

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

Объект авторского права
УДК 621.318.1/ 621.315.5

ПЕНЬЯЛОСА
Овальес Дейвис Исаиас

**КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ОКСИДОВ
АЛЮМИНИЯ И ЖЕЛЕЗА ДЛЯ ЗАЩИТЫ СВЧ УСТРОЙСТВ
ОТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.27.06 – Технология и оборудование для производства
полупроводников, материалов и приборов электронной техники

Минск 2023

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

Научный руководитель: **Тумилович Мирослав Викторович**, доктор технических наук, доцент, начальник управления подготовки научных кадров высшей квалификации учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Официальные оппоненты: **Мухуров Николай Иванович**, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией микро- и наносенсорики Государственного научно-производственного объединения «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» Национальной академии наук Беларуси

Насонова Наталья Викторовна, доктор технических наук, доцент, начальник научно-исследовательской лаборатории научно-внедренческого частного унитарного предприятия «НИИВТЭК»

Оппонирующая организация: Белорусский национальный технический университет

Защита диссертации состоится «01» июня 2023 г. в 14:00 часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.03 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, e-mail: dissovet@bsuir.by, тел.+375 17 293 89 89.

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

Автореферат разослан «28» 04 2023 г.

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



Г.А. Пискун

ВВЕДЕНИЕ

Развитие приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности в значительной степени зависит от своевременного создания и практического применения новых материалов и изделий на их основе, обладающих улучшенными эксплуатационными характеристиками по сравнению с известными и традиционно используемыми материалами. Среди данных направлений можно отметить актуальность разработки средств, обеспечивающих снижение радиолокационной заметности различных объектов электроники путем создания радиопоглощающих материалов, покрытий и экранов на их основе, эффективно ослабляющих и поглощающих электромагнитные излучения в СВЧ – диапазоне (0,5 ГГц – 30 ГГц) (электромагнитных экранов). Широкое внедрение приборов электронной техники (ПЭТ) в различные сферы человеческой деятельности приводит к возрастанию уровня электромагнитных полей, создаваемых ими в окружающем пространстве. Эти поля являются помехами для других подобных устройств, ухудшая условия функционирования и снижая эффективность их применения.

Для создания электромагнитных экранов часто применяются композиционные, в том числе многослойные структуры с проводящими наполнителями в виде тонких и толстых пленок, фольг, волокон и/или порошков, которые представляют собой гетерогенные радиопоглощающие среды и характеризуются низкими значениями коэффициентов передачи и отражения электромагнитного излучения (ЭМИ). Композиционные материалы с наполнителями в виде порошков представляются более предпочтительными для применения по сравнению с наполнителями из волокон. Это связано с большей технологичностью порошкообразных материалов по сравнению с волокнами (обеспечивается более равномерное и быстрое распределение порошков по объему связующих компонентов при формировании композиций). Однако применяемые в настоящее время порошкообразные наполнители (шунгит, графит, графен) характеризуются высокой стоимостью по сравнению с порошкообразными материалами на основе минерального сырья.

В связи с этим актуальной научной задачей является проведение исследований, направленных на создание радиопоглощающих композиционных материалов для электромагнитных экранов на основе порошкообразных наполнителей, предназначенных для защиты СВЧ устройств от электромагнитного излучения. Перспективными объектами таких исследований в рамках решения данной задачи представляются порошкообразные оксиды природного происхождения на основе алюминия и железа в связи с тем, что эти материалы являются природными минералами и характеризуются невысокой стоимостью.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Тема диссертационной работы утверждена приказом ректора учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» № 736-о от 30.12.2016 г. и соответствует подразделам 5 «Информатика и космические исследования» и 8 «Многофункциональные материалы и технологии» приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2016 – 2020 гг., утвержденных Постановлением Совета Министров Республики Беларусь 12.03.2015 № 190, а также разделу 4 «Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы» пункту «Композиционные и многофункциональные материалы» перечня приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности Республики Беларусь на 2021 – 2025 гг., утвержденного Указом Президента Республики Беларусь от 07.05.2020 г. № 156.

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Цель диссертационной работы заключается в исследовании закономерностей взаимодействия электромагнитного излучения с композиционными материалами, содержащими порошкообразные оксиды различного состава (алюмооксиды, оксиды железа) и разработке на основе результатов исследования технологических маршрутов изготовления электромагнитных экранов и радиопоглощающих покрытий для защиты СВЧ устройств от электромагнитного излучения.

Для достижения данной цели потребовалось решить следующие задачи:

1. На основе анализа литературных источников и патентной информации обосновать возможность использования порошкообразных алюмооксидов, оксидов железа и ферритов для создания электромагнитных экранов или их элементов.

2. Исследовать характеристики отражения и передачи электромагнитного излучения композиционных материалов, содержащих порошкообразные алюмооксиды, оксиды железа и ферриты, а также установить зависимости указанных характеристик от их состава.

3. Экспериментально обосновать и разработать метод получения композиционных покрытий на основе алюмооксидов, оксидов железа и водоземulsionных составов, а также способ модификации состава композиционных материалов на их основе для повышения радиопоглощающих свойств данных покрытий.

4. Разработать технологические маршруты изготовления радиопоглощающих композиционных материалов на основе порошкообразных алюмооксидов, оксидов железа и ферритов для электромагнитных экранов, а также композиционных покрытий, содержащих порошкообразные алюмооксиды и модифицирующие составы таких покрытий компоненты (порошкообразный оксид железа и фрагменты фольгированных материалов) для защиты СВЧ-устройств от электромагнитного излучения.

Объект исследования – композиционные материалы и электромагнитные экраны на основе порошкообразных алюмооксидов и оксидов железа.

Предметом исследования являются закономерности взаимодействия электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с электромагнитными экранами на основе порошкообразных алюмооксидов и оксидов железа в зависимости от состава таких экранов.

Научная новизна

1. Исследованы закономерности изменения характеристик отражения и передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7–17,0 ГГц порошкообразных алюмооксидов (электрокорунд, глинозем на основе α - Al_2O_3), пропитанных водой или водными растворами электролитов (CaCl_2) и показано, что добавление в состав порошкообразных алюмооксидов воды или водного раствора обуславливает снижение на 2,0 – 5,0 дБ коэффициента передачи электромагнитного излучения в диапазоне частот 12,0 – 17,0 ГГц и снижение на 1,0 – 4,0 дБ коэффициента отражения в диапазонах частот 6,0 – 9,5 ГГц и 12,5 – 17,0 ГГц, что обусловлено увеличением удельной электропроводности этих материалов.

2. Установлены закономерности изменения характеристик отражения и передачи электромагнитного излучения в диапазоне частот 0,7 – 17,0 ГГц композиционных материалов на основе ферритов (химический состав близкий к формуле $\text{BaO} \cdot 6 \text{Fe}_2\text{O}_3$) при добавлении в их состав порошкообразных алюмооксидов (соотношение алюмооксид : ферриты – 30,0 об.% : 20,0 об.%) и показано, что добавлением алюмооксидов в композиционные материалы на основе порошкообразных железо-бариевых ферритов можно обеспечить снижение на 2,0 – 7,0 дБ коэффициента отражения электромагнитного излучения в диапазонах частот 0,7 – 2,0 ГГц и 8,0 – 11,0 ГГц, регистрируемого при условии нанесения таких материалов на металлические подложки, и снижение на 1,0 – 10,0 дБ их коэффициента передачи в диапазоне частот 0,7 – 17 ГГц, что обусловлено снижением волнового сопротивления таких материалов.

3. Предложен и экспериментально подтвержден метод улучшения экранирующих свойств композиционных материалов и покрытий для электромагнитных экранов на основе порошкообразных алюмооксидов (электрокорунд, глинозем), основанный на модификации их состава путем добавления в него

порошкообразного оксида железа. Установлено, что путем добавления до 20 об.% порошкообразного оксида железа (Fe_2O_3) в состав композиционных материалов и покрытий на основе порошкообразных алюмооксидов за счет явления естественного ферромагнитного резонанса, связанного с магнитными свойствами порошкообразного оксида железа, можно обеспечить снижение на 1,0 – 8,0 дБ значений их коэффициента передачи электромагнитного излучения в диапазоне частот 0,7 – 17,0 ГГц.

Положения, выносимые на защиту

1. Экспериментально установленные закономерности изменения характеристик отражения и передачи электромагнитного излучения композиционных материалов на основе порошкообразных алюмооксидов, пропитанных водой или водными растворами электролитов (CaCl_2), на основе которых впервые разработаны маршруты технологических процессов изготовления электромагнитных экранов из данных материалов, обеспечивающих снижение на 2,0 – 5,0 дБ коэффициента передачи в диапазоне частот 12,0 – 17,0 ГГц и снижение на 1,0 – 4,0 дБ коэффициента отражения в диапазонах частот 6,0 – 9,5 ГГц и 12,5 – 17,0 ГГц, а также снижение коэффициента отражения от -2,0 до -18,0 дБ в диапазоне частот 0,7 – 17,0 ГГц при условии закрепления таких экранов на металлических подложках, что позволяет использовать их для защиты помещений, используемых для настройки или тестирования СВЧ устройств.

2. Установленные зависимости изменения характеристик отражения и передачи электромагнитного излучения композиционных материалов на основе железо-бариевых ферритов при добавлении в их состав порошкообразных алюмооксидов (соотношение алюмооксид : ферриты – 30 об.% : 20 об.%), с использованием которых разработаны маршруты технологических процессов получения электромагнитных экранов, характеризующихся по сравнению с электромагнитными экранами из железо-бариевых ферритов пониженными не более, чем на 10,0 дБ значениями коэффициентов отражения и передачи в диапазоне частот 0,7 – 17,0 ГГц, а также в 1,5 раза более низкой массой на единицу площади, что позволяет использовать такие экраны для обеспечения электромагнитной совместимости СВЧ устройств.

3. Разработанные электромагнитные экраны на основе композиционных материалов и покрытий, содержащих порошкообразные алюмооксиды и модифицирующие состав таких материалов и покрытий компоненты (порошкообразный оксид железа), характеризующиеся снижением коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения от -2,0 до -18,0 дБ и от -10,0 до -30,0 дБ соответственно и обеспечивающие за счет этого снижение до 2 раз дальности распространения электромагнитного излучения СВЧ устройств в воздушной среде.

Личный вклад соискателя ученой степени

Содержание диссертации отражает личный вклад автора. Все основные результаты, изложенные в диссертационной работе, получены соискателем самостоятельно или при непосредственном участии в проведении экспериментов по разработке электромагнитных экранов и изучению их свойств. В совместно опубликованных работах автору принадлежит определение целей и постановка задач исследования, выбор методов исследования, а также обработка, анализ и интерпретация полученных результатов, формулировка выводов.

Определение цели и задач исследований, интерпретация и обобщение полученных результатов проводились с научным руководителем, доктором технических наук, доцентом М.В. Тумиловичем, а также с доктором технических наук, профессором Л.М. Лыньковым, который принимал участие в планировании работ и обсуждении результатов. Совместно с кандидатом технических наук, доцентом О.В. Бойправ, кандидатом технических наук, доцентом Т.А. Пулко, кандидатом технических наук Х.А.Э. Айад разрабатывались элементы электромагнитных экранов. Доктор технических наук, доцент А.В. Гусинский и кандидат технических наук П. И. Балтрукович принимали участие в обсуждении результатов исследований влияния электромагнитных экранов на основе порошкообразных алюмооксидов на снижение энергии электромагнитного излучения приборов электронной техники. Магистрант Г.С. Паскробка проводил измерения коэффициентов отражения и передачи электромагнитных экранов.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные положения и результаты диссертации обсуждались на XV, XVII и XIX Белорусско-российских научно-технических конференциях «Технические средства защиты информации» (Минск, Республика Беларусь, 2017, 2019, 2021 гг.), 13-ой и 15-ой Международных научно-технических конференциях «Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка» (Минск, Республика Беларусь, 2018, 2022 гг.).

Опубликование результатов диссертации

По результатам исследований, представленных в диссертации, опубликовано 14 научных работ общим объемом 5,04 авторского листа, в том числе 3 статьи в журналах из Перечня ВАК Республики Беларусь объемом 1,43 авторского листа, 5 статей в других рецензируемых изданиях общим объемом 2,59 авторского листа, 2 статьи в сборнике материалов конференций объемом 0,68 авторского листа, 3 тезиса доклада объемом 0,34 авторского листа. Получен патент Республики Беларусь на полезную модель.

Структура и объем диссертации

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

Общий объем диссертационной работы составляет 150 страниц, из которых 69 страниц текста, 68 рисунков на 58 страницах, 4 таблицы на 4 страницах, библиографический список из 102 источников и 15 собственных публикаций автора на 11 страницах, 3 приложения на 5 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе на основе анализа литературных источников и патентной информации рассмотрены основные требования, предъявляемые к экранам электромагнитного излучения, обозначены области применения таких экранов, их основные виды и методы получения. Проведен анализ источников и рецепторов электромагнитных помех, рассмотрены основные принципы взаимодействия материалов экранов с электромагнитным излучением, основные виды радиоэкранирующих и радиопоглощающих материалов и покрытий, принципы работы и пути совершенствования электромагнитных экранов. Показано, что экраны ЭМИ находят все большее применение в решении проблем обеспечения экологической безопасности жизнедеятельности человека и в космической сфере, радиоэлектронике, физико-технических и специализированных системах обеспечения информационной безопасности, а также электромагнитной совместимости в системах различного назначения.

Рассмотрены основные виды материалов, используемых для создания экранов электромагнитного излучения, а также способы их получения. Рассмотрены основные требования, предъявляемые к экранам. Показано, что для ослабления ЭМИ могут применяться разнообразные порошкообразные и композиционные материалы на органической и неорганической основе с различными органическими и керамическими наполнителями, в том числе оксидосодержащими и ферритосодержащими, позволяющие получать изделия с заданным комплексом диэлектрических, проводящих и магнитных свойств. Еще одним достоинством таких материалов является обеспечение возможности их изготовления на гибком или жестком основании, что позволяет использовать их в современных электромагнитных экранах. На основе проведенного аналитического обзора определена цель и сформулированы задачи исследований.

Во второй главе представлены основные методики проведения исследований. Определение коэффициентов передачи и отражения электромагнитных экранов в диапазоне частот 0,7 – 17 ГГц производили с помощью панорамного измерителя коэффициентов передачи и отражения SNA 0,01–18 (производитель

– Центр 1.9 НИЧ БГУИР), работающего по принципу отдельного выделения и непосредственного детектирования уровней падающей и отраженной волн, и состоящего из генератора качающейся частоты (блок ГКЧ), блока обработки измерительных сигналов, передающей и приемной рупорных антенн П6-23М, блоков направленных ответвителей (блоки В и А/Р), соединенных с каналами блока обработки измерительных сигналов и антеннами (рисунок 1).

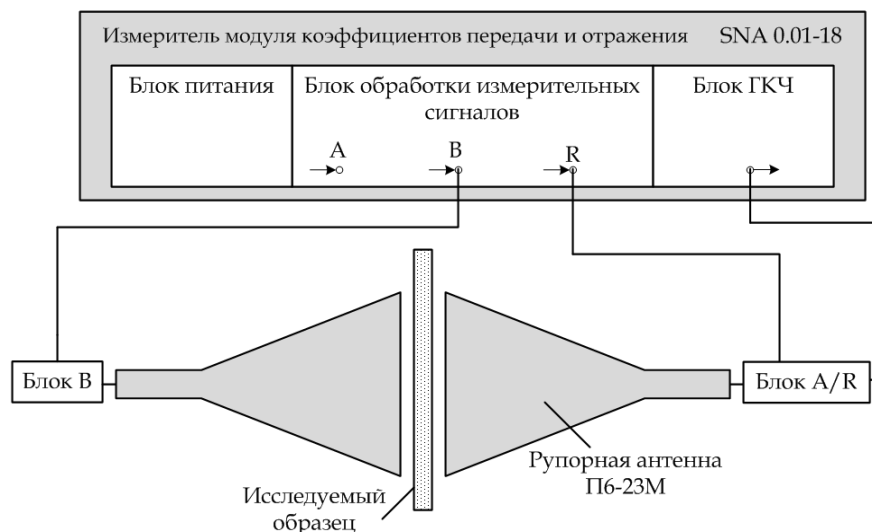


Рисунок 1 – Схема измерения коэффициента передачи электромагнитных экранов с помощью измерительной установки SNA 0,01–18

На основе результатов измерений ослабления ЭМИ (А) и коэффициента стоячей волны (КСВН) образцов выполнялись расчеты коэффициентов передачи (S_{21}) и отражения (S_{11}) по формулам (1) и (2):

$$S_{21} = -A, \text{ дБ}; \quad (1)$$

$$S_{11} = 20 \log \left(\frac{КСВН - 1}{КСВН + 1} \right), \text{ дБ} \quad (2)$$

Оценка влияния материалов на уровень электромагнитного излучения ПЭТ производилась путем фиксирования факта нераспространения электромагнитного излучения за пределы образцов электромагнитных экранов. Особенность этого прибора состоит в том, что в него входят светодиоды, которые предназначены для индикации генерирования и распространения зондирующего радиосигнала.

Также в главе 2 представлена методика расчета дальности распространения электромагнитного излучения ПЭТ, неэкранированного и экранированного с помощью экспериментального образца электромагнитного экрана.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований взаимодействия композиционных материалов на основе порошкообразных оксидов и ферритов с электромагнитным излучением с целью совершенствования электромагнитных экранов.

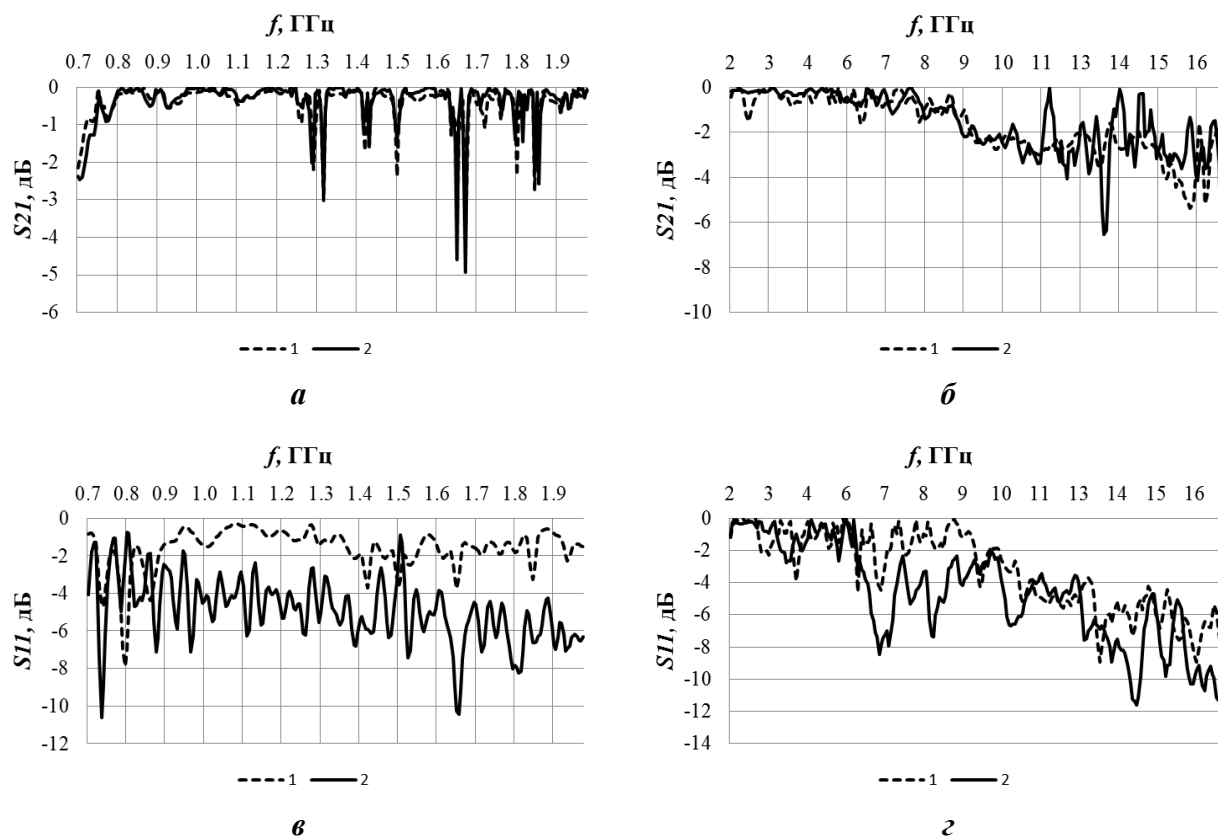
Проведенные экспериментальные исследования коэффициентов передачи и отражения ЭМИ позволили выбрать для создания композиционных материалов и покрытий следующие: порошкообразные алюмооксиды (электрокорунд и глинозем, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$); порошкообразный оксид железа (гематит – Fe_2O_3), а также порошкообразный феррит бария (химический состав близок к формуле $\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$). Это связано с диэлектрическими свойствами порошкообразных алюмооксидов, что обусловлено большим процентным содержанием в их составе $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (до 93 – 96 масс. %). Отличительной особенностью электрокорунда по сравнению с рядом других диэлектриков, применяемых в системах электромагнитного экранирования, является то, что он представляет собой неорганический антиперен, который используется в качестве самостоятельного огнезащитного средства. Состав глинозема близок к составу электрокорунда, однако по сравнению с ним имеет более низкую стоимость и является более широко распространенным, так как является природным минералом (составная часть глин). Кроме того, данные материалы имеют невысокую стоимость, доступны, способны работать в условиях повышенных температур, что имеет важное значение при создании электромагнитных экранов. Оксиды железа обладают ферромагнитными свойствами и являются материалом природного происхождения с низкой стоимостью. Ферриты бария, кроме применения в качестве постоянных магнитов, благодаря своим диэлектрическим свойствам и высокому удельному сопротивлению можно использовать для работы на частотах до сотен МГц и даже ГГц без больших потерь на вихревые токи.

Указанные порошкообразные материалы в настоящей работе использовались как в качестве пористого каркаса-матрицы для последующего введения в нее специального наполнителя (древесного угля, воды), так и в качестве материалов для композиционного покрытия, предназначенного для снижения значений коэффициентов отражений электромагнитных экранов.

Измерения характеристик ослабления и отражения ЭМИ проводили в диапазоне частот 0,7 – 17 ГГц. Результаты измерения зависимости коэффициентов передачи от частоты для образцов из порошкообразного электрокорунда, в том числе содержащих воду, представлены на рисунке 2. Видно, что коэффициент передачи остается неизменным в диапазоне 0,7 – 11,41 ГГц. Превышение этого диапазона приводит к существенному увеличению коэффициента передачи в образцах, не содержащих воду, по отношению к тем, что содержат воду.

Результаты измерения зависимости коэффициентов отражения от частоты для порошкообразных материалов на основе электрокорунда показаны на ри-

сунке 3. Видно, что в диапазоне 0,7 – 2,0 ГГц коэффициент отражения изменяется до -5,0 дБ, а в диапазоне 2 – 17 ГГц – до -7,8 дБ. Наиболее эффективным является добавление воды к порошкообразному электрокорунду, что приводит к снижению коэффициента отражения в диапазоне частот от 5,9 до 9,4 ГГц.

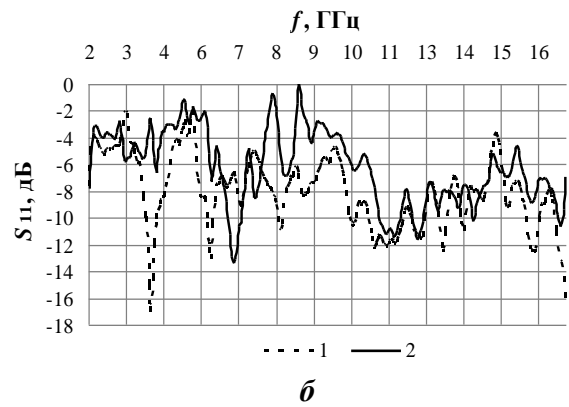
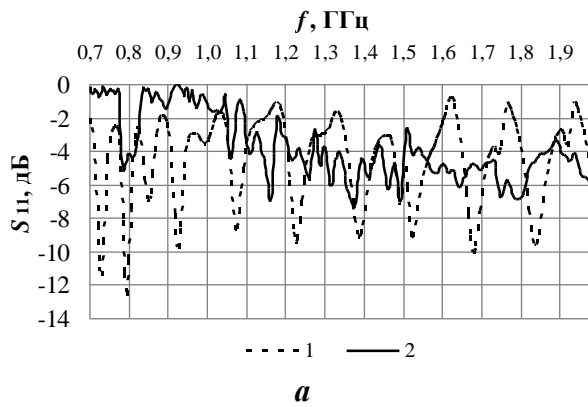


1 – образцы, не содержащие воду, 2 – образцы, содержащие воду

Рисунок 2 – Частотные зависимости коэффициентов отражения (а, б) и передачи (в, г) порошкообразного электрокорунда в диапазонах 0,7 – 2 ГГц (а, в) и 2 – 17 ГГц (б, г)

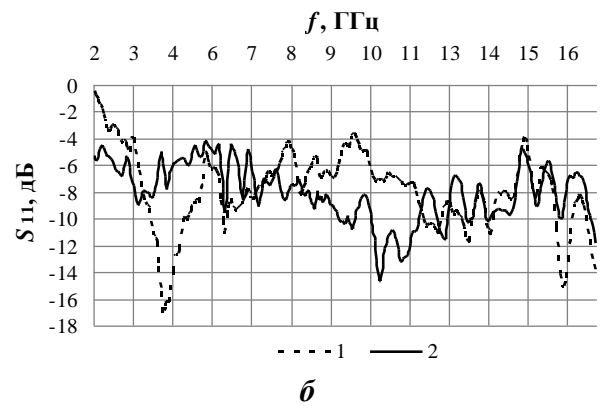
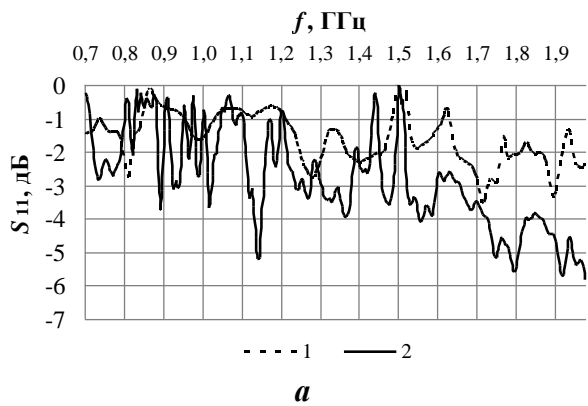
Исследовано влияние добавления порошкообразных алюмооксидов (электрокорунд, глинозем) в состав ферритов на характеристики отражения и передачи ЭМИ. В результате установлено, что порошкообразный электрокорунд представляется рациональным для повышения эффективности электромагнитных экранов на основе порошкообразных железо-бариевых ферритов. Частотные зависимости коэффициентов отражения и передачи ЭМИ изготовленных образцов электромагнитных экранов представлены на рисунках 3 – 5.

Измерения коэффициента отражения ЭМИ образцов выполнялись в двух режимах: в режиме согласованной нагрузки (образец размещался между передающей антенной и согласованной нагрузкой) и в режиме короткого замыкания (образец закреплялся на металлической подложке, т. е. фактически располагался между передающей антенной и металлической подложкой).



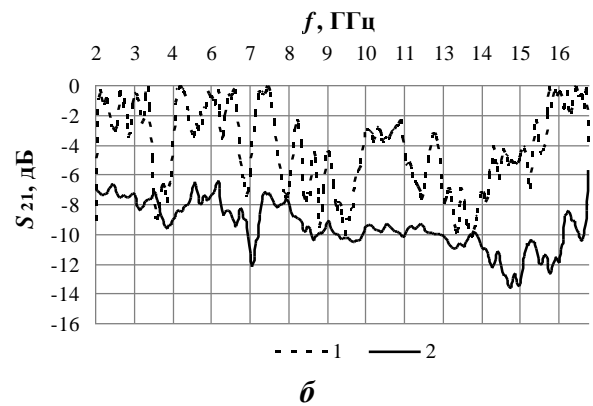
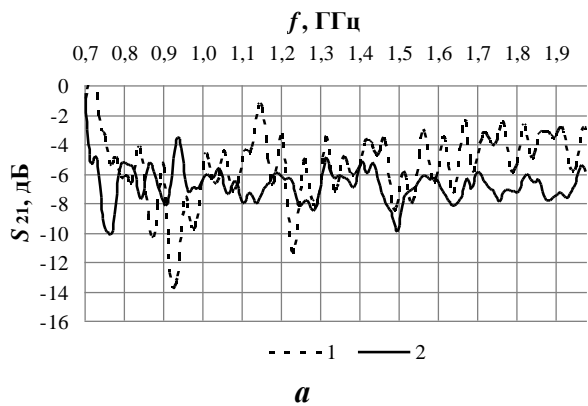
1 – образцы на основе порошкообразного железо-бариевого феррита, 2 – образцы на основе смеси железо-бариевого феррита и порошкообразного электрокорунда

Рисунок 3 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7 – 2 ГГц (а) и 2 – 17 ГГц (б)



1 – образцы, на основе порошкообразного железо-бариевого феррита, закрепленные на металлических подложках, 2 – образцы на основе смеси железо-бариевого феррита и порошкообразного электрокорунда, закрепленные на металлических подложках

Рисунок 4 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7 – 2 ГГц (а) и 2 – 17 ГГц (б)



1 – образцы на основе порошкообразного железо-бариевого феррита, 2 – образцы на основе смеси железо-бариевого феррита и порошкообразного электрокорунда

Рисунок 5 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7 – 2 ГГц (а) и 2 – 17 ГГц (б)

Сравнительный анализ представленных на рисунках 3–5 результатов позволяет сделать вывод о том, что в результате добавления порошкообразного электрокорунда в состав экранов можно обеспечить снижение на 2 – 7 дБ их коэффициента отражения ЭМИ в диапазонах частот 0,7 – 2 ГГц и 8 – 11 ГГц, регистрируемого при условии их закрепления на металлических подложках, и снижение на 1 – 10 дБ их коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7 – 17 ГГц (исключая частоты 0,85, 0,95 и 1,25 ГГц). Добавление же порошкообразного электрокорунда в состав электромагнитных экранов на основе порошкообразных железо-стронциевых и железо-титановых ферритов приводит к ухудшению эффективности этих экранов.

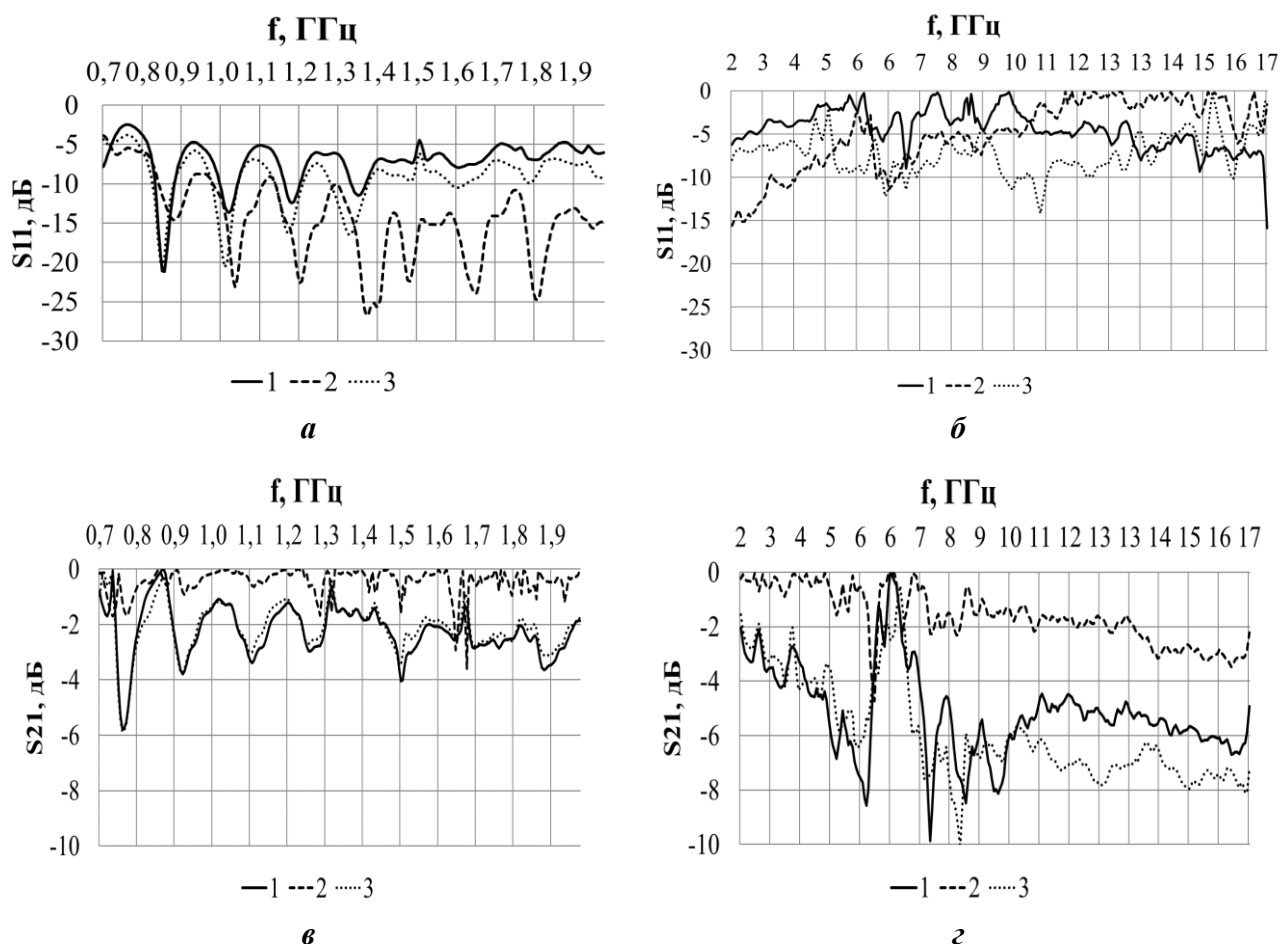
Исследован и экспериментально обоснован способ улучшения экранирующих и радиопоглощающих свойств композиционных покрытий на основе порошкообразных алюмооксидов (электрокорунд, глинозем), основанный на модификации состава таких покрытий путем добавления в него порошкообразных материалов, характеризующихся ферромагнитными свойствами (в частности, порошкообразного оксида железа (Fe_2O_3)). Его выбор обусловлен более низкой стоимостью по сравнению с аналогами. Указанное преимущество порошкообразного оксида железа по сравнению с другими материалами, характеризующимися магнитными свойствами, связано с тем, что он является материалом природного происхождения.

Проведены экспериментальные исследования следующих образцов композиционных покрытий для гибких электромагнитных экранов, нанесенных на целлюлозную подложку слоем толщиной 3,0 мм:

- на основе порошкообразного электрокорунда, оксида железа и водного щелочного раствора силиката натрия (образец «1»);
- покрытие на основе порошкообразного электрокорунда и водного щелочного раствора силиката натрия (образец «2»);
- на основе порошкообразного оксида железа и водного щелочного раствора силиката натрия (образец «3»).

На рисунке 6 приведены частотные зависимости коэффициентов отражения и передачи ЭМИ в диапазоне 0,7 – 17,0 ГГц изготовленных образцов «1» (кривые 1), «2» (кривые 2) и «3» (кривые 3).

Сравнительный анализ представленных на рисунке 6 результатов позволяет сделать следующие выводы. В результате добавления порошкообразного оксида железа в состав композиционного покрытия, наполнителем которого является порошкообразный алюмооксид (электрокорунд, глинозем), можно обеспечить снижение на 1,0 – 8,0 дБ коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7 – 17,0 ГГц такого покрытия, что обусловлено увеличением на 1,0 – 15,0 дБ коэффициента отражения ЭМИ.



1 – образец «1», 2 – образец «2», 3 – образец «3»

Рисунок 6 – Частотные зависимости коэффициента отражения (а, б) и передачи (в, г) ЭМИ в диапазонах 0,7 – 2,0 ГГц (а, в) и 2,0 – 17,0 ГГц (б, г) для разработанных образцов

Увеличение коэффициента отражения в результате добавления в состав такого покрытия порошкообразного оксида железа связано с увеличением его волнового сопротивления в связи с тем, что относительная магнитная проницаемость порошкообразного оксида железа больше 1.

В диапазонах частот 0,7 – 14,0 ГГц и 16,0 – 16,5 ГГц значения коэффициента отражения ЭМИ композиционного покрытия, наполнителем которого является смесь порошкообразных алюмооксида и оксида железа, на 1,0 – 8,0 дБ превышают значения коэффициента отражения композиционного покрытия, наполнителем которого является порошкообразный оксид железа.

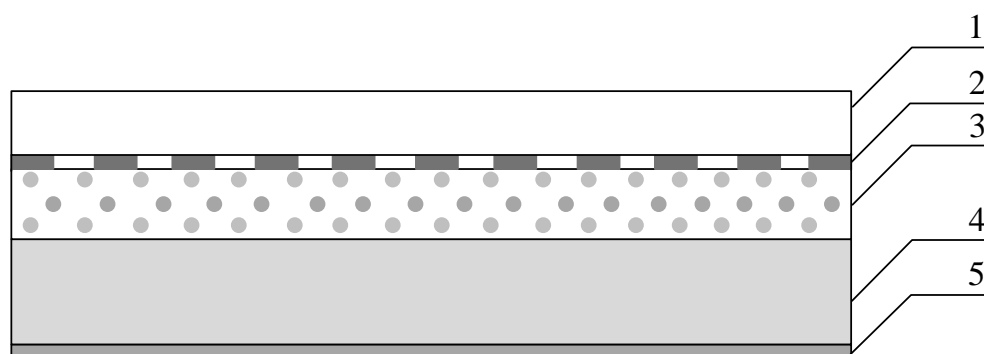
В диапазонах частот 14,0 – 16,0 ГГц и 16,5 – 17,0 ГГц значения коэффициента отражения ЭМИ композиционного покрытия, наполнителем которого является смесь порошкообразных алюмооксида и оксида железа, на 1,0 – 8,0 дБ ниже, чем значения коэффициента отражения композиционного покрытия, наполнителем которого является порошкообразный оксид железа. Это может быть обусловлено тем, что электромагнитные волны указанных диапазонов ча-

стот, рассеянные частицами смеси порошкообразных алюмооксида и оксида железа, характеризуются фазой, отличной от фазы электромагнитной волны, отраженной от границы раздела «воздух – композиционное покрытие». В связи с этим в результате взаимодействия отраженной волны с рассеянными волнами происходит уменьшение ее амплитуды.

Значения коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7 – 10,0 ГГц композиционного покрытия, наполнителем которого является смесь порошкообразных алюмооксида и оксида железа, практически схожи со значениями аналогичного параметра, характерными для композиционного покрытия, наполнителем которого является порошкообразный оксид железа.

В диапазоне частот 10,0 – 17,0 ГГц значения коэффициента передачи ЭМИ композиционного покрытия, наполнителем которого является смесь порошкообразных алюмооксида и оксида железа, превышают в среднем на 3,0 дБ значения коэффициента передачи композиционного покрытия, наполнителем которого является порошкообразный оксид железа. Это можно связать с возрастанием разности между величиной потерь энергии ЭМИ, связанных с его распространением во втором из указанных покрытий, и величиной этих потерь энергии, связанных с его распространением в первом из указанных покрытий.

На рисунке 7 представлена схема многослойного электромагнитного экрана, изготовленного в соответствии с разработанной методикой. Он состоит из слоя 1, полученного путем механического перемешивания в объемном соотношении 1,0:1,0 порошкообразного алюмооксида и связующего состава (на основе водного щелочного раствора силиката натрия, водоэмульсионной краски или гипсового раствора), слоя на основе фрагментов металлизированной полиэтиленовой пленки 2, слоя на основе композиционного материала 3, наполнителем которого является порошкообразный алюмооксид, а связующим веществом – указанные выше составы, подложки из текстильного, трикотажного или целлюлозного материала 4, слоя на основе металлизированной полиэтиленовой пленки 5.



1, 2, 3, 4, 5 - слои электромагнитного экрана

Рисунок 7 – Схема многослойного электромагнитного экрана из композиционного материала на основе порошкообразных алюмооксидов

В четвертой главе приведены разработанные схемы технологических (лабораторных) маршрутов получения: 1) трудновоспламеняемых композиционных покрытий на основе алюмооксидов; 2) трудновоспламеняемых многослойных электромагнитных экранов на основе порошкообразных алюмооксидов; 3) трудновоспламеняемых композиционных покрытий на основе порошкообразных алюмооксидов с модифицированным составом для создания электромагнитных экранов с использованием фрагментов металлизированной пленки или порошкообразного оксида железа. Так, технологический маршрут модификации состава покрытий с использованием оксида железа включает:

- смешивание порошкообразного алюмооксида (электрокорунд, глинозем) с порошкообразным оксидом железа и связующим веществом (водоэмульсионная краска, водный щелочной раствор силиката натрия или гипсовый раствор) в оптимальном объемном соотношении 3,0:2,0:5,0;

- добавление связующего вещества (водоэмульсионная краска, водный щелочной раствор силиката натрия или гипсовый раствор) в смесь порошкообразных алюмооксида и оксида железа;

- равномерное распределение частиц смеси порошкообразных алюмооксида и оксида железа по объему добавленного к ней связующего вещества с помощью лабораторного миксера;

- нанесение слоя полученной смеси на поверхность подложки;

- высушивание слоя смеси, нанесенной на поверхность подложки;

- контроль толщины слоя смеси с помощью электронного штангенциркуля;

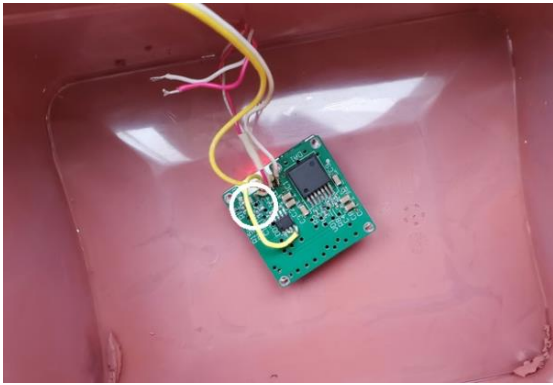
- при необходимости наращивание толщины слоя смеси путем повторной реализации соответствующих этапов.

Также приведены результаты экспериментального обоснования возможности использования электромагнитных экранов на основе разработанных материалов для защиты ПЭТ от распространения ЭМИ.

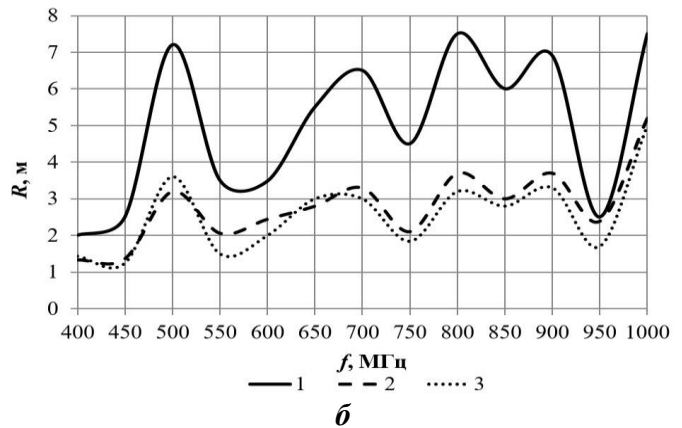
Внешний вид ПЭТ, расположенного внутри электромагнитного экрана на основе разработанных материалов, и частотные зависимости дальности распространения электромагнитного излучения ПЭТ представлены на рисунке 8.

На рисунке 8, а область расположения используемых для индикации генерирования и распространения зондирующего радиосигнала светодиодов на плате ПЭТ (дальномер) выделена с помощью окружности.

Анализ данных рисунка 8, б показывает, что электромагнитные экраны на основе разработанных материалов представляются перспективными для использования в целях уменьшения до 2 раз дальности распространения электромагнитного излучения ПЭТ.



а



б

1 – без экрана; 2 – экранированного с помощью электромагнитного экрана на основе порошкообразного электрокорунда; 3 – экранированного с помощью электромагнитного экрана на основе порошкообразного электрокорунда с модифицированным составом

Рисунок 8 – Внешний вид ПЭТ, расположенного внутри электромагнитного экрана на основе разработанных материалов (а) и частотные зависимости дальности распространения ЭМИ ПЭТ (б)

Таким образом экспериментально установлено, что электромагнитные экраны на основе разработанных материалов и покрытий обеспечивают подавление электромагнитного излучения, в связи с чем представляются перспективными для использования в целях защиты СВЧ устройств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. В результате проведенных экспериментальных исследований установлены закономерности изменения характеристик отражения и передачи ЭМИ электромагнитных экранов на основе порошкообразного электрокорунда, пропитанных водой или водными растворами (CaCl_2), до 20 об. %. Показано, что коэффициент передачи остается неизменным в диапазоне 0,7 – 11,4 ГГц, а превышение этого диапазона приводит к существенному его увеличению в образцах, не содержащим воду, по отношению к образцам, содержащим воду. Наиболее эффективным является добавление воды к порошковому электрокорунду в диапазоне частот от 5,9 до 9,4 ГГц, что позволило снизить на 2 – 10 дБ величину коэффициента отражения ЭМИ в СВЧ-диапазоне при неизменности величины коэффициента передачи, разработать новые экраны электромагнитного излучения и технологические маршруты их изготовления [3 – А, 4 – А, 9 – А].

2. На основании проведенных экспериментальных исследований установлены закономерности изменения характеристик отражения и передачи ЭМИ

электромагнитных экранов из композиционных материалов на основе железо-бариевых ферритов при добавлении в их состав порошкообразных алюмооксидов (соотношение алюмооксид : ферриты – 30 об.% : 20 об.%). Показано, что путем добавления порошкообразного электрокорунда в экраны на основе порошкообразных железо-бариевых ферритов можно обеспечить снижение на 2 – 7 дБ их коэффициента отражения ЭМИ в диапазонах частот 0,7 – 2 ГГц и 8 – 11 ГГц, регистрируемого при условии их закрепления на металлических подложках, и снижение на 1 – 10 дБ их коэффициента передачи в диапазоне частот 0,7 – 17 ГГц (исключая частоты 0,8 ГГц, 0,9 ГГц и 1,2 ГГц). По сравнению с экранами, изготовленными только с применением порошкообразных ферритов, они характеризуются в 1,5 раза более низкой массой на единицу площади. Полученные результаты позволили разработать новые технологические маршруты получения электромагнитных экранов [1 – А, 3 – А, 6 – А].

3. Установлены закономерности изменения характеристик отражения и передачи ЭМИ композиционных материалов и покрытий на основе порошкообразных алюмооксидов при добавлении в их состав до 20 об. % порошкообразного оксида железа (Fe_2O_3). Показано, что за счет явления естественного ферромагнитного резонанса, связанного с его магнитными свойствами, обеспечивается снижение на 1,0 – 8,0 дБ коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7 – 17,0 ГГц и повышение радиопоглощающих свойств в диапазонах частот 2,0 – 5,0 ГГц и 11,0 – 17,0 ГГц, что позволило улучшить эксплуатационные свойства существующих электромагнитных экранов и разработать новый способ модификации состава композиционных покрытий и технологические маршруты формирования таких экранов и покрытий [2 – А, 3 – А, 8 – А, 10 – А, 13 – А, 14 – А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Гибкие электромагнитные экраны можно рекомендовать к использованию для электромагнитного экранирования СВЧ устройств, используемых для обработки информации ограниченного распространения, а также в системах архитектурного электромагнитного экранирования, применяемых для снижения дальности распространения электромагнитного излучения СВЧ устройств [3 – А, 5 – А, 7 – А, 10 – А, 12 – А].

2. Электромагнитные экраны на основе порошкообразных железо-бариевых ферритов и электрокорунда перспективны для использования в качестве панелей для защиты помещений, экранированных посредством металлических листов и предотвращения возникновения пассивных электромагнитных помех в указанных помещениях [6 – А].

3. Электромагнитные экраны на основе композиционных покрытий, содержащих порошкообразные алюмооксиды и модифицирующие состав таких

покрытий компоненты (порошкообразный оксид железа, фрагменты фольгированных материалов) перспективны для использования в целях подавления электромагнитных помех, т.к. обеспечивают уменьшение до 2 раз дальности распространения электромагнитного излучения СВЧ устройств [1 – А, 3 – А, 6 – А, 8 – А].

4. Результаты исследований внедрены в учебный процесс БГУИР в качестве материалов лекционных и лабораторных занятий по дисциплине «Защита объектов связи от несанкционированного доступа» (специальность 1-98 01 02 «Защита информации в телекоммуникациях»), а также использованы в Центре 1.9 «Научно-производственно-образовательный инновационный центр СВЧ технологий и их метрологического обеспечения» научно-исследовательской части университета в рамках выполнения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ для создания высокоэффективных элементов магнитной и высокочастотной микро-и нанoeлектроники.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в научных изданиях, соответствующих требованиям пункта 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий

1–А. Негорючее композиционное покрытие на основе порошкового электрокорунда для электромагнитных экранов / О. Д. И. Пеньялоса, О. В. Бойправ, Л. М. Лыньков, М. В. Тумилович // Приборы. – 2018. – № 6 (216). – С. 49 – 54 (ВАК РФ).

2–А. Electromagnetic radiation shielding composite coatings based on powdered alumina and iron oxides / D. I. Penialosa Ovalies, O. V. Voiprav, M. V. Tumilovich, L. M. Lynkou // Doklady BGUIR. – 2021. – №19 (3). – P. 104 – 109.

3–А. Экспериментальное обоснование возможности использования электромагнитных экранов на основе порошкообразных алюмооксидов для снижения энергии электромагнитного излучения приборов электронной техники / О. Д. И. Пеньялоса, О. В. Бойправ, М. В. Тумилович, А. В. Гусинский, П. И. Балтрукович // Доклады БГУИР. – 2022. – № 20 (7). – С. 48 – 55.

Статьи в других рецензируемых научных изданиях

4–А. Пеньялоса Овальес, Д. И. Исследование коэффициентов передачи и отражения электромагнитного излучения порошковых материалов на основе электрокорунда / Д. И. Пеньялоса Овальес // Доклады БГУИР. – 2017. – № 8 (110). – С. 99 – 102.

5–А. Исследование характеристик отражения и передачи электромагнитного излучения гибких многослойных экранов на основе проводящих материа-

лов / О. В. Бойправ, Л. М. Лыньков, Д. И. Пеньялоса Овальес, Х. А. Э. Айад // Журнал радиоэлектроники. – 2019. – №4. – 11 с. [Электронный журнал] (ВАК РФ). Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/apr19/5/text.pdf>.

6–А. Бойправ, О. В. Сравнительный анализ характеристик отражения и передачи электромагнитного излучения экранов на основе порошкообразных ферритов и электрокорунда / О. В. Бойправ, Д. И. Пеньялоса Овальес, М. В. Тумилович // Журнал радиоэлектроники. – 2019. – № 9 [Электронный журнал] (ВАК РФ). Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/sep19/2/text.pdf>.

7–А. Негорючее композиционное покрытие на основе глинозема для изготовления радиопоглощающих конструкций / О. Д. И. Пеньялоса, О. В. Бойправ, М. В. Тумилович, А. В. Гусинский, Г. С. Паскробка, Л. М. Лыньков // Приборы. – 2020. – № 6 (240). – С. 39 – 43.

8–А. Способ модификации состава негорючих композиционных покрытий на основе порошковых алюмооксидов для электромагнитных экранов / О. В. Бойправ, О. Д. И. Пеньялоса, М. В. Тумилович, Л. М. Лыньков // Приборы. – 2021. – №1(247). – С. 47 – 54 (ВАК РФ).

Статьи в сборниках материалов научных конференций

9–А. Электромагнитные экраны на основе композиционного материала с электрокорундовым наполнителем / О. Д. И. Пеньялоса, Т. А. Пулко, О. В. Бойправ, М. В. Тумилович, Л. М. Лыньков, Н. В. Богуш // Материалы 13-й Междунар. научн.-техн. конф. «Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка». – Минск, БГНПО ПМ, 16–18 мая 2018 г.; редколл. А. Ф. Ильющенко [и др.]. – С. 160 – 162.

10–А. Радиопоглощающие композиционные покрытия на основе порошкообразных электрокорунда и оксида железа / О. В. Бойправ, М. В. Тумилович, Д. И. Пеньялоса Овальес, Л. М. Лыньков // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: материалы 15-й Междунар. научн.-техн. конф. (Минск, 14–16 сентября 2022 г.) / Нац. акад. наук Беларуси [и др.]; редкол.: А. Ф. Ильющенко [и др.]. – Минск: Беларуская навука, 2022. – С. 353 – 358.

Статьи в сборниках тезисов докладов научных конференций

11–А. Пеньялоса Овальес, Д. И. Влияние добавок TiO_2 и технического углерода на характеристики экранов ЭМИ на их основе / О. Д. И. Пеньялоса, М. В. Тумилович // Тезисы докладов XV Белорусско-российской научн. -технич. конф. «Технические средства защиты информации». – Минск, БГУИР, 6 июня 2017 г.; редколл. М. П. Батура [и др.]. – С. 95 – 96.

12–А. Пеньялоса Овальес, Д. И. Методика изготовления гибких электро-

магнитных экранов на основе пористых порошкообразных материалов / Д. И. Пеньялоса, М. В. Тумилович // Тезисы докладов XVII Белорусско-российской научн.-технич. конф. «Технические средства защиты информации». – Минск, БГУИР, 11 июня 2019 г.; редколл. Т. В. Борботько [и др.]. – С. 54.

13–А. Пеньялоса Овальес, Д. И. Технология изготовления трудновоспламеняемых композиционных покрытий для конструирования для конструкций, применяемых в целях электромагнитного экранирования помещений / Д. И. Пеньялоса, М. В. Тумилович // Тезисы докладов XIX Белорусско-российской научн.-техн. конф. «Технические средства защиты информации». – Минск, БГУИР, 8 июня 2021 г.; редколл. Т. В. Борботько [и др.]. – С. 73 – 74.

Патент

14–А. Трудновоспламеняемый электромагнитный экран : патент на полез. модель ВУ 12751 / О. В. Бойправ, Л. М. Лыньков, М. В. Тумилович, Д. И. Пеньялоса Овальес. – Оpubл. 01.10.2021.



РЭЗІЮМЭ

Пеньялоса Авальес Дэйвіс Ісаіас

Кампазіцыйныя матэрыялы на аснове аксідаў алюмінію і жалеза для абароны ЗВЧ прылад ад электрамагнітнага выпраменьвання

Ключавыя словы: кампазіцыйныя матэрыялы, прыборы электроннай тэхнікі (ПЭТ), ЗВЧ прылады, электрамагнітнае выпраменьванне (ЭМВ), электрамагнітны экран, алюмааксіды, аксіды жалеза, ферыты.

Мэта працы: даследаванне заканамернасцей узаемадзеяння электрамагнітнага выпраменьвання з кампазіцыйнымі матэрыяламі, якія змяшчаюць парашкападобныя аксіды рознага складу, і распрацоўка на аснове атрыманых матэрыялаў тэхналагічных маршрутаў вырабу электрамагнітных экранаў і пакрыццяў для абароны ЗВЧ прылад ад электрамагнітнага выпраменьвання.

Метады даследавання: панарамны вымяральнік каэфіцыентаў перадачы і адлюстравання SNA 0,01–18, стандартныя метадыкі даследавання ўласцівасцей матэрыялаў, арыгінальныя метадыкі ацэнкі ўплыву кампазіцыйных матэрыялаў на ўзровень электрамагнітнага выпраменьвання прыбораў электроннай тэхнікі.

Асноўныя вынікі: устаноўлены заканамернасці змянення характарыстык адлюстравання і перадачы ЭМВ электрамагнітных экранаў на аснове парашкападобнага электракарунду пры дабаўленні ў іх склад драўнянага вугалю і вады; электрамагнітных экранаў з кампазіцыйных матэрыялаў на аснове жалеза-барыевых ферытаў пры дабаўленні ў іх склад парашкападобных алюмааксідаў; кампазіцыйных пакрыццяў на аснове парашкападобных алюмааксідаў пры дабаўленні ў іх склад да 20 аб.% парашкападобнага аксіду жалеза. Паказана, што прымяненне названых кампазіцыйных матэрыялаў і пакрыццяў дазваляе знізіць на 2–10 дБ велічыню каэфіцыента адлюстравання ЭМВ ў дыяпазоне частот 0,7–17,0 Ггц і ў ЗВЧ-дыяпазоне, што дазволіла палепшыць эксплуатацыйныя ўласцівасці існуючых электрамагнітных экранаў і распрацаваць тэхналагічныя маршруты вырабу электрамагнітных экранаў для абароны ЗВЧ прылад і ПЭТ ад ЭМВ.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: вынікі даследаванняў выкарыстаны ў навучальным працэсе і пры выкананні НДВКР у навукова-даследчай частцы ўстанова адукацыі «Беларускі дзяржаўны ўніверсітэт інфарматыкі і радыёэлектронікі».

Вобласць ужывання: для электрамагнітнага экранавання ПЭТ, якія выкарыстоўваюцца для апрацоўкі інфармацыі абмежаванага распаўсюджвання, а таксама ў сістэмах архітэктурнага электрамагнітнага экранавання.

РЕЗЮМЕ

Пеньялоса Овальес Дейвис Исаиас

Композиционные материалы на основе оксидов алюминия и железа для защиты СВЧ устройств от электромагнитного излучения

Ключевые слова: композиционные материалы, приборы электронной техники (ПЭТ), СВЧ устройства, электромагнитное излучение (ЭМИ), электромагнитный экран, алюмооксиды, оксиды железа, ферриты.

Цель работы: исследование закономерностей взаимодействия электромагнитного излучения с композиционными материалами, содержащими порошкообразные оксиды различного состава, и разработка на основе полученных материалов технологических маршрутов изготовления электромагнитных экранов и покрытий для защиты СВЧ устройств от электромагнитного излучения.

Методы исследования: панорамный измеритель коэффициентов передачи и отражения SNA 0,01–18, стандартные методики исследования свойств материалов, оригинальные методики оценки влияния композиционных материалов на уровень электромагнитного излучения приборов электронной техники.

Основные результаты: установлены закономерности изменения характеристик отражения и передачи ЭМИ электромагнитных экранов на основе порошкообразного электрокорунда при добавлении в их состав древесного угля и воды; электромагнитных экранов из композиционных материалов на основе железо-бариевых ферритов при добавлении в их состав порошкообразных алюмооксидов; композиционных покрытий на основе порошкообразных алюмооксидов при добавлении в их состав до 20 об.% порошкообразного оксида железа. Показано, что применение указанных композиционных материалов и покрытий позволяет снизить на 2–10 дБ величину коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 0,7–17,0 ГГц и в СВЧ-диапазоне, что позволило улучшить эксплуатационные свойства существующих электромагнитных экранов и разработать технологические маршруты изготовления электромагнитных экранов для защиты СВЧ устройств и ПЭТ от ЭМИ.

Рекомендации по использованию: результаты исследований использованы в учебном процессе и при выполнении НИОКР в научно-исследовательской части учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Область применения: для электромагнитного экранирования ПЭТ, используемых для обработки информации ограниченного распространения, а также в системах архитектурного электромагнитного экранирования.

SUMMARY

Peñaloza Ovalles Deivis Isaias

Composite materials based on aluminum and iron oxides for the protection of microwave devices from electromagnetic radiation

Keywords: composite materials, electronic devices (ED), microwave devices, electromagnetic radiation (EMR), electromagnetic shield, aluminum oxides, iron oxides, ferrites.

Purpose of the work: study of the patterns of interaction of electromagnetic radiation with composite materials containing powdered oxides of various compositions and the development of technological routes based on the obtained materials for the manufacture of electromagnetic screens and coatings for protecting microwave devices from electromagnetic radiation.

Research methods: panoramic transmission and reflection coefficients meter SNA 0.01–18, standard methods for studying the properties of materials, original methods for assessing the effect of composite materials on the level of electromagnetic radiation of electronic devices.

The results obtained and their novelty: Regularities have been established for changing the characteristics of reflection and transmission of electromagnetic radiation of electromagnetic screens based on powdered electrocorundum when charcoal and water are added to their composition; electromagnetic screens made of composite materials based on iron-barium ferrites with the addition of powdered aluminum oxides to their composition; composite coatings based on powdered aluminum oxides with the addition of up to 20 vol.% of powdered iron oxide to their composition. It is shown that the use of these composite materials and coatings makes it possible to reduce the EMR reflection coefficient by 2–10 dB in the frequency range of 0.7–17.0 GHz and in the microwave range, which made it possible to improve the operational properties of existing electromagnetic shields and develop technological routes production of electromagnetic screens for the protection of microwave devices and ED from EMR.

Recommendations for use: the results of the research were used in the educational process and in the performance scientific research and development work in the research part of the educational institution "Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics".

Scope: Area of application: for electromagnetic shielding of electronic devices used for processing information of limited distribution, as well as in architectural electromagnetic shielding systems

Научное издание

ПЕНЬЯЛОСА

Овальес Дейвис Исаиас

**КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ
НА ОСНОВЕ ОКСИДОВ АЛЮМИНИЯ И ЖЕЛЕЗА ДЛЯ ЗАЩИТЫ
СВЧ УСТРОЙСТВ ОТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.27.06 – технология и оборудование для производства
полупроводников, материалов и приборов электронной техники