.

THE IMPACT OF MOBILE CHARGED IMPURITY MIGRATION ON THE PARAMETERS OF PHOTORESISTIVE STRUCTURES BASED ON POLYCRYSTALLINE LEAD SELENIDE FILMS

Boyko S.B.

Research Institute Girikond, JSC

The results of investigations into the impact of mobile charged impurity migration on the electrical and photoelectrical characteristics of photoresistive structures based on polycrystalline lead selenide thin films are presented.

Keywords: lead selenide, photoresistor, migration of charged impurities.

Для фоторезисторов одной из ключевых характеристик является долговременная стабильность отношения, сигнал фоточувствительности/напряжение шума (сигнал/шум) при воздействии нагрузки

постоянным напряжением. Однако, в процессе эксплуатации, особенно при повышенных температурах, наблюдается увеличение уровня шума, что приводит к снижению данного отношения. В связи с этим представляется актуальным проведение дополнительных исследований фоторезисторов под нагрузкой при повышенной температуре с целью разработки рекомендаций по обеспечению стабильности их характеристик в процессе эксплуатации.

Экспериментальная часть работы заключалась в измерении отношения сигнал/шум, темнового сопротивления фоторезисторов после воздействия нагрузки постоянным напряжением нагрузки (5 В) и температуры (60 °С), а также измерении указанных параметров при периодической смене полярности приложенной нагрузки. Исследуемые образцы имели размер фоточувствительной площадки 2х2 мм.

После воздействия нагрузки постоянным напряжением от нескольких часов до 48 часов отношение сигнал/шум фоторезисторов уменьшается на десятки и сотни процентов от исходного значения. Темновое сопротивление, сигнал фоточувствительности, напряжение шума становятся полярными т.е. приобретают разные значения в зависимости от полярности приложенной электрической нагрузки. Кратность полярности параметров может достигать десятки процентов от исходных значений.

При изменении каждые 10-15 минут полярности электрической нагрузки фоторезистора на противоположное и выдержке фоторезистора при таком режиме питания в течении 24-48 часов при температуре 60 °С отношение сигнал/шум увеличивается в разы (в случае образцов, имеющих повышенный уровень шума) или остается на уровне близком к исходному.

Фоточувствительная поликристаллическая пленка представляет собой сетчатую структуру из кристаллитов селенида свинца, погруженную в оксидно-стеклообразную диэлектрическую фазу (стекломассу). Последняя является результатом химического взаимодействия между окислами селенида свинца и компонентами подложки (силикатное стекло) в ходе термообработки.

Исходя из того, что силикатное стекло содержит большое количество щелочных металлов, при этом наибольшей подвижностью обладают положительные ионы натрия, интерпретация экспериментальных результатов связывается с миграцией ионов натрия в стекломассе, окружающей кристаллиты селенида свинца [1].

При длительной электрической нагрузке фоторезистивной структуры происходит накопление положительных ионов натрия вблизи отрицательного электрода. Соответственно в области отрицательного электрода концентрация положительных ионов натрия на границе стекло-масса-кристаллит повышена по сравнению с остальной частью пленки. Известно, что при локализации положительного заряда на поверхности полупроводника уровень Ферми в объеме полупроводника смещается в сторону зоны проводимости, [2]. Вследствие этого, вблизи положительного электрода пленка, селенида свинца, приобретает р-тип проводимости, в то время как остальная часть пленки имеет р+-тип проводимости, что приводит к образованию р+-р-перехода. Величина барьера данного перехода увеличивается пропорционально продолжительности воздействия электрической нагрузки.

Наличие энергетического барьера приводит к полярности параметров фоторезистора, увеличению шума и соответственно уменьшению отношения сигнал/шум.

Режим питания с периодической сменой полярности приводит к разрушению р+-р перехода вследствие выравнивания концентрации положительных ионов натрия по всей площади пленки.

Испытания фоторезисторов при режиме питания со сменой полярности показали исключительную стабильность характеристик во времени, по сравнению с режимом питания без изменения полярности режима питания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Belenkov A., Davydov V., Boyko S. [et al.] The influence of mobile impurities on photoelectric properties of PbSe-based multiphase photosensitive structures // Journal of Physics: Conference Series. 2015. Vol. 643.
2. Волькенштейн Ф.Ф. Электронная теория катализа на полупроводниках. М.: ФИЗМАТЛИТ, 1960. 187 с.

УДК 537.534.35/621.373.8

ГРНТИ 47.35.31

СФОКУСИРОВАННЫЙ ИОННЫЙ ПУЧОК КАК ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПРОТОТИПОВ НОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ

Вознюк Г.В.¹, Митрофанов М.И.¹, Бабичев А.В.², Евтихийев В.П.¹

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе,

²Университет ИТМО

В исследовании предлагается метод сфокусированного ионного пучка для создания прототипов новых конструкций полупроводниковых лазеров. В ходе исследования были изготовлены образцы квантово-каскадных лазеров с улучшенными характеристиками: достигнута одночастотная генерация в диапазоне длин волн 7-8 мкм с высоким коэффициентом подавления боковых мод. Разработаны конструкции полосковых и кольцевых квантово-каскадных лазеров, включая устройства с поверхностным выводом излучения через текстурированный слой. Полученные результаты имеют важное значение для создания приборов, пригодных для спектроскопических применений и газоанализа.

Ключевые слова: сфокусированный ионный пучок, квантово-каскадный лазер, одночастотная генерация, поверхностный вывод излучения.

FOCUSED ION BEAM AS A TOOL FOR PROTOTYPING NEW SEMICONDUCTOR LASER DESIGNS

Voznyuk G.V.¹, Mitrofanov M.I.¹, Babichev A.V.², Evtikhyev V.P.¹

¹Ioffe Institute,

²ITMO University

The study proposes a method using a focused ion beam to create prototypes of new semiconductor laser designs. During the study, samples of quantum cascade lasers with improved characteristics were manufactured: single-frequency generation was achieved in the wavelength range of 7-8 μm with a high side mode suppression coefficient. Strip and ring QCL designs were developed, including devices with surface radiation extraction through

a textured layer. The results obtained are important for the creation of devices suitable for spectroscopic applications and gas analysis.

Keywords: focused ion beam, quantum cascade laser, single-frequency generation, surface radiation extraction.

При разработке новых конструкций полупроводниковых лазеров часто возникает необходимость использовать оптические элементы, изготовление которых требует применения субмикронной литографии [1,2,3]. К сожалению, стандартный литографический подход на этапе прототипирования является неоправданно дорогостоящим. Кроме того, удобно иметь возможность вносить изменения в готовое устройство. В этом случае невозможно применять литографические методы, требующие использования фоторезиста и планарной поверхности. Для решения вышеупомянутых проблем хорошо подходит метод прямой литографии с помощью сфокусированного ионного пучка (СИП). Он позволяет формировать литографический рисунок с нанометровым разрешением как в металлическом (контактном) слое, так и в полупроводниковой гетероструктуре без использования масок.

В исследовании предлагается метод прямой литографии сфокусированным ионным пучком для реализации различных конструкций оптических элементов модифицирующих оптические параметры полупроводниковых лазерных резонаторов. В работе представлены изготовленные методом СИП: распределенные отражатели Брэгга (РБО) для проектирования одномодовых квантово-каскадных лазеров (ККЛ); субволновые текстурированные слои для поверхностного вывода излучения в кольцевых резонаторах ККЛ; дифракционные решетки второго порядка в ККЛ для селекции модового состава.

Важными результатами исследований стали опытные образцы с модифицированными оптическими характеристиками, изготовленные из промышленно выпускаемых полосковых и кольцевых ККЛ. При использовании оптимизированных режимов травления СИП были сформированы РБО в верхней обкладке полосковых ККЛ. Достигнута одночастотная генерация при температуре 280К на длине волны излучения 7.74 мкм с коэффициентом подавления боковых мод 24 дБ. Спектры генерации таких лазеров представлены на рис. 1а. Продемонстрированы конструкции кольцевых ККЛ с дифракционной решеткой второго порядка, сформированной методом СИП. Достигнута одночастотная генерация на длине

7,5 мкм с коэффициентом подавления боковых мод > 20 дБ. Изображения сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и спектры генерации таких лазеров представлены на рис. 1б и рис. 2 соответственно.

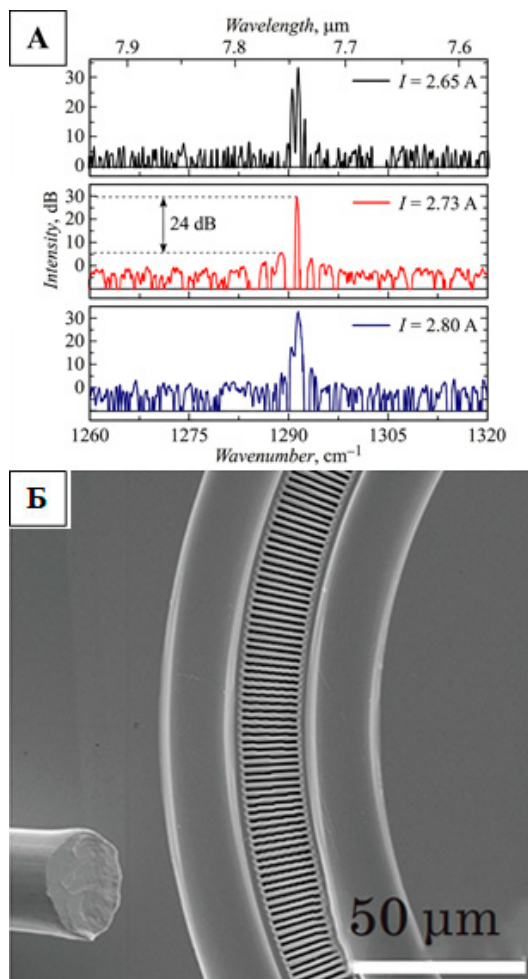


Рисунок 1 – (а) Спектры генерации полосковых ККЛ с РБО при различном уровне токовой накачки, (б) изображение СЭМ кольцевого ККЛ с дифракционной решеткой, сформированной методом СИП на поверхности волновода

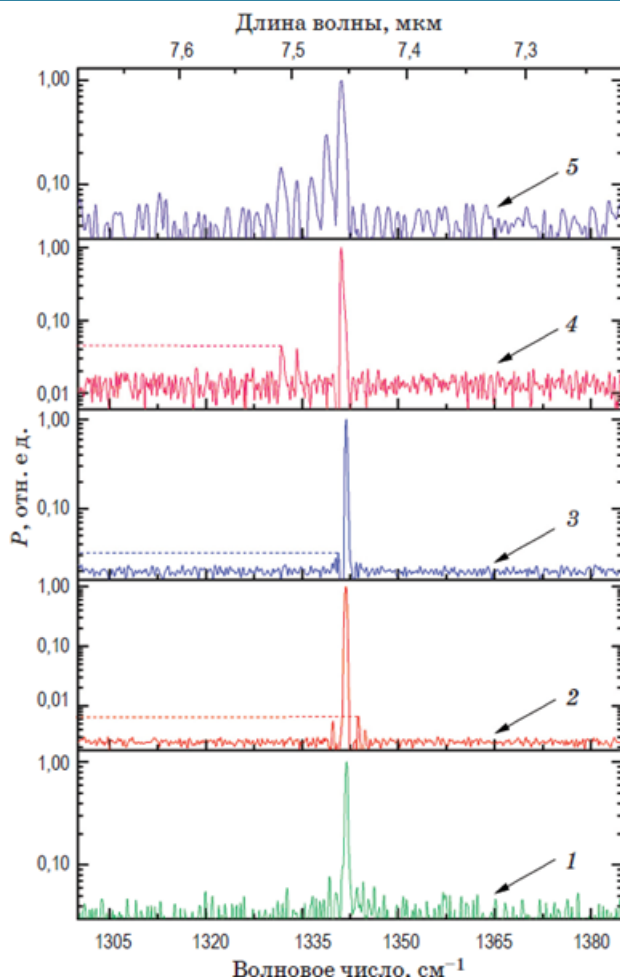


Рисунок 2 – Спектры генерации ККЛ с селективным кольцевым резонатором. Кривые 1, 2, 3, 4, 5 соответствуют уровню токовой накачки I_{th} , $1,2I_{th}$, $1,5I_{th}$, $3,0I_{th}$, $3,5I_{th}$

Впервые была продемонстрирована работа кольцевого ККЛ с поверхностным выводом излучения через текстурированный слой. Было показано, что формирование окон, содержащих текстурированную

поверхность, позволяет осуществить направленный поверхностный вывод излучения из кольцевого ККЛ с расходимостью $\sim 12^\circ$.

Достижение одночастотной генерации в полупроводниковых ККЛ спектрального диапазона 7-8 мкм является ключевым шагом для создания приборов, пригодных для спектроскопических применений и анализа многокомпонентных газовых смесей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Li P., Chen S., Dai H. [et al.] Recent advances in focused ion beam nanofabrication for nanostructures and devices: fundamentals and applications // *Nanoscale*. 2021. Vol. 13. No. 3. P. 1529–1565.
2. Szedlak R., Hisch T., Schwarz B. [et al.] Ring quantum cascade lasers with twisted wavefronts // *Scientific Reports*. 2018. Vol. 8. No. 1. P. 4666.
3. Szedlak R., Holzbauer M., Reininger P. [et al.] Ring quantum cascade lasers with grating phase shifts and a light collimating dielectric metamaterial for enhanced infrared spectroscopy // *Vibrational Spectroscopy*. 2016. Vol. 84. P. 101–105.

УДК 539.213.2
ГРНТИ 55.09.35

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ИК ДИАПАЗОНА

Клишков В.А., Павлов Е.А., Семенча А.В.

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»

В исследовании представлены результаты получения прогноз-
ной модели свойств стеклообразных материалов от химического состава с использованием машинного обучения и нейросетей. В качестве основного объекта исследования были выбраны халькогенидные стекла. Температура стеклования была предсказана с применением 3 различных моделей, построена диаграмма иллюстрирующая статистический вклад компонента в его величину.

Ключевые слова: машинное обучение, искусственный интеллект, халько-
генидные стекла, модель.

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS TO PREDICT THE PROPERTIES OF IR RANGE MATERIALS

Klinkov V.A., Pavlov E.A., Semench A.V.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

The study presents the results of developing a predictive model for the properties of glassy materials based on their chemical composition using machine learning and neural networks. Chalcogenide glasses were chosen as the primary object of study. The glass transition temperature was predicted using three different models, and a diagram was constructed illustrating the statistical contribution of the component to its value.

Keywords: machine learning, artificial intelligence, chalcogenide glasses, model.

Широкое практическое использование средней и дальней инфракрасной области спектра в оптических устройствах и аналитических приборах обуславливает интерес к применимым для него оптическим материалам. На смену традиционным кремнию и германию приходят более доступные и варьируемые по оптическим и термомеханическим характеристикам материалы – халькогенидные стекла (ХС) [1, 2]. ХС, с момента своего открытия в 1955 году Б.Т. Коломийцем и Н.А. Горюновой, привлекают исследователей уникальной комбинацией свойств: высоким показателем преломления, низкой температурой размягчения (обычно менее 300°C), наличием фотоструктурных превращений, рекордно низким уровнем оптических потерь, а также возможностью получения оптических элементов методами прессования [3, 4]. На данный момент промышленностью серийно выпускается не более 8 марок халькогенидных стекол, при этом для проектирования оптических систем отмеченной номенклатуры недостаточно, поэтому вопрос получения новых составов стекол с иным набором оптических констант чем у имеющихся марок является весьма актуальным.

Последние годы активно развиваются подходы по прогнозированию характеристик кристаллических материалов с использованием инструментов искусственного интеллекта. Несмотря на достижения в области компьютерного моделирования и методов машинного обучения, исследователи продолжают сталкиваться с трудностями в точном прогнозировании свойств стеклообразных материалов. Последнее обусловлено с необходимостью учета большего числа параметров и структурных особенностей стекол, чем для кристаллических веществ. Одним из возможных путей решения отмеченной проблемы является обобщение данных и их систематизация, на основе анализа которых могут быть построены регрессионные модели поведения свойств от состава [5].

В рамках данной работы проведена разработка моделей машинного обучения для построения прогноза свойств ХС. В качестве моделей использовались следующие: многослойный перцептрон (MLP), случайный лес (Random Forest) и метод *k*-ближайших соседей (*k*-Nearest Neighbors). Исходные данные, на которых проводилось обучение модели, были использованы из базы данных халькогенидных стекол [6]. В качестве прогнозируемого свойства стекла было выбрано значение температуры стеклования T_g , которое имеет важное практическое и технологическое значение.

Оптимизация и подбор гиперпараметров моделей проводился

методом поиска по сетке в сочетании со вложенной перекрестной проверкой. Оценка качества сформированного прогноза величины T_g проводилась по коэффициенту детерминации (R^2) и средней квадратичной ошибки (RMSE). Полученные значения бенчмарков для исследованных моделей приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения R^2 и RMSE для исследованных моделей для прогнозирования температуры стеклования халькогенидных стекол

	T_g	
	R^2	RMSE
Random forest	0,913	29,75
KNN	0,907	30,67
XGBoost	0,908	30,54

Представленные значения свидетельствуют, что модели на основе случайного леса имеет более высокую предсказательную способность на всем исследуемом наборе стекол. Для определения вклада компонентов халькогенидного стекла на величину T_g в исследуемой модели была построена диаграмма методом SHAP-анализа [7], представленная на рисунке 1.

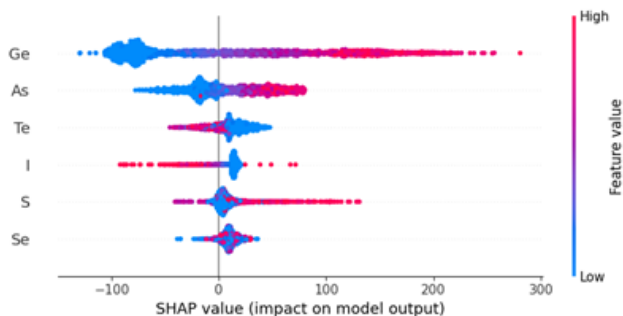


Рисунок 1 – Анализ важности признаков для предсказания температуры стеклования в модели Random forest

Приведенная диаграмма показывает, что наибольшее положительное влияние на величину T_g оказывает германий: повышение содержания Ge в стекле приводит к увеличению предсказанной температуры стеклования. Последнее коррелирует с описанной в литературе структур-

ной ролью германия в ХС [8].

Полученные в рамках работы результаты свидетельствуют о применимости отмеченных алгоритмов для формирования прогнозов величины температуры стеклования от состава для халькогенидных стекол. Дальнейшие исследования будут направлены на адаптацию моделей для предсказания других свойств стекол.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» (Соглашение № 075-15-2025-210 от 04 апреля 2025 г.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Семенча А.В. [и др.] Термопластичное халькогенидное стекло ИК диапазона для микрооптических элементов. 2023.
2. Fan P. [et al.] Large-scale As-Sb-S chalcogenide glasses with ultrahigh gradient refractive index // *Materials & Design*. 2025. Vol. 252. P. 113815.
3. Ovshinsky S.R., Adler D. Local structure, bonding, and electronic properties of covalent amorphous semiconductors // *Contemporary Physics*. 1978. Vol. 19. No. 2. P. 109–126.
4. Markov V.A. [et al.] Adhesive As-S-Se-I immersion lenses for enhancing radiation characteristics of mid-IR LEDs operating in wide temperature range // *Infrared Physics & Technology*. 2016. Vol. 78. P. 167–172.
5. Singla S. [et al.] Accelerated design of chalcogenide glasses through interpretable machine learning for composition–property relationships // *Journal of Physics: Materials*. 2023. Vol. 6. No. 2. P. 024003.
6. Клинков В.А., Семенча А.В., Павлов Е.А. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025622585. Рос. Федерация. 2025.
7. Borgonovo E., Plischke E., Rabitti G. The many Shapley values for explainable artificial intelligence: A sensitivity analysis perspective // *European Journal of Operational Research*. 2024. Vol. 318. No. 3. P. 911–926.
8. Fekeshgazi I.V. Concentration changes of nonlinear optical properties of Ge-containing chalcogenide glasses // *Proceedings of 16th Congress of the International Commission for Optics: Optics as a Key to High Technology*. SPIE, 1993. Vol. 1983. P. 840–841.

УДК 681.7.069.32

ГРНТИ 59.41.71

ИЗМЕРЕНИЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ МАТРИЦ

Жамойть А.Е., Климович Т.А., Клыбик В.Ю., Левчук Д.С.

ОАО «ИНТЕГРАЛ»

В исследовании приведены разработанные методики измерений фотоэлектрических параметров тепловизионных матриц, которые позволяют оценить работоспособность прибора на этапе изготовления.

Ключевые слова: тепловизионная матрица, фотоэлектрические параметры.

MEASUREMENTS OF PHOTOVOLTAIC PARAMETERS OF THERMAL IMAGING ARRAYS

Zhamoit A.E., Klimovich T.A., Klybik V.Y., Liauchuk D.S.

INTEGRAL, OJSC

The study presents the developed methods for measuring the photovoltaic parameters of thermal imaging arrays, which make it possible to evaluate the operability of the device at the manufacturing stage.

Keywords: thermal imaging matrix, photovoltaic parameters.

Тепловизионную матрицу можно рассматривать как электронный блок тепловизора, не имеющий входной оптики, а также систем визуализации выходного сигнала. Поэтому большинство параметров, используемых для определения характеристик тепловизоров, применимы и для описания характеристик матриц, таких как R_v (чувствительность), NETD (Noise Equivalent Temperature Difference – эквивалентная шуму разность температур), фиксированный шум.

Целью данной работы является разработка методик измерения фотоэлектрических параметров для их последующего использования на предназначенном для этого программно-аппаратном комплексе (ПАК)

в процессе изготовления тепловизионной матрицы.

ПАК включает в себя следующие основные узлы, представленные на рисунке 1:

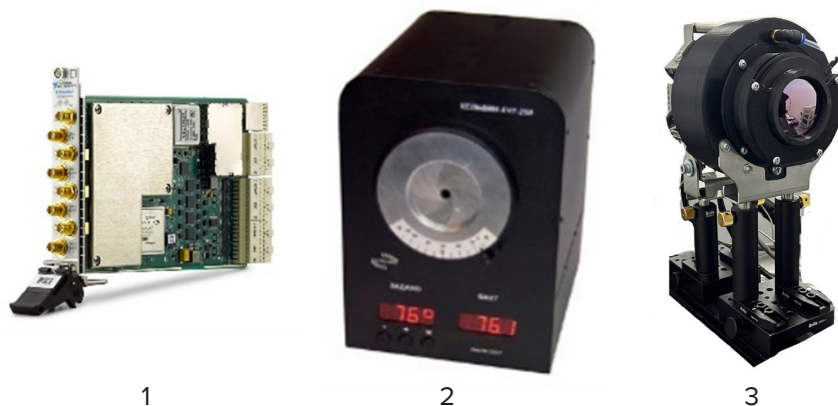


Рисунок 1 – Используемое оборудование для измерений:

- 1 - Измерительный PXI (PCI eXtension for Instrumentation) модуль, включающий дигитайзер 250МГц 16 бит 2 канала PXIe8916;
- 2 - Источник излучения ИК диапазона – абсолютно черное тело (АЧТ), работающее в диапазоне температур от 30 до 500 °С;
- 3 - Держатель (штатив) тепловизионной матрицы с линзой f / 1.0.

В процессе работы тепловизионной матрицы, PXI модуль получает и обрабатывает сигнал пикселей. В результате формируется численная матрица пикселей. На основе анализа литературных источников [1-2] были разработаны соответствующие методики измерения фотоэлектрических параметров.

Чувствительность – параметр, показывающий, насколько изменяется выходное напряжение каждого пикселя при изменении температуры АЧТ на 1 К, рассчитывается согласно по формуле:

$$Rv_i = \left(\frac{\bar{x}_{i,j}(T_{\text{ачт}}) - \bar{x}_{i,j}(T_{\text{к}})}{T_{\text{ачт}} - T_{\text{к}}} \right) / M,$$

где $T_{\text{ачт}}$ – температура АЧТ; $T_{\text{к}}$ – комнатная температура; $x_{i,j}$ – напряжение пикселя i в кадре j ; M – количество пикселей.

NETD – минимальная разница температур, которую может зарегистрировать тепловизионная матрица на фоне собственных шумов [3], рассчитывается по формуле:

$$NETD = \frac{\sigma_{i,j}}{\bar{x}_{i,j}(T_{\text{ачт}}) - \bar{x}_{i,j}(T_{\text{к}})} * (T_{\text{ачт}} - T_{\text{к}}) / M,$$

где $\sigma_{i,j}$ – среднеквадратичное отклонение значений пикселей (фиксированный шум), которое рассчитывается согласно формуле:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (x_{i,j} - \bar{x}_i(T_{\text{ачт}}))^2}{N - 1}}$$

где N – количество кадров.

С использованием разработанных методик проведены измерения чувствительности и NETD тепловизионной матрицы GST817M. Получен результат для чувствительности – более 20 мВ/К, NETD – в диапазоне 25-30 мК, что соответствует требованиям заявленным производителем.

Таким образом, разработанные методики измерения позволяют оценивать фотоэлектрические параметры тепловизионных матриц на этапе изготовления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lee C.-D., Tang S.-F., Chen T.C. Novel Performance Evaluation of Thermal Camera Based on VOx Bolometer Focal Plane Array via Analysis of Sigma NETD, Mean NETD, and Roughness Index // Sensors and Materials. 2018. Vol. 30. No. 6. P. 1283–1296.
2. Chrzanowski K. Testing thermal imagers: Practical guidebook. Warsaw, 2010. 164 p.
3. FLIR Cameras — How is NETD of cooled cameras measured. 2025. URL: https://flir.custhelp.com/app/answers/detail/a_id/128 (date of access: 01.09.2025).

УДК 535.44
ГРНТИ 29.31.21

ОПТИЧЕСКОЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЕ ПОКРЫТИЕ КАК ОДНОМЕРНЫЙ ФОТОННЫЙ КРИСТАЛЛ

Тропин А.Н.

АО «НИИ «Гириконд»

В работе рассматриваются свойства многослойных тонкопленочных интерференционных покрытий в аспекте представлений о фотонных кристаллах. При описании спектральных характеристик многослойных структур проводятся аналогии с существованием запрещенных и разрешенных зон для носителей электрического заряда в твердых телах.

Ключевые слова: интерференционное покрытие, фотонный кристалл.

OPTICAL INTERFERENTIAL COATING AS A ONE-DIMENSIONAL PHOTONIC CRYSTAL

Tropin A.N.

Research Institute Girikond, JSC

In this paper the properties of multilayer thin-film interference coatings are reviewed in terms of photonic crystal representations. The description of spectral characteristics of multilayer structures draws analogies with the presence of bands gap and permitted bands for electrical charge carriers in solid materials.

Keywords: interferential coating, photonic crystal.

Фотонные кристаллы — это оптические среды с пространственно-периодическими свойствами [1]. Точно так же, как периодический потенциал кристаллической решетки твердого тела определяет энергетические свойства электронов, периодическое структурирование фотонных кристаллов приводит к возможности формирования энергетического спектра фотонов в оптически прозрачных материалах.

В зависимости от пространственного распределения диэлектрической проницаемости (показателя преломления), различают одно-, двух- и трехмерные фотонные кристаллы. Очевидным примером одномерного фотонного кристалла является слоистая среда с модуляцией показателя преломления в направлении, перпендикулярном плоскости слоев. При этом толщина каждого слоя соизмерима с длиной волны распространяющегося излучения, в результате чего возникает интерференция. В качестве такой слоистой среды можно рассматривать многослойное оптическое интерференционное покрытие.

При распространении излучения в многослойной структуре с регулярно изменяющимся показателем преломления (рис. 1-а) в энергетическом спектре фотонов, по аналогии с понятием зонной структуры в твердом теле, возникают разрешенные и запрещенные зоны. В терминах энергетической спектральной характеристики это означает существование спектральных областей пропускания и заграждения (рис. 1-б). При этом уместно отметить, что пленки, входящие в структуру покрытия, не имеют поглощения, т.е. оптически прозрачны, поэтому излучение в спектральной области заграждения не поглощается, а отражается в обратном направлении за счет многолучевой интерференции.

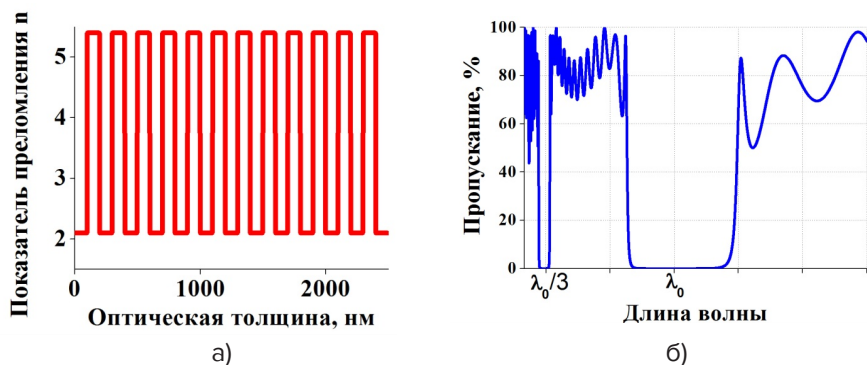


Рисунок 1 – Многослойная периодическая структура (а) и ее спектр пропускания (б)

Математическое моделирование показывает, что положение запрещенной зоны на оси длин волн и ее спектральная ширина зависят от периода, амплитуды и формы модуляции показателя преломления [2].

При нарушении регулярного изменения показателя преломления (рис. 2-а) в области спектральной запрещенной зоны появляются узкие разрешенные зоны (рис. 2-б), т.е. образуется узкополосный пропускающий интерференционный фильтр.

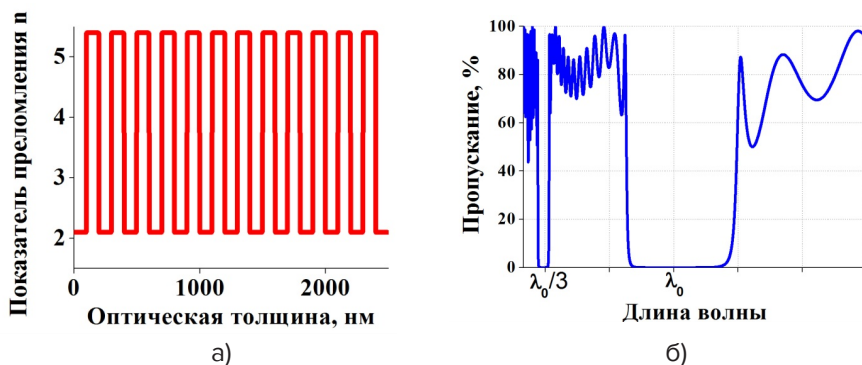


Рисунок 2 – Многослойная структура с нарушенным периодом (а) и ее спектр пропускания (б)

В заключение отметим, что на первый взгляд — только искусственные системы, созданные человеком, могут обладать свойствами фотонных кристаллов. Однако это не так, а в живой и в неживой природе встречается множество объектов, содержащих одно-, двух- и трехмерные периодические структуры, по своим свойствам подобные фотонным кристаллам [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Yablonovitch E. Photonic Crystals: What's in a Name? // Optics and Photonics News. 2007. Vol. 11. No. 3. P. 12.
2. Котликов Е.Н., Тропин А.Н. Синтез узкополосных интерференционных фильтров с поглощающими металлическими пленками // Оптический журнал. 2021. т. 88. № 9. С. 85.
3. Lv X., Zhong B., Huang Y. [et al.] Research Progress in Preparation and Application of Photonic Crystals // Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2023. Vol. 36. No. 39. P. 1.

УДК 538.958

ГРНТИ 49.33.29

ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ МДП-СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ГЕРМАНОСИЛИКАТНЫХ ПЛЁНОК ДЛЯ УФ, ВИДИМОГО И БЛИЖНЕГО ИК ДИАПАЗОНОВ

Володин В.А.^{1,2}, Хамуд Г.А.^{1,2}, Камаев Г.Н.¹

¹ИФП СО РАН,

²Новосибирский государственный университет

Предлагается простой и недорогой подход для создания фотодетекторов на основе МДП-структур, состоящих из плёнок GeSi_xO_y . Продемонстрирована их хорошая фоточувствительность в ИК, видимом и УФ диапазоне.

Ключевые слова: фоточувствительные МДП-структуры, германосиликатное стекло.

PHOTO-SENSITIVE MIS STRUCTURES BASED ON GERMANOSILICATE FILMS FOR UV, VISIBLE AND NEAR IR RANGES

Volodin V.A.^{1,2}, Hamoud G.A.^{1,2}, Kamaev G.N.¹

¹ISP SB RAS,

²Novosibirsk State University

The simple and inexpensive approach for creating photodetectors based on MIS structures consisting of GeSi_xO_y films is proposed. Their good photosensitivity in the IR, visible and UV ranges is demonstrated.

Keywords: photosensitive MIS structures, germanosilicate glass.

Фоточувствительные структуры металл-диэлектрик-полупроводник (МДП-структуры) давно применяются в системах регистрации оптических сигналов. Обычно они используются в приборах зарядовой связи (ПЗС-матрицах), в этом случае требуется «идеальный» диэлектрик,

который не проводит электрический ток, а заряд, индуцированный фотонами в каждом пикселе матрицы, считывается последовательно от пикселя к пикселю. В последнее время вернулся интерес к фоточувствительным МДП-структурам с «неидеальными» диэлектриками, через которые может протекать фототок.

Для увеличения фоточувствительности таких МДП-структур, используют диэлектрики, которые содержат квантовые точки (КТ) [1] или нанослои полупроводника (квантовые ямы) [2,3]. К примеру, в работе [1] было показано, что включения в диэлектрик КТ (нанокристаллов германия), поглощающих свет, приводит к повышению чувствительности фотодиодов с барьером Шоттки. Внедрение в диэлектрик нанослоев кремния [2] и германия [3] также приводит к повышению фоточувствительности. Плёнки нестехиометрических германосиликатных стёкол (GeSi_xO_y) обладают перспективами использования в фоточувствительных МДП-структурах [4].

В данной работе были созданы фоточувствительные МДП-структуры на основе плёнок GeO_x и GeSi_xO_y с барьером Шоттки, а также была проанализирована их фоточувствительность и спектральная зависимость фоточувствительности в диапазоне от УФ до ИК излучения.

Плёнки GeO_x и GeSi_xO_y были нанесены на подложки кремния с ориентацией (001) n-типа с удельным сопротивлением $\rho = 6 \pm 1$ Ом·см и p-типа $\rho = 12 \pm 2$ Ом·см с использованием техники высоковакуумного электронно-лучевого осаждения. Были созданы четыре структуры: S1 – n-Si/ SiO_2 (2 нм)/ $\text{GeSi}_{0,9}\text{O}_{2,8}$ (30 нм); S2 – n-Si/ SiO_2 (5 нм)/Ge(3 нм)/ $\text{GeSi}_{0,9}\text{O}_{2,8}$ (25 нм); S3 – n-Si/ SiO_2 (2 нм)/ $\text{GeO}_{1,1}$ (97 нм) и S4 – p-Si/ SiO_2 (2 нм)/ $\text{GeO}_{1,1}$ (97 нм). Структура S2 содержала нанослой Ge, туннельно-связанный с подложкой кремния. Прозрачные контакты оксида индия и олова (ITO) с размером 0,7 на 0,7 мм были нанесены на диэлектрик с помощью магнетронного распыления. Для сравнения также исследовались структуры без германосиликатных плёнок - n-Si (или p-Si)/ SiO_2 (2 нм)/ITO. В случае образцов S1 и S2 исследовались как исходные образцы, так и после отжига при 500 °C в течение 30 минут в атмосфере ($S1_{\text{ann}}$ и $S2_{\text{ann}}$). Были измерены вольтамперные характеристики (ВАХ), как темновые, так и при освещении. Для изучения фоточувствительности использовался спектральный источник света с галогенной лампой и монохроматором, охватывающий спектральный диапазон от 400 до 1100 нм с разрешением 8 нм. Галогенная лампа обеспечивала излучение, а краевой фильтр подавлял дифракцию второго порядка для длинноволновых измерений (550 нм и выше).

Для исследований в УФ диапазоне использовались два светодиода: один на 278 нм и другой на 368 нм. В этом случае для подавления фонового излучения в видимом диапазоне использовались специальные фильтры.

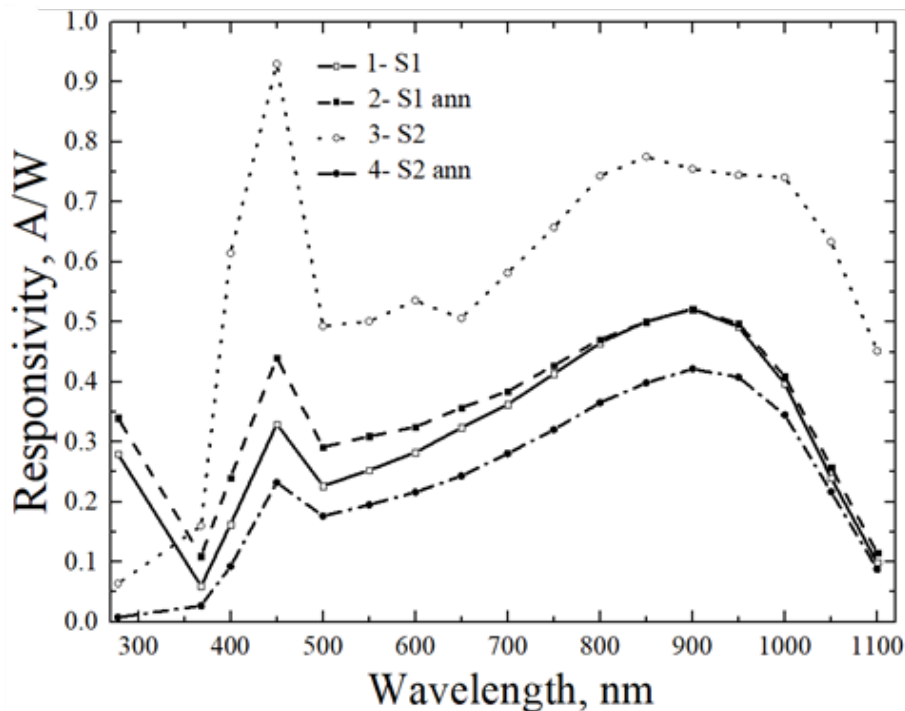


Рисунок 1 – Ампер-ваттные характеристики образцов S1, S1_{ann}, S2 и S2_{ann} в спектральном диапазоне от 278 нм до 1100 нм

На рис. 1 показаны ампер-ваттные характеристики (чувствительность) для всех образцов, которые были получены путем нормирования спектрального фототока (после вычитания темнового тока) к спектральной мощности источника света. Измерения фототока и темнового тока проводились с применением обратного смещения -1В. Кривые 1 и 2 наглядно показывают, что образец S1 имеет более высокую чувствительность в УФ-диапазоне (278 нм), чем образец S2 (кривые 3 и 4). Отжиг привел к увеличению значений чувствительности в УФ и видимом диапазонах для образца S1, тогда как для образца S2 он вызвал уменьшение

значений чувствительности. Видно, что образцы S1 и S2 имеют чувствительность, простирающуюся от УФ до ИК диапазона, в то время как образец S2 имеет высокую чувствительность вплоть до длины волны 1100 нм, предположительно, это влияние нанослой германия. Итак, были достигнуты хорошие значения ампер-ваттных характеристик в широком спектральном диапазоне, при этом максимальная удельная обнаружительная способность превысила 10^{12} Джонсов.

Из сравнения темновых и ВАХ с освещением всем спектром галогеновой лампы структур S3, S4 и структур без германо-силикатных плёнок - n-Si (или p-Si)/SiO₂ (2 нм)/ITO, было обнаружено, что слой GeO_{1,1} эффективно подавляет темновой ток (при обратном смещении) и почти не подавляет фототок. Для структуры S3 было обнаружено, что при обратном напряжении более 3 Вольт квантовая эффективность превышает 100%, то есть возникает умножение фотодырок и фотоэлектронов. Возможно, что умножение связано с наличием проводящих каналов в диэлектрике [5].

Итак, предложенный подход обеспечивает простой и недорогой способ создания фотодетекторов без p-n перехода, а на основе МДП-структур, состоящих из плёнок GeSi_xO_y. Была продемонстрирована фоточувствительность в УФ-диапазоне. Включения нанослоев германия позволяет продвинуться по чувствительности в ИК-диапазон.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при поддержке Министерства Образования и Науки РФ, проект FWGW-2025-0023. Авторы благодарны профессору Мишелю Верньи (Университет Лотарингии, Нанси, Франция) за рост германо-силикатных плёнок. Авторы благодарны ЦКП «ВТАН» НГУ за использование оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Aouassa M., M'gaieth R., Azeza B. [et al.] Fabrication of MIS photodetector with Ge nanocrystals grown by MBE // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. 2021. Vol. 32. No. 12. P. 16800–16810.
2. Aouassa M., Bouabdellaoui M., Yahyaoui M. [et al.] Single-crystalline silicon quantum well embedded in SiO₂ thin layer for broadband photodetection and energy harvesting // Applied Physics A. 2023. Vol. 129. No. 11. P. 782.

3. Ibrahim M., Aouassa M., Hassan N.K. [et al.] High photosensitive amorphous germanium-based MIS photodetector // *Physica B: Condensed Matter*. 2025. Vol. 710. P. 417229.

4. Hamoud G.A., Kamaev G.N., Vergnat M. [et al.] Photosensitive MIS structures based on GeSixOy films // *Optical Materials*. 2025. Vol. 162. P. 116838.

5. Fernandes M., Vygranenko Y., Schwarz R. [et al.] Photocurrent multiplication in ITO/SiOx/Si optical sensors // *Vacuum*. 2002. Vol. 65. No. 1. P. 67–71.

УДК 621.315.592:621.383.5:621.373.826
ГРНТИ 47.09.33

ЛАЗЕРНАЯ МОДИФИКАЦИЯ СЕЛЕНИДА СВИНЦА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ГАЗОВОГО АНАЛИЗА

**Сергеев М.М.¹, Ольхова А.А.², Пушкарёва А.Е.¹, Греско В.Р.¹,
Долгополов А.Д.¹, Патрикеева А.А.¹**

¹Университет ИТМО,

²ООО «Московский центр фотоники»

В работе представлены результаты исследований по лазерной модификации халькогенидных плёнок селенида свинца (PbSe) с целью повышения фоточувствительности элементов газового анализа. Проведено сравнение лазерной и традиционной тепловой обработки плёнок, проанализированы изменения оптических и электрических характеристик материала в зависимости от режимов лазерного воздействия.

Ключевые слова: лазерная модификация, селенид свинца, фотодетектор, халькогенидные плёнки.

LASER MODIFICATION OF LEAD SELENIDE FOR ENHANCING THE PHOTOSENSITIVITY OF GAS ANALYSIS ELEMENTS

**Sergeev M.M.¹, Olkhova A.A.², Pushkareva A.E.¹, Gresko V.R.¹,
Dolgoplov A.D.¹, Patrikeeva A.A.¹**

¹ITMO University,

²Moscow Photonics Center, LLC

The paper presents the results of research on laser modification of chalcogenide lead selenide (PbSe) films aimed at enhancing the photosensitivity of gas analysis elements. A comparison between laser and conventional thermal treatment of the films is carried out, and changes in the optical and electrical characteristics of the material are analysed depending on the laser exposure regimes.

Keywords: laser modification, lead selenide, photodetector, chalcogenide films.

Традиционная технология изготовления фотодетекторов включает тепловую обработку плёнки селенида свинца в печи. Плёнка толщиной около 1 мкм наносится на покровное стекло (180 мкм) и отжигается для фиксации на подложке и стабилизации оптических и электрических характеристик. Предложена замена тепловой обработки на лазерную, которая обладает рядом существенных преимуществ.

Во-первых, воздействие локализовано: обрабатывается не вся площадь плёнки, а отдельные участки. Во-вторых, появляется возможность гибко варьировать режимы лазерного воздействия и создавать на одной подложке структуры с различными свойствами. В-третьих, процесс обработки значительно ускоряется: полная обработка плёнки размером 20×20 мм занимает всего 3–5 минут, тогда как печной отжиг (нагрев до 300–500 °С, выдержка и остывание) требует нескольких часов.

В ходе экспериментов исследовалось воздействие различных типов лазерного излучения, включая непрерывное УФ-излучение с длиной волны $\lambda=405$ нм при скорости сканирования 1 мм/с. Время воздействия на каждый участок составляло 1–2 с, а расчётная температура в зоне воздействия достигала 400–600 °С. Также применялись наносекундные импульсы ближнего ИК-диапазона [1].

При печном отжиге наблюдалось окисление плёнки с формированием пористого оксида селенида свинца, что приводило к снижению проводимости, но повышало механическую стабильность материала. Лазерная обработка позволила избежать слияния плёнки и сформировать периодические структуры, что сказалось на её оптических свойствах.

Так, при воздействии УФ-излучения удалось снизить зеркальное отражение плёнки до 4–5% — это существенно ниже исходного уровня зеркального отражения плёнки (53 %), а также показателя, достигнутого после традиционной тепловой обработки в печи (около 12 %). В видимом диапазоне при ИК-воздействии отражение уменьшилось с 38% до 10%. При этом диффузное отражение практически не изменилось и оставалось в пределах погрешности измерений. Наглядное сравнение спектров отражения для всех типов образцов представлено на рисунке 1. Изменения коснулись и электрических характеристик: сопротивление плёнки снизилось с 1400 до 1200 Ом/мм. Примечательно, что сопротивление зависело от направления измерения относительно треков лазерного воздействия: вдоль треков оно уменьшалось, а поперёк — увеличивалось.

Кроме того, были выявлены два характерных режима модификации: фотопотемнение и фотопросветление. В режиме фотопотемнения

сопротивление плёнки снижалось без признаков окисления, что, вероятно, связано с рекристаллизацией структуры материала. В режиме фотопросветления, напротив, сопротивление возрастало — это происходило после полного окисления плёнки, когда окисел достигал всей её толщины. Эти наблюдения согласуются с результатами сравнительного анализа влияния CW NUV и Pulse NIR излучения на фоточувствительность PbSe-плёнок [2].

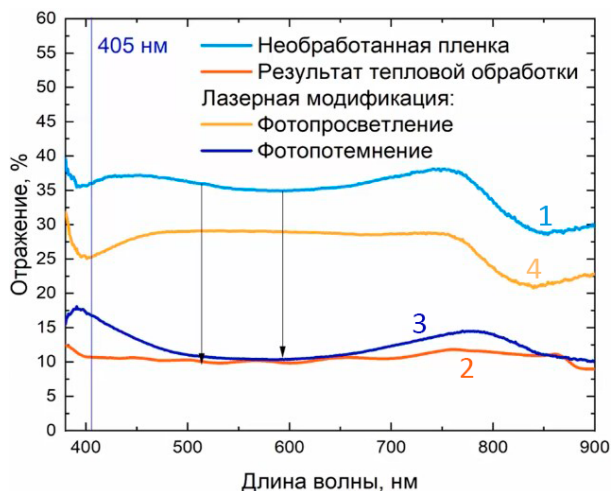


Рисунок 1—Спектры отражения, полученные для образцов, подвергнутых различной обработке: 1 - необработанный образец, 2 - результат «хорошей» термообработки в печи, 3 - образец после лазерной модификации - фотопотемнение, 4 - образец после лазерной модификации - фотопросветление.

В ходе работы продемонстрирована возможность минимизации отражения плёнок PbSe в диапазоне 2,5–4 мкм (2–10 мкм в целом) за счёт лазерной модификации, что критически важно для детектирования CH_4 и CO_2 . Режимы фотопросветления/фотопотемнения обеспечивают управление сопротивлением и отражением, открывая перспективы для создания фотодетекторов нового поколения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ольхова А.А., Патрикеева А.А., Дубкова М.А. [и др.] Модификация оптических и электрических свойств плёнок селенида свинца PbSe наносекундными импульсами лазерного излучения с длиной волны 1,064 мкм // Оптический журнал. 2023. т. 90. №. 4. С. 35-47.
2. Olkhova A., Patrikeeva A., Dubkova M. [et al.] Comparison of CW NUV and Pulse NIR Laser Influence on PbSe Films Photosensitivity // Appl. Sci. 2023. Vol. 13. P. 2396.

УДК 666.227
ГРНТИ 7.09.41

САПФИРОВЫЕ ЗАЩИТНЫЕ ОКНА ДЛЯ ИЗВЕЩАТЕЛЕЙ ПЛАМЕНИ

Белов Д.Ю., Свиридов В.П.

ЗАО «Ростокс-Н»

В работе приводятся исследования изменения спектра пропускания лейкосапфировых окон в ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра в зависимости от термической и механической обработки окон. Показано влияние дополнительного отжига и шероховатости поверхности на спектр пропускания.

Ключевые слова: извещатели пламени, защитные окна, синтетический сапфир, лейкосапфир.

SAPPHIRE PROTECTIVE WINDOWS FOR FLAME DETECTORS

Belov D.Y., Sviridov V.P.

Rostox-N, CJSC

The study provides studies of changes in the transmission spectrum of sapphire windows in the ultraviolet and infrared regions of the spectrum, depending on the thermal and mechanical treatment of windows. The effect of additional annealing and surface roughness on the transmission spectrum is shown.

Keywords: flame detectors, protective windows, synthetic sapphire.

В связи с ужесточающимися требованиями к производственной безопасности на промышленных объектах особое внимание уделяется инструментальным средствам контроля на атомных станциях, нефте- и газопроводах и т. п. В настоящее время активно развиваются современные методы контроля, расширяется и совершенствуется приборная база, одними из широко используемых приборов являются извещатели пламени [1].

Чаще всего в извещателе перед сенсором (чувствительным

элементом) устанавливается защитное стекло, обязательным требованием к которому является пропускание всего диапазона электромагнитного излучения пламени. Поэтому одним из материалов, применяемых в качестве защитных стекол для извещателей, является искусственно выращенный сапфир или лейкосапфир. Сапфировые защитные окна извещателей пламени предназначены для механической защиты сенсоров от ударов и разрушающих факторов внешней среды (пыль, влага, копоть), а также для дополнительной оптической фильтрации от помех.

Лейкосапфир обладает уникальным сочетанием химических и физических свойств: высокой твердостью и прочностью, оптической прозрачностью от ультрафиолетового до инфракрасного диапазона, химической стойкостью к агрессивным средам, высокой температурой плавления и теплопроводностью [2], благодаря чему активно применяется в многодиапазонных извещателях, в том числе и взрывозащищенного исполнения.

На рисунке 1 приводится спектр пропускания лейкосапфира.

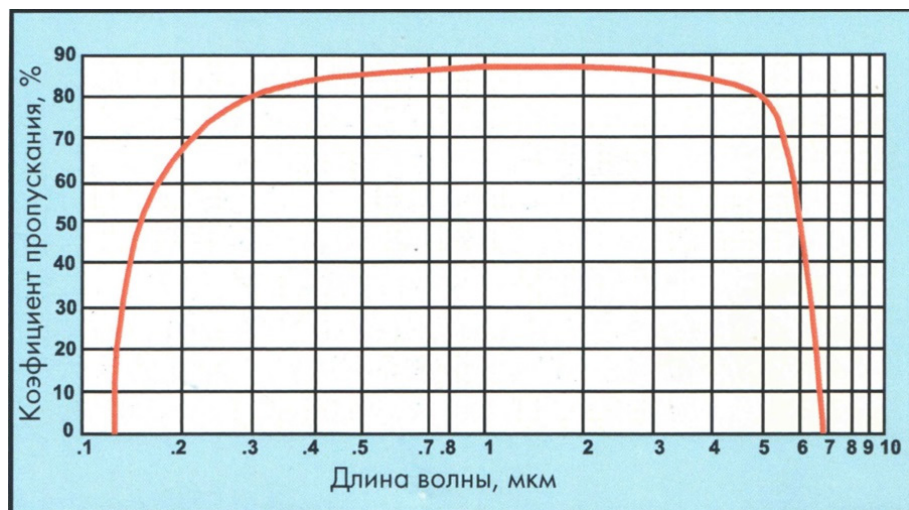


Рисунок 1 – Спектр пропускания лейкосапфира

Для изготовления лейкосапфировых защитных окон для извещателей пламени используются монокристаллы, выращенные различными методами. Как и все монокристаллы, лейкосапфир после выращивания обладает определенными несовершенствами кристаллической решетки,

которые могут влиять на пропускание в различных областях спектра [3].

В исследовании приводятся данные о способах повышения пропускания монокристаллов путем проведения дополнительного отжига, а также снижения шероховатости поверхности.

Отжиг монокристаллических заготовок проводился в вакууме, при температурах от 1800 до 1950 °С. На рисунках 2 и 3 приводятся зависимости пропускания полированных лейкосапфировых окон толщиной 2 мм в зависимости от температуры отжига. И в ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра удалось достичь увеличения пропускания при проведении отжига в вакууме при температуре 1950 °С. На рисунках 2 и 3 приводятся соответствующие зависимости.

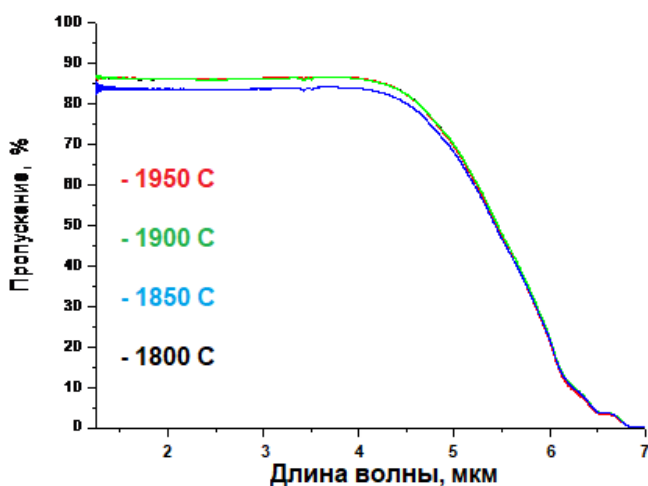


Рисунок 2 – Пропускание лейкосапфировых окон в инфракрасной области в зависимости от температуры отжига заготовок

Стандартными требованиями к полированным оптическим изделиям, является шероховатость порядка $R_z 0,05$ мкм, которая достигается для лейкосапфировых окон полировкой алмазными пастами с зернистостью порядка 5-7 мкм. В работе удалось снизить шероховатость сапфировых окон до уровня $R_z 0,01-0,02$ путем использования алмазных паст с

зернистостью вплоть до 1 мкм, при этом время механической обработки окон существенно возросло, а пропускание во всем диапазоне спектра практически не изменилось.

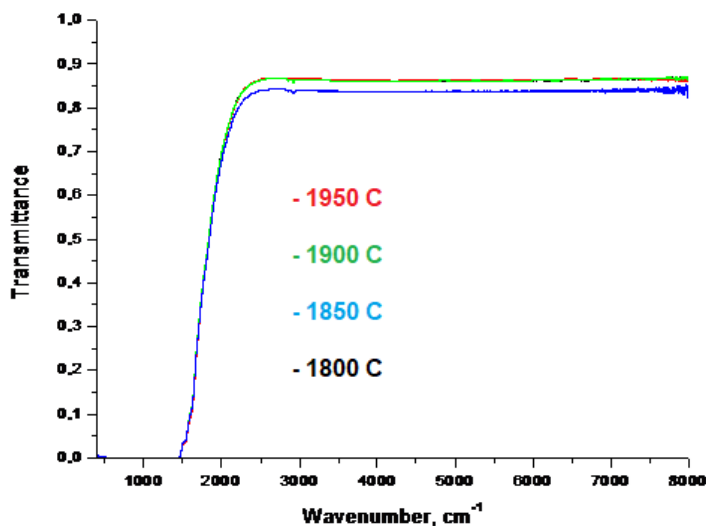


Рисунок 3 – Пропускание лейкосапфировых окон в ультрафиолетовой области в зависимости от температуры отжига заготовок

ЛИТЕРАТУРА

1. Bogue R. Sensors for fire detection // Sensor Review. 2013. Vol. 33. No. 2. P. 99–103.
2. Dobrovinskaya E.R., Lytvynov L.A., Pishchik V. Sapphire: Material, Manufacturing, Applications. Springer US, 2009.
3. Khattak C. P., Schmid F., Smith M. B. Correlation of sapphire quality with uniformity and optical properties // Proc. SPIE. 1997. Vol. 3060. P. 250–257.

УДК 614.844

ГРНТИ 81.92.15

ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ ИНИЦИАЛИЗАЦИИ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ И РОБОТИЗИРОВАННЫХ УСТАНОВОК ПОЖАРОТУШЕНИЯ

Туровский А.А.

ООО «Инженерный центр «ЭФЭР»

В статье представлены результаты испытаний извещателей пламени и линейных дымовых извещателей для определения времени инициализации роботизированной установки пожаротушения.

Ключевые слова: время инициализации, извещатели пламени.

SPECIFICITY OF DETERMINING THE INITIALIZATION TIME FOR ROBOTIC FIRE SUPPRESSION SYSTEMS

Turovsky A.A.

Engineering Centre of Fire Robotics Technology FR, LLC

The article presents the test results of flame detectors and linear smoke detectors for determination the initialization time of a robotic fire suppression system.

Keywords: initialization time, flame detectors.

В настоящее время роботизированные установки пожаротушения (далее РУП), относящиеся к автоматическим установкам пожаротушения (далее АУП), нашли широкое применение для защиты от пожара объектов различного назначения. Принцип работы РУП производства «ЭФЭР» рассмотрен в статье [1]. Инициатором запуска работы РУП является сигнал от пожарной сигнализации.

В 2025 году ФГБУ ВНИИПО МЧС России разработан проект изменения 2 к своду правил СП 485.1311500.2020 (далее СП485),

предусматривающий методику огневых испытаний для АУП. Критический взгляд на данный проект представлен в статье [2], например, в проекте отсутствует ограничение по времени свободного горения для очагов класса А.

Компанией «ЭФЭР», совместно с Санкт-Петербургским университетом ГПС МЧС России, разработана методика огневых испытаний применительно к РУП, с учетом изм. 2 СП485. В качестве времени инициализации применяются результаты выдачи сигнала «Пожар» испытуемыми образцами извещателей. От времени выдачи сигнала зависит эффективность тушения установкой, т.к. тушить пожар на ранней стадии значительно проще, чем на развивающейся стадии.

Государственный стандарт [3] устанавливает максимальное время выдачи сигнала на тестовые очаги ТП-5 и ТП-6 не более 30 секунд. Однако модельные очаги, описанные в изм.2 СП485 значительно отличаются от тестовых очагов, предусмотренных в ГОСТе на испытания извещателей пламени. Фотоснимки модельных очагов показаны на рисунке 1, схема проведения испытаний для извещателей пламени на рисунке 2. Дымовые извещатели установлены на высоте 10 метров над очагом.

Для испытаний выбраны образцы трех российских производителей: «Болид», «Рубеж», «Полисервис». Из коммерческих соображений наименование извещателей в таблице не показано. Испытания проведены при участии экспертов из МЧС, результаты испытаний представлены в таблицах 1 и 2. На испытаниях время свободного горения было ограничено: 12 минут для очага из древесины, 5 минут – для очага из шин.



Рисунок 1 – Модельный очаг для групп помещений 1 и 2 (слева),
3 (справа)

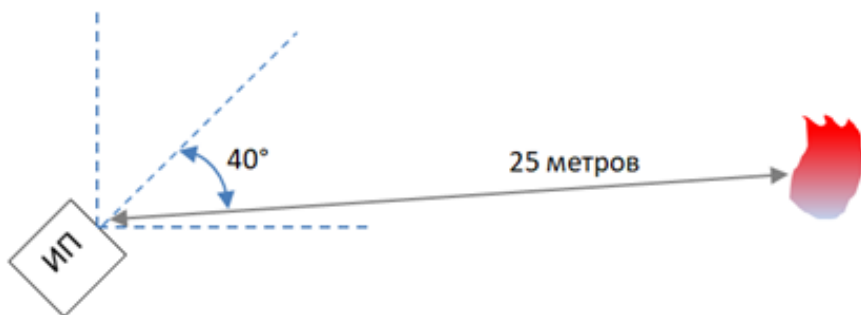


Рисунок 2 – Схема проведения испытаний

Таблица 1 – Значения времени свободного горения до момента выдачи сигнала извещателями для групп помещений 1 и 2

№ образца	Тип образца	Время свободного горения (инициализации), мин:сек		
		Испытание 1	Испытание 2	Испытание 3
1	ИПДЛ	*	*	*
2	ИПДЛ	*	*	*
3	ИПДЛ	*	*	*
4	ИП (ИК + УФ)	*	*	*
5	ИП (2 ИК)	09:38	10:26	10:06
6	ИП (3 ИК)	08:09	08:18	08:33
7	ИП (ИК + УФ)	*	*	*
8	ИП (3 ИК)	09:27	08:30	09:28
9	ИП (2 ИК)	*	10:18	11:36
10	ИП (2 ИК)	09:37	08:40	10:38
11	ИП (ИК + УФ)	*	*	11:18
12	ИП (3 ИК)	09:10	08:27	07:35

В таблицах применены следующие сокращения:

- 1) ИПДЛ - извещатель пожарный дымовой линейный;
- 2) ИП (ИК + УФ) – многоспектральный извещатель пламени;
- 3) ИП (2 ИК) – двухспектральный извещатель пламени;
- 4) ИП (3 ИК) – трехспектральный извещатель пламени;

- 5) * – не выдал сигнал пожар за время испытаний;
6) ** – выдал сигнал неисправность во время испытаний.

Таблица 2 – Значения времени свободного горения до момента выдачи сигнала извещателями для групп помещений 3

№ образца	Тип образца	Время свободного горения (инициализации), мин:сек		
		Испытание 1	Испытание 2	Испытание 3
1	ИПДЛ	01:55	02:07	02:14
2	ИПДЛ	**	**	**
3	ИПДЛ	01:55	02:07	**
4	ИП (ИК + УФ)	*	02:05	01:58
5	ИП (2 ИК)	*	*	*
6	ИП (3 ИК)	02:06	02:00	02:05
7	ИП (ИК + УФ)	02:10	02:10	02:09
8	ИП (3 ИК)	*	*	*
9	ИП (2 ИК)	02:27	*	02:35
10	ИП (2 ИК)	01:55	02:00	01:57
11	ИП (ИК + УФ)	02:06	02:10	02:05
12	ИП (3 ИК)	*	*	*

Время выдачи сигнала «Пожар» при горении модельных очагов на порядок выше, чем установленное в стандарте [3] для извещателей пламени применительно к тестовым очагам, которое указывает производитель в технической документации. Рекомендуется производителям извещателей в технической документации указывать время выдачи сигнала на модельные очаги применительно к АУП.

При проведении огневых испытаний АУП, факт тушения модельного очага может быть определен некорректно, т.к. к моменту выдачи сигнала «Пожар» очаг может фактически выгореть.

Результаты подобных испытаний можно использовать для анализа и совершенствования действующих государственных стандартов на извещатели пламени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Туровский А.А. Система технического зрения в роботизированных установках пожаротушения. Актуальные проблемы // Пожарная безопасность: современные вызовы. Проблемы и пути решения: материалы Всерос. науч.-практ. конф. СПб.: С.-Петерб. ун-т ГПС МЧС России, 2024. С. 54–57.
2. Малинов В. К вопросу введения в действие окончательной редакции проекта изменений № 2 в СП 485.1311500–2020 // Системы безопасности. 2025. № 4 (184). С. 80–81.
3. ГОСТ Р 53325-2012. Техника пожарная. Технические средства пожарной автоматики. Общие технические требования и методы испытаний.

УДК 004.032.26:614.842
ГРНТИ 28.23.37

МОДЕРНИЗАЦИЯ ФУНКЦИОНАЛА СВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ПОЖАРА

Кулагина Л.В., Шефер Э.А.

ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»

В исследовании предлагается подход, который позволяет модернизировать при обучении нейросетевой модели возможности определения как в видимом спектре, так и в инфракрасном спектре, при помощи трансферного и инкрементального обучения.

Ключевые слова: видимый спектр, ИК-спектр, нейросетевая модель, CNN.

MODERNIZATION OF A CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK MODEL FOR FIRE DETECTION

Kulagina L.V., Shefer E.A.

Siberian Federal University

The study proposes an approach that allows to upgrade the capabilities of the neural network model in the visible and infrared spectrum, using transfer and incremental learning.

Keywords: visible spectrum, IR spectrum, neural network model, CNN.

Развитие современных подходов к автоматизированному обнаружению пожара с использованием сверточных нейросетевых моделей показали высокую эффективность при решении задач в режиме реального времени. Тем не менее, анализ экспериментальных результатов выявил ряд ограничений, при обучении нейросетевой модели детекции огня возникает проблема с модернизацией для расширения классов детекции как в видимом спектре, так и в ИК-спектре. Ключевые вызовы, стоящие перед развитием систем обнаружения возгорания, визуальная неоднозначность объектов, ложные срабатывания на источники света или отражения, различия между данными в ИК-спектре и видимом спектре требует

согласованной работы модели при наличии междоменного сдвига [1].

Методом решения данной проблемы является использование модернизированной архитектуры обучения, произведенной на базе YOLOv8, продемонстрировавшая высокое соотношение скорости и точности при решении задач обнаружения объектов [2]. В обучении использовался подход трансферного обучения: модель была инициализирована предобученными весами на 5 разных датасетах имеющими схожие классы детекции, в первых наборах использовали изображения огня в ИК-спектре, после обучения тестовой модели в 50 эпох был получен результат, представленный на рис.1, для оценки качества обучения нейросетевой модели применялась валидация по результатам валидации были выявлены следующие метрики: Recall (0,85), Precision (0,88), mAP@0,5 (0,84) , mAP0.5:0.95(0,80).

Явный недостаток такой модели – её одноклассовая детекция, но переобучать модель с хорошими метриками времязатратная идея, таким образом лучшим решением является применение инкрементального обучения.

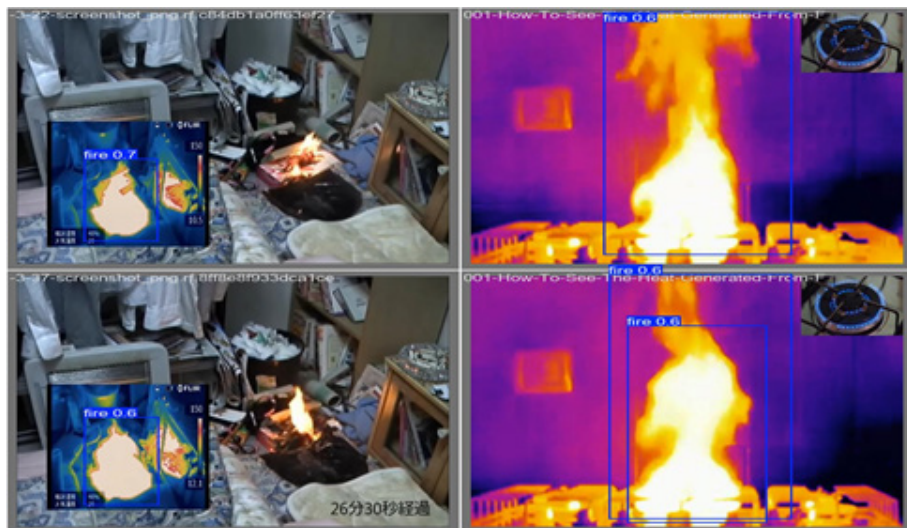


Рисунок 1 – Результаты обучения одноклассовой модели в 50 эпох

Для создания универсального инструмента детекции использовались методы трансферного и инкрементального обучения, основной

опасностью для модели является «затирание», другими словами при изучении новых классов детекции происходит перезапись классов, а не добавление новых, в качестве защиты от «затирания» применялся метод «заморозки» слоёв. Обучение проводилось в 30 эпох для исключения переобученности модели из 4-х датасетов, содержащих 3 классовых детекции был создан 1 датасет состоящий из более 7000 изображений огня [4, 5] в разных спектрах, и дыма. Таким образом удалось получить результат, представленный на рис.2, валидация показала следующий результат: Recall (0,95), Precision (0,90), mAP@0,5 (0,935) , mAP0.5:0.95 (0,87).



Рисунок 2 – Результаты инкрементального обучения

Таким образом при инкрементальном обучении удалось не только добавить новые классы детекции, но и повысить качество модели в среднем на 7%, что является хорошим результатом переобучения модели. Дальнейшей перспективой развития является добавление «Активного обучения модели», калибровка аугментацией, добавление мультимодальности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кулагина Л.В., Шефер Э.А. Прототип системы ранне-

го оповещения о пожаре на основе интеллектуального нейросетевого распознавания // Проблемы инженерных наук: формирование технологического суверенитета: сб. науч. тр. IV Междунар. Косыгинского форума. М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2024. С. 128–130.

2. Кулагина Л.В., Шефер Э.А. Сравнительный анализ современных систем обнаружения очага возгорания // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 7. С. 181–185.

3. Кулагина Л.В., Шефер Э.А. Программный комплекс мониторинга теплового режима в производственных помещениях: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2024611904 Рос. Федерация. № 2024610862. Заявл. 22.01.2024. Оpubл. 25.01.2024.

4. Шефер Э.А., Кулагина Л.В. Искусственный интеллект для повышения пожарной безопасности нефтегазовой отрасли // Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций: материалы VI Всерос. науч.-практ. конф. Железногорск: Сибирская пожарно-спасательная академия, 2024. С. 283–286.

УДК 621.316.8:621.793.8
ГРНТИ 29.19.16

ПРИМЕНЕНИЕ ПИРОТЕХНИЧЕСКИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОСПЛАМЕНИТЕЛЕЙ В СИСТЕМАХ ПОЖАРОТУШЕНИЯ

Жилин Н.М., Зонова Ю.С., Корж И.А.

АО «Омский научно-исследовательский Институт Приборостроения»

В докладе представлены пиротехнические энергетические воспламенители с использованием энергетических пленок с эффектом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Представлены их достоинства, приведен пример корпусирования, рассмотрен пример использования данных изделий в системах пожаротушения.

Ключевые слова: пиротехнический энергетический воспламенитель, многослойная энергетическая пленка, резистивный мостик.

APPLICATION OF PYROTECHNIC ENERGY IGNITERS IN FIRE EXTINGUISHING SYSTEMS

Zhilin N.M., Zonova U.S., Korzh I.A.

Omsk Research Institute of Instrument Engineering, JCS

The report presents pyrotechnic energy igniters using energy films with the effect of self-propagating high-temperature synthesis. Their advantages are presented, an example of casing is given, and an example of using these products in fire extinguishing systems is considered.

Keywords: pyrotechnic energy igniter, multilayer energy film, resistive bridge.

Пиротехнические энергетические воспламенители на основе энергетических пленок, изготовленные на основе тонкопленочной технологии [1], широко используются в различных отраслях промышленности:

- горнодобывающая промышленность (добыча полезных ископаемых);
- автомобильная промышленность (в подушках безопасности,

системах натяжения ремней безопасности, при отстреле клемм аккумуляторов и т.д.);

- в строительстве (при демонтаже объектов);
- в космической отрасли (коррекция орбиты микроспутников);
- в сигнальных устройствах и т.д. [2-8].

Главной особенностью воспламенителей, изготавливаемых АО «ОНИИП», является наличие в конструкции энергетической пленки с эффектом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Конструкция воспламенителя представлена на рисунке 1 и включает в себя подложку, контактные площадки, резистивный мостик с шириной активной резистивной области порядка десятков микрометров и СВС-пленку, при инициации которой и происходит подрыв пиротехнического состава, находящегося на поверхности этой пленки. При этом выделяется энергия, в десятки раз превышающая затраты энергии для воспламенения СВС-пленки, а температура повышается в диапазоне от 1200 до 2000 °С в зависимости от состава СВС-пленки. В качестве СВС-материала используются многослойные пленки типа Al/Ni, Al/Ti, Al/CuO, Al/NiO и др.

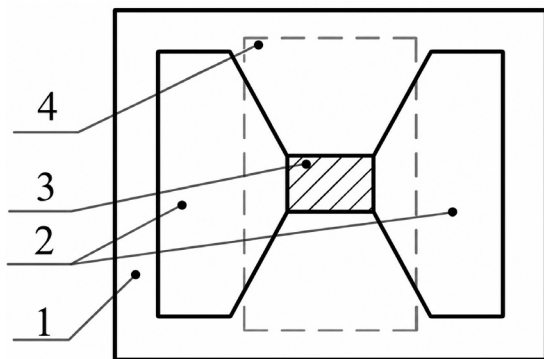


Рисунок 1 – Конструкция пиротехнического энергетического воспламенителя: 1 - подложка, 2 - контактные площадки, 3 - резистивный мостик, 4 - СВС-пленка

Следует отметить следующие преимущества данных воспламенителей:

1. Основные характеристики:

- Малые габариты (размер платы от 2×2 мм до 4×4 мм);

- Широкий диапазон значений номинальных сопротивлений от 0,05 Ом до 10 Ом;
- Воздействие безопасного тока от 0,2 А до 2 А и его времени воздействия от 2 с до 3600 с;
- Инициация воспламенителя методом конденсаторного подрыва с емкостью танталовых конденсаторов от 3,3 мкФ до 470 мкФ, заряженных от источника питания постоянного тока с напряжением 10 В – 60 В;
- Инициация методом подачи постоянного тока от 0,8 А до 7 А.

Точные значения вышеуказанных характеристик определяются исполнением воспламенителя.

2. Бескислородное горение (СВС-пленка может быть инициирована в условиях вакуума);

3. Большая площадь соприкосновения с воспламеняемым составом;

4. Высокая энергия инициации.

На рис. 2 приведен пример корпусирования воспламенителя. На данном примере воспламенитель помещен в корпус КТ-1 с колпачком, которая позволяет наносить пиротехнический состав внутрь колпачка как до контактной сварки резистивным или конденсаторным методом с корпусом, так и после.

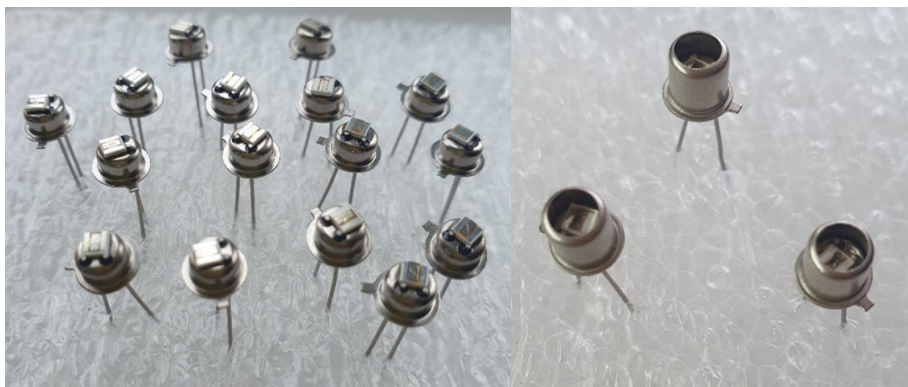


Рисунок 2 – Воспламенитель в корпусе без колпачка и с приваренным колпачком

Данные преимущества позволяют использовать воспламенители в низковольтных электрических цепях до 60 В. Таким образом, данные изделия возможно использовать в системах автоматического

пожаротушения с рабочим напряжением 12, 24, 36 В как устройства пиротехнического пуска: для запуска процессов пожаротушения при подаче пускового импульса. Примерами такого использования могут быть спринклерные оросители принудительного пуска или устройства, в которых воспламенители при инициации пиротехнического заряда создают избыточное давление в емкостях с огнетушащим веществом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Babrauskas V. Ignition handbook: principles and applications to fire safety engineering, fire investigation, risk management and forensic science. 2014. 1116 p.
2. Seo Y.D., Chung S.H., Yoh J.J. Automotive airbag inflator analysis using measured properties of modern propellants // Fuel. 2011. Vol. 90. No. 4. P. 1395–1401.
3. Qiu X., Tang R., Liu R. [et al.] A micro initiator realized by reactive Ni/Al nanolaminates for MEMS applications // 2011 16th International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference. IEEE, 2011. Vol. 23. No. 12. P. 1665–1668.
4. Zhang Y., Jiang H., Zhao X. [et al.] Characteristics of the Energetic Microinitiator Through Integrating Al/Ni Nanomultilayers with Cu Film Bridge // Nanoscale Research Letters. 2017. Vol. 12. No. 38. P. 1642–1647.
5. Rogachev A.S., Vadchenko S.G., Baras F. [et al.] Structure evolution and reaction mechanism in the Ni/Al reactive multilayer nanofoils // Acta Materialia. 2014. Vol. 66. P. 86–96.
6. Khan A., Malik A.Q., Lodhi Z.H. Development and study of high energy igniter/booster pyrotechnic compositions for impulse cartridges // Central European Journal of Energetic Materials. 2017. Vol. 14. No. 4. P. 933–951.
7. Li P., Chang C.Y., Sadiki A. Numerical Investigation of Pyrotechnical Initiators and Their Impact in Airbag Inflator Applications: Ballistic Modeling and Functional Analysis // Journal of Energy and Power Technology. 2021. Vol. 3. No. 2. P. 1–32.
8. Fu S., Shen R., Zhu P. [et al.] Metal-interlayer-metal structured initiator containing Al/CuO reactive multilayer films that exhibits improved ignition properties // Sensors and Actuators A: Physical. 2019. Vol. 292. P. 198–204.

УДК 681.586
ГРНТИ 29.17.35

ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ КОМПОЗИТНЫЕ НАНОСТРУКТУРЫ $\text{ZnO-Fe}_2\text{O}_3$

Налимова С.С., Крюков Р.С.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова

В работе синтезированы газочувствительные слои на основе композитных наноструктур $\text{ZnO-Fe}_2\text{O}_3$. Изучены особенности морфологии поверхности и распределения поверхностного потенциала полученных газочувствительных слоев. Показана эффективность их применения для детектирования паров органических растворителей на примере изопропилового спирта при рабочей температуре 250°C.

Ключевые слова: композиты, атомно-силовая микроскопия, наноматериалы, газовые сенсоры.

GAS-SENSITIVE COMPOSITE $\text{ZnO-Fe}_2\text{O}_3$ NANOSTRUCTURES

Nalimova S.S., Kryukov R.S.

St. Petersburg Electrotechnical University «LETI» named after V. I. Ulyanov (Lenin)

Gas-sensitive layers based on $\text{ZnO-Fe}_2\text{O}_3$ composite nanostructures have been synthesized. The features of the surface morphology and the distribution of the surface potential of the obtained gas-sensitive layers are studied. The effectiveness of their use for detecting organic solvent vapors is shown using the example of isopropyl alcohol at an operating temperature of 250 °C.

Keywords: composites, atomic force microscopy, nanomaterials, gas sensors.

Среди актуальных направлений современного материаловедения особо выделяется формирование композитных и многокомпонентных наноматериалов, в которых часто проявляются новые свойства [1-4]. Наноструктуры системы $\text{ZnO-Fe}_2\text{O}_3$ были получены модифициро-

ванием наностержней оксида цинка, синтезированных гидротермальным методом, в растворе соли железа [5]. Исследование морфологии поверхности и распределения поверхностного потенциала проводилось с использованием сканирующего зондового микроскопа NTEGRA ACADEMIA (NT-MDT, Россия). Для получения данных о топографии применялся полу-контактный режим атомно-силовой микроскопии, а для картирования поверхностных потенциалов – метод сканирующей зондовой микроскопии Кельвина.

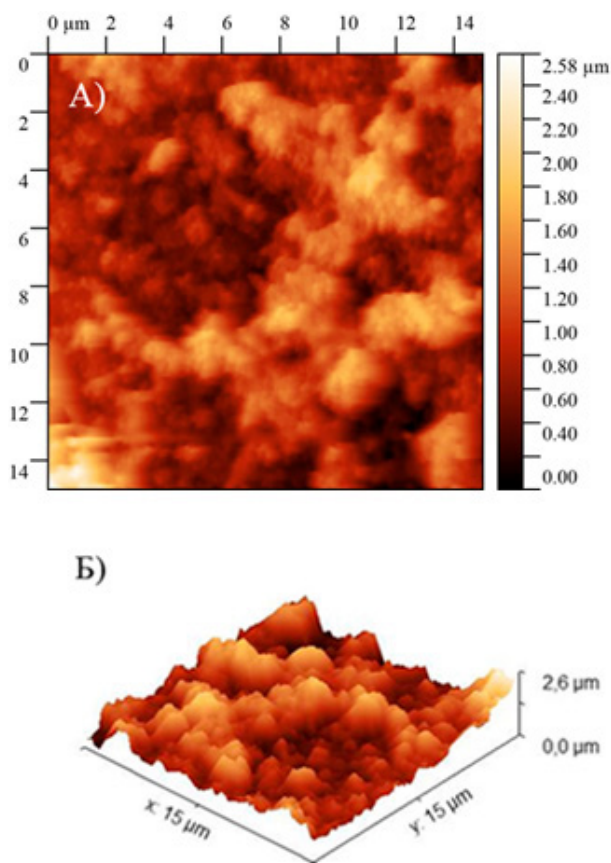


Рисунок 1 – Результаты исследования морфологии образца методом
АСМ

Данные атомно-силовой микроскопии (АСМ) свидетельствуют о формировании наноструктур феррита цинка с морфологией, напоминающей сеть (рисунок 1).

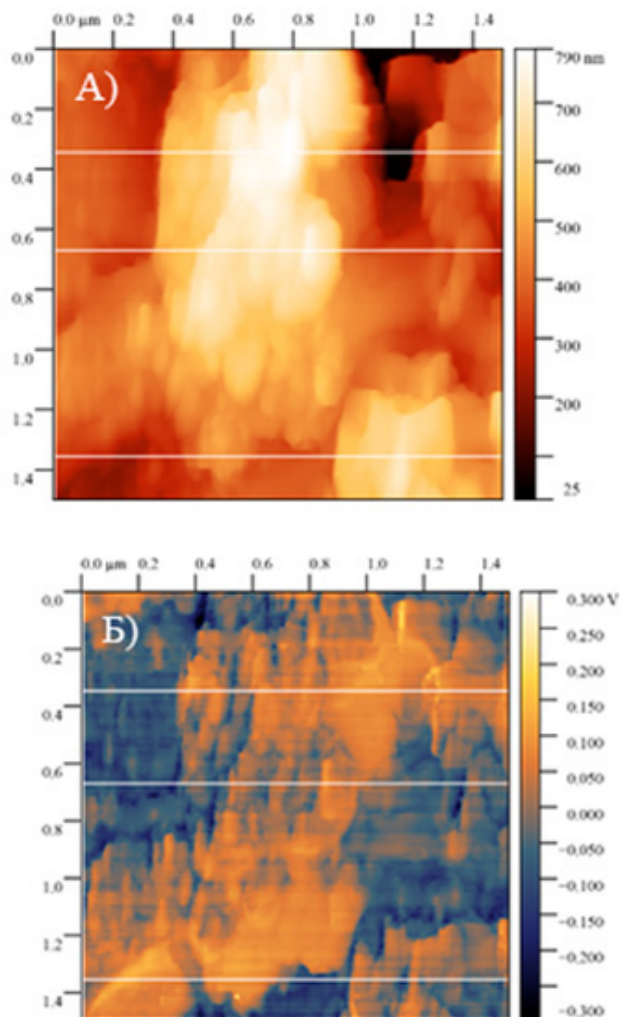


Рисунок 2 – Результаты исследования образца ZnO-Fe₂O₃ методом сканирующей зондовой микроскопии Кельвина

Результаты сканирующей Кельвин-зондовой микроскопии демонстрируют неоднородное распределение поверхностного потенциала с участками его резкой локализованной градации (рисунок 2). Наблюдаемая неоднородность потенциала может быть следствием частичного разложения феррита цинка на оксид цинка (ZnO) и оксид железа (Fe_2O_3). Формирование на границе раздела этих оксидов гетеропереходов способствует локальному перераспределению электрического заряда, что объясняется разницей значений работы выхода данных материалов, что наиболее актуально в геометрии наноархитектоники, когда интерфейс существует между двумя нанообъектами. При этом образуются локальные электрические поля, существенно изменяющие каталитические и сенсорные свойства [6,7].

Формирование гетерограниц $\text{ZnO-Fe}_2\text{O}_3$ представляет значительный интерес для разработки газовых сенсоров. В научной литературе имеются многочисленные указания на то, что создание гетеропереходов на основе оксида цинка с другими металлооксидами способствует существенному повышению чувствительности сенсорных элементов [8,9]. Исследование газочувствительных свойств синтезированных композитных наноструктур показало эффективность их применения для детектирования паров органических растворителей на примере изопропилового спирта при рабочей температуре 250°C [10].

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы доклада выражают свою благодарность сотрудникам Центра сканирующей зондовой микроскопии СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

ЛИТЕРАТУРА

1. Nenashev G.V., Istomina M.S., Kryukov R.S. [et al.] Effect of carbon dots concentration on electrical and optical properties of their composites with a conducting polymer // *Molecules*. 2022. Vol. 27. No. 22. P. 8000.
2. Moshnikov V.A., Gracheva I.E., Kuznezov V.V. [et al.] Hierarchical nanostructured semiconductor porous materials for gas sensors // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2010. Vol. 356. No. 37–40. P. 2020–2025.
3. Карпова С.С., Мошников В.А., Максимов А.И. [и др.] Исследование влияния кислотно-основных свойств поверхности оксидов ZnO , Fe_2O_3 и ZnFe_2O_4 на их газочувствительность по отношению к парам этанола //

Физика и техника полупроводников. 2013. т. 47. № 8. С. 1022–1026.

4. Налимова С.С., Максимов А.И., Матюшкин Л.Б. [и др.] Современное состояние исследований в области синтеза и применения стannата цинка // Физика и химия стекла. 2019. т. 45. № 4. С. 311–325.

5. Nalimova S.S., Shomakhov Z.V., Kondratev V.M. [et al.] Investigation of hierarchical gas-sensing ZnFe₂O₄ nanostructures // Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2023. Vol. 17. No. S1. P. S416–S422.

6. От нанотехнологии к наноархитектонике: сб. науч. тр. / под ред. Д.А. Козодаева. Уфа: Аэтерна, 2024.

7. Козодаев Д.А., Муратова Е.Н., Мошников В.А. От нанотехнологии к наноархитектонике // Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио. 2024. № 1 (79). С. 350–352.

8. Govind A., Bharathi P., Krishna Mohan M. [et al.] Highly sensitive near room temperature operable NO₂ gassensor for enhanced selectivity via nanoporous CuO@ZnO heterostructures // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2023. Vol. 11. No. 4. P. 110056.

9. Cheng L., Li Y., Sun G. [et al.] In-situ growth of CdS QDs on ZnO porous microrods for highly sensitive detection of TEA at lower temperature // Vacuum. 2023. Vol. 212. P. 112003.

10. Налимова С.С., Шомахов З.В., Герасимова К.В. [и др.] Газочувствительные композитные наноструктуры на основе оксида цинка для детектирования паров органических растворителей // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2022. № 14. С. 678–687.

УДК 654.739

ГРНТИ 49.33.29

ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОСТРУКТУР ДИСУЛЬФИДА МОЛИБДЕНА

Бузовкин С.С., Рыбина А.А.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова

В данной работе представлены результаты гидротермального синтеза дисульфида молибдена, а также результаты измерений сенсорных свойств полученных образцов при помощи спектроскопии импеданса. Сенсоры на основе дисульфида молибдена представляют интерес в связи с тем, что этот двумерный полупроводник позволяет увеличить площадь адсорбции детектируемого газа за счёт своего строения.

Ключевые слова: дисульфид молибдена, газочувствительные сенсоры, гидротермальный синтез, спектроскопия импеданса.

DIAGNOSTICS OF ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF THE NANOSTRUCTURE OF MOLYBDENUM DISULFIDE

Buzovkin S.S., Rybina A.A.

St. Petersburg Electrotechnical University «LETI» named after V. I. Ulyanov (Lenin)

This work presents the results of hydrothermal synthesis of molybdenum disulfide, as well as the results of measurements of the sensor properties of the obtained samples using impedance spectroscopy. Sensors based on molybdenum disulfide are of interest because this two-dimensional semiconductor allows for increased adsorption area of the detected gas due to its structure.

Keywords: molybdenum disulfide, gas-sensitive sensors, hydrothermal synthesis, impedance spectroscopy.

В последние годы получение и применение дихалькогенидов переходных металлов вызывает большой интерес благодаря их особой

2D-структуре, актуальной для полевых устройств, катализа, накопителей энергии, химических и биологических сенсоров и т.д. MoS_2 имеет слоистую структуру, подобную графену, с расстоянием между отдельными слоями, связанными силами Ван-дер-Ваальса, равным 0,62 нм. Такая структура обеспечивает электрические, химические, механические и оптические свойства, открывающие перспективы для создания новых полупроводниковых наноматериалов [1,2]. В частности, MoS_2 показывает селективную молекулярную адсорбцию, что открывает новые возможности для газочувствительных материалов.

Для получения 2D структур дисульфида молибдена был выбран гидротермальный синтез – как один из наиболее популярных и воспроизводимых методов. При выборе прекурсоров мы опирались на опыт в статье [3], поэтому были выбраны молибдат натрия 2-водный, щавелевая кислота и тиомочевина. Прекурсоры были смешаны в дистиллированной воде и после помещены в автоклав на 14 часов при температуре 200°C. После промывки и сушки образовавшегося осадка его диспергировали в изопропиловом спирте и наносили на подложки с электродами при помощи центрифугирования. Также была проведена эксфолиация полученного порошка при помощи раствора нитрата натрия и соляной кислоты. Порошок эксфолиированного дисульфида молибдена был также нанесен на подложки с электродами для измерения газочувствительности.

Для исследования газочувствительных свойств использовалась спектроскопия импеданса [4-8]. Измерения проводились в диапазоне частот 0,1кГц – 500кГц при переменном напряжении амплитудой 255 мВ. Сенсор, находившийся в плотно закрытой камере, подвергался воздействию потока воздуха с задаваемой концентрацией детектируемого газа в течение 5 минут перед измерением. В камере поддерживалась комнатная температура, а концентрация подаваемого газа 500 ppm, 1000 ppm, 2000 ppm задавалась при помощи ротаметра. Поскольку было выдвинуто предположение, что молекулы детектируемого газа не могут десорбироваться самостоятельно с поверхности датчика при комнатной температуре между циклами сенсор дополнительно подвергался отжигу при температуре 70°C в течение 5 минут. Полученные результаты измерений представлены на рисунках 1 и 2.

При измерениях образца, содержащего эксфолиированный дисульфид молибдена наблюдается вторая полуокружность, которая характеризует процесс переноса заряда через границы зерен. Первая полуокружность, которая есть на обоих графиках, характеризует перенос

заряда через объем зерен. Наличие второй полуокружности на рисунке 2 говорит о том, что повысилась площадь поверхности вследствие эксфолиации.

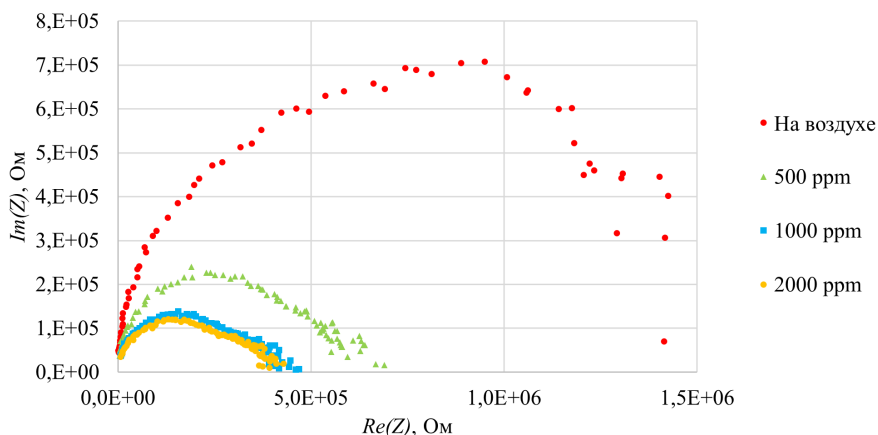


Рисунок 1 – Результаты измерения спектроскопии импеданса для образца дисульфида молибдена

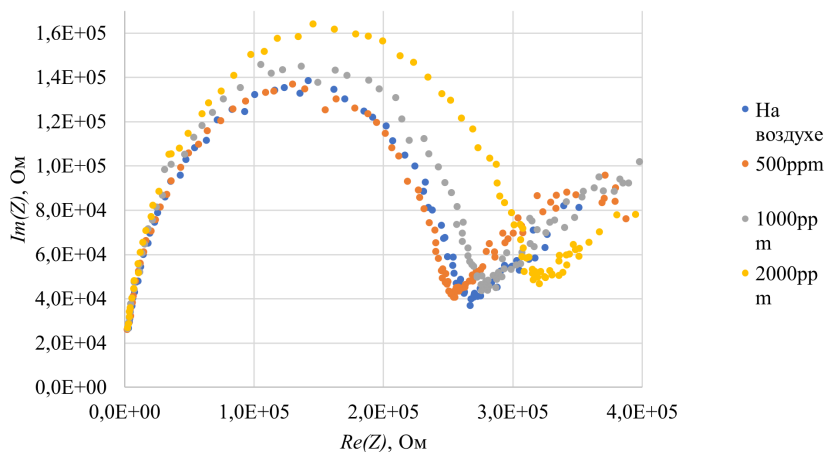


Рисунок 2 – Результаты измерения спектроскопии импеданса для образца эксфолиированного дисульфида молибден

ЛИТЕРАТУРА

1. Налимова С.С., Шомахов З.В., Морозова Н.А. [и др.] Газочувствительные свойства наноструктур дисульфида молибдена // Неорганические материалы. 2025. т. 61. № 1–2. С. 111–117.
2. Налимова С.С., Мошников В.А. Новые материалы наноархитектоники // Нано- и микросистемная техника. 2025. т. 27. № 2. С. 55–67.
3. Liang L., Mo Z., Li N. [et al.] Hydrothermal synthesis of the flower-like MoS₂ nanosheets microspheres and its photocatalytic degradation of methyl orange // Chalcogenide Letters. 2020. Vol. 17. No. 11. P. 555–563.
4. Ramohlola K.E., Iwuoha E.I., Hato M.J. [et al.] Instrumental techniques for characterization of molybdenum disulphide nanostructures // Journal of Analytical Methods in Chemistry. 2020. Vol. 2020. No. 1. P. 8896698.
5. Козодаев Д.А., Налимова С.С., Мошников В.А. Методы нанодиагностики, дополняющие результаты атомно-силовой микроскопии // От нанотехнологии к наноархитектонике: сб. науч. тр. Уфа, 2024. С. 91–167.
6. Буй К.Д., Налимова С.С., Шомахов З.В. [и др.] Покрытия из наностержней гетероструктуры ZnO/Zn₂SnO₄ для эффективного детектирования ацетона // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2024. № 16. С. 794–804.
7. Kondratiev V.M., Morozov I.A., Vyacheslavova E.A. [et al.] Silicon nanowire-based room-temperature multi-environment ammonia detection // ACS Applied Nano Materials. 2022. Vol. 5. No. 7. P. 9940–9949.
8. Bobkov A., Luchinin V., Moshnikov V. [et al.] Impedance spectroscopy of hierarchical porous nanomaterials based on por-Si, por-Si incorporated by Ni and metal oxides for gas sensors // Sensors. 2022. Vol. 22. No. 4. P. 1530.

УДК 681.586

ГРНТИ 29.17.35

ИМПЕДАНСНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СЛОЕВ НА ОСНОВЕ $g-C_3N_4$

Буй К.Д., Налимова С.С.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова

В исследовании предлагается применение импедансной спектроскопии в газовых сенсорах на основе двумерных материалов $g-C_3N_4$ на примере измерения концентрации паров изопропанола. Описан метод получения $g-C_3N_4$, заключающийся в термической поликонденсации мочевины с последующей эксфолиацией. Показано уменьшение сопротивления и изменение фазового угла с увеличением концентрации паров изопропилового спирта.

Ключевые слова: газовый сенсор, $g-C_3N_4$, импедансная спектроскопия, изопропанол.

IMPEDANCE SPECTROSCOPY OF GAS SENSITIVE LAYERS BASED ON $g-C_3N_4$

Bui C.D., Nalimova S.S.

St. Petersburg Electrotechnical University «LETI» named after V. I. Ulyanov (Lenin)

The study suggests the use of impedance spectroscopy in gas sensors based on two-dimensional $g-C_3N_4$ materials using the example of measuring the concentration of isopropanol vapors. A method for obtaining $g-C_3N_4$ is described, which consists in thermal polycondensation of urea followed by exfoliation. A decrease in resistance and a change in the phase angle with an increase in the vapor concentration of isopropyl alcohol are shown.

Keywords: gas sensor, $g-C_3N_4$, impedance spectroscopy, isopropanol.

В условиях возрастающих экологических проблем и критической потребности в высокоэффективных газовых сенсорах,

графитоподобный нитрид углерода ($g\text{-C}_3\text{N}_4$) представляет собой перспективный двумерный (2D) материал. Его уникальные полупроводниковые свойства и высокая удельная поверхность открывают значительный потенциал для применения в газовых сенсорах, преодолевая ограничения традиционных материалов [1]. Электрохимическая импедансная спектроскопия (ЭИС) является сверхчувствительным методом, позволяющим глубоко анализировать механизмы детектирования путём выявления малейших изменений на поверхности чувствительных слоёв [2-10]. С помощью ЭИС можно получить информацию о сопротивлении границ зёрен, объёмном сопротивлении и межфазном сопротивлении, что критически важно для оптимизации чувствительности, селективности и стабильности сенсоров нового поколения на основе $g\text{-C}_3\text{N}_4$. В данной работе представлены метод синтеза $g\text{-C}_3\text{N}_4$ и исследование газочувствительных свойств по спектрам импеданса.

Прекурсор (мочевина) был помещён в закрытый тигель и подвергнут термической поликонденсации в муфельной печи при 550 °С в течение 4 часов. Полученный жёлтый продукт промывался раствором HNO_3 , изопропанолом и дистиллированной водой до достижения нейтрального pH. Осадок сушили при 80 °С в течение 12 часов в воздушной атмосфере, получив чистый объёмный порошок $g\text{-C}_3\text{N}_4$.

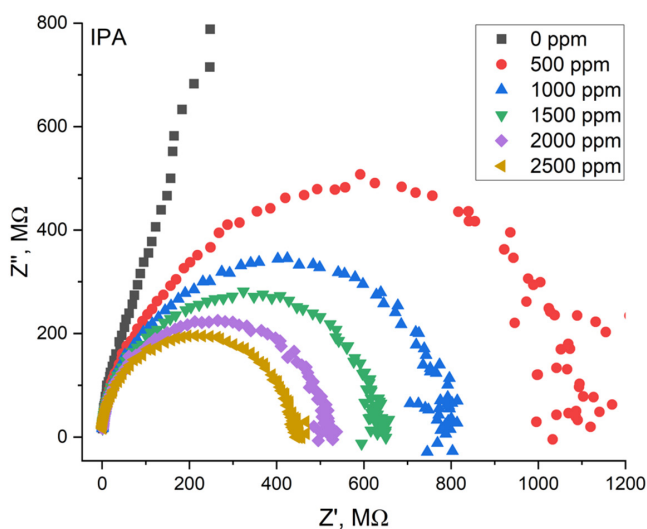


Рисунок 2 – Спектры импеданса $g\text{-C}_3\text{N}_4$

Порошок $g\text{-C}_3\text{N}_4$ диспергировали в воде с использованием ультразвуковой обработки для достижения частичной эксфолиации и получения стабильной коллоидной суспензии. Полученную суспензию равномерно нанесли на керамическую сенсорную платформу. Термообработка при 450°C обеспечила хорошую адгезию и сохранение структуры с формированием чувствительного элемента сенсора нанометровой толщины с высокой механической прочностью.

Спектры импеданса полученного слоя были исследованы с помощью прибора «Импеданс Z-500P». На рис. 1 представлены результаты измерения спектров импеданса при температуре работы 250°C и различных концентрациях изопропанола (IPA).

Результаты показывают характерное изменение формы круговой диаграммы с увеличением концентрации газа. С ростом концентрации IPA наблюдается уменьшение сопротивления и изменение фазового угла, что свидетельствует о повышении проводимости материала. Эквивалентная схема материала $g\text{-C}_3\text{N}_4$ может включать параллельную RC-цепь или модель Рэндлса для моделирования изменения импеданса при реакции материала с газом. Данные указывают на эффективное взаимодействие материала с изопропанолом, что может быть использовано для разработки чувствительных элементов газовых сенсоров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Буй К.Д., Налимова С.С., Нгуен В.Т.А. Графитоподобный нитрид углерода: свойства и применение в газовой сенсорике. Обзор // Конденсированные среды и межфазные границы. 2025. т. 27. № 2. С. 177–189.
2. Kondratev V.M., Vyacheslavova E.A., Shugabaev T. [et al.] Si Nanowire-Based Schottky Sensors for Selective Sensing of NH_3 and HCl via Impedance Spectroscopy // ACS Applied Nano Materials. 2023. Vol. 6. No. 13. P. 11513–11523.
3. Мошников В.А., Налимова С.С., Селезнев Б.И. Газочувствительные слои на основе фрактально-перколяционных структур // Физика и техника полупроводников. 2014. т. 48. № 11. С. 1535-1539.
4. Bobkov A., Luchinin V., Moshnikov V. [et al.] Impedance spectroscopy of hierarchical porous nanomaterials based on por-Si, por-Si incorporated by Ni and metal oxides for gas sensors // Sensors. 2022. Vol. 22. No. 4. P. 1530.
5. Nalimova S.S., Kononova I.E., Moshnikov V.A. [et al.] Investigation of the vapor-sensitive properties of zinc oxide layers by impedance spectroscopy

// Bulgarian Chemical Communications. 2017. Vol. 49. No. 1. P. 121–126.

6. Kondratiev V.M., Morozov I.A., Vyacheslavova E.A. [et al.] Silicon nanowire-based room-temperature multi-environment ammonia detection // ACS Applied Nano Materials. 2022. Vol. 5. No. 7. P. 9940–9949.

7. Налимова С.С., Шомахов З.В., Морозова Н.А. [и др.] Газочувствительные свойства наноструктур дисульфида молибдена // Неорганические материалы. 2025. т. 61. № 1–2. С. 111–117.

8. Козодаев Д.А., Налимова С.С., Мошников В.А. Методы нанодиагностики, дополняющие результаты атомно-силовой микроскопии // От нанотехнологии к наноархитектонике: сб. науч. тр. Уфа, 2024. С. 91–167.

9. Nenashev G.V., Aleshin A.N., Ryabko A.A. [et al.] Effect of barium doping on the behavior of conductivity and impedance of organic-inorganic perovskite films // Solid State Communications. 2024. Vol. 388. P. 115554.

10. Кедрук Е.Ю., Бобков А.А., Гриценко Л.В. [и др.] Исследование свойств оксида цинка методом импедансной спектроскопии // Физика и химия стекла. 2022. т. 48. № 2. С. 170–179.

ГИРИКОНД ЭКСПО

I Научно-практическая конференция
6 октября – 9 октября 2025 года

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

GIRIKOND EXPO

1st Scientific and Practical Conference
6 October – 9 October, 2025

PROCEEDINGS

SCIENTIFIC EDITION

Дизайн, вёрстка и корректура: организационный комитет
конференции «Гириконд ЭКСПО – 2025», confdocs@giricond.ru,
194223, г. Санкт-Петербург, ул. Курчатова, д.10

Подписано в печать 05.05.2026.

Печать: цифровая. Бумага: офсетная.

Формат: 60х90/16. Усл. печ. л.: 13,75. Гарнитура: Calibri.

Тираж 40 экз. Заказ № 123160.

Общество с ограниченной ответственностью «СИНЭЛ».

Отпечатано в типографии «СИНЭЛ».

197375, г. Санкт-Петербург, ул. Маршала Новикова, д. 28Е.

**ГИРИКОНД
ЭКСПО**
научно-практическая конференция



Контакты:

Адрес: 194223, Санкт-Петербург,
ул. Курчатова, 10
Телефон: +7 (812) 552-60-57
Email: 5526057@giricond.ru

www.giricond.ru



ISBN 978-5-6056392-1-3



9 785605 639213 >