



Федеральное государственное  
бюджетное учреждение науки  
ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОФИЗИКИ  
Уральского отделения  
Российской академии наук  
(ИЭФ УрО РАН)

620016, г. Екатеринбург,  
ул. Амундсена, д. 106  
Тел. (343) 267-87-96 Факс (343)  
267-87-94

ОКПО 04839716 ОГРН 1026604936929  
ИНН/КПП 6660007557/667101001

14.10.2018 № 16346 - 1256 - 327

на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ

Директор Института  
электрофизики УрО РАН

С.А. Чайковский



«17» октября 2018 г.

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института электрофизики Уральского отделения Российской академии наук на диссертацию Шаненкова Ивана Игоревича «Плазмодинамический синтез дисперсных оксидов железа с высоким содержанием эpsilon фазы в высокоскоростной струе электроразрядной плазмы», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальностям 05.14.12 – Техника высоких напряжений 05.09.02 – Электротехнические материалы и изделия.

### 1. Актуальность диссертационного исследования.

Ускоренная разработка и внедрение систем беспроводной связи и высокочастотных устройств гигагерцового диапазона уже сейчас требует решения проблем электромагнитной совместимости различных элементов и узлов аппаратуры. Задачи защиты от электромагнитного излучения могут быть решены с помощью магнитных материалов, которые либо отражают, либо ослабляют излучение. Среди таких магнитных материалов особо выделяются оксиды железа: магнетит и уникальная эpsilon фаза ( $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ), которая может существовать только в наноразмерном состоянии. На сегодняшний день синтезировать дан-

ную фазу с чистотой выхода более 50 масс. % возможно только с применением золь-гель метода. Известно, что электрофизические методы синтеза с применением плазменных технологий могут рассматриваться в качестве высокоэффективной альтернативы существующим способам, благодаря тому, что позволяют получать уникальные метастабильные фазы различных материалов, к которым относится эpsilon фаза оксида железа. Все это определяет актуальность разработки нового электрофизического метода синтеза и получения дисперсных оксидов железа с высоким содержанием  $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ , основанного на использовании высоковольтного коаксиального магнитоплазменного ускорителя, обеспечивающего генерацию электроразрядной железосодержащей плазмы, истекающей в кислородсодержащую атмосферу.

## **2. Структура и содержание диссертационной работы.**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы из 138 наименований, совокупным объемом 156 страниц, включая 14 таблиц, 61 рисунок, а также два приложения.

**Во введении** обоснованы решаемая проблема и её актуальность, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, научная новизна полученных результатов и их теоретическая и практическая значимость. Кроме этого, приведены выносимые на защиту основные положения, а также сведения о методах исследований и достоверности их результатов, апробации и публикации материалов по тематике диссертации, реализации результатов работы, структуре и объеме диссертации.

**Первая глава** посвящена результатам анализа литературных данных по вопросу синтеза ультрадисперсных оксидов железа с высоким содержанием фазы  $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ , а также основным особенностям данного материала и ограничениям, препятствующим его синтезу большинством известных методов. Приведенный обзор, содержащий большое количество зарубежных источников, позволяет судить, что на сегодняшний день существует только один способ, который может быть использован для синтеза оксидов железа с содержанием  $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$  свыше 50

масс. % (золь-гель метод). Отмечается перспективность использования электрофизических методов и, в частности, плазмодинамического метода синтеза при истечении сверхзвуковой струи железосодержащей плазмы, генерируемой коаксиальным магнитоплазменным ускорителем, в кислородсодержащую среду.

**Во второй главе** рассмотрена система плазмодинамического синтеза, подробно описано устройство и принцип работы её основного элемента – коаксиального магнитоплазменного ускорителя с железными электродами. Предложены и описаны конструкционные и схемные решения, использованные в данной работе, непосредственно влияющие на увеличение выхода эpsilon фазы оксида железа в составе конечного гетерофазного продукта. Описаны аналитические методики исследования полученных материалов.

**В третьей главе** изучено влияние основных конструкционных, энергетических и режимных параметров высоковольтной системы плазмодинамического синтеза на основе коаксиального магнитоплазменного ускорителя с железными электродами на характеристики получаемых ультрадисперсных порошков оксидов железа. С использованием различных аналитических методик исследования подтверждена принципиальная возможность получения фазы  $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$  в составе гетерофазного продукта. Предложены и подробно исследованы технические решения, а также выявлены ключевые факторы, влияющие на увеличение выхода  $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ , при проведении процесса плазмодинамического синтеза. Подробно рассмотрены вопросы формирования характерных частиц при истечении гиперзвуковой струи железосодержащей электроразрядной плазмы в кислородсодержащую атмосферу.

**Четвертая глава** посвящена исследованию температурной стабильности фазового и гранулометрического состава синтезируемых оксидов железа при нагреве в воздушной атмосфере, а также эволюция структуры и магнитных свойств синтезируемых порошкообразных продуктов.

**В пятой главе** изучены вопросы, связанные с исследованием радиопоглощающих свойств синтезируемых магнитных фаз оксида железа. Определены диапазоны эффективного поглощения электромагнитного излучения как для

эпсилон фазы оксида железа, так и для фазы магнетита. Показано, что использование композитных материалов на основе эпоксидных компаундов, заполненных порошками плазмодинамического синтеза различного фазового состава, является перспективным для поглощения электромагнитного излучения в сверхвысокочастотном и миллиметровом диапазоне длин волн.

**В заключении** сформулированы основные результаты, полученные при решении поставленных задач и обеспечившие достижение цели диссертационной работы.

### **3. Научная новизна и значимость результатов диссертационной работы.**

- Разработаны научные основы метода прямого плазмодинамического синтеза дисперсных оксидов железа на основе импульсного сильноточного высоковольтного коаксиального магнитоплазменного ускорителя эрозионного типа, определены оптимальные режимы и условия, обеспечивающие получение нанопорошка с высоким содержанием (до 90 масс.%) нанокристаллической фазы  $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$  в составе гетерофазного продукта.

- Разработаны конструктивные и схемные решения разрядной цепи и установлены основные закономерности влияния режимных и энергетических параметров КМПУ на фазовый и гранулометрический состав оксидов железа плазмодинамического синтеза.

- Определены условия и предложены механизмы образования нанодисперсной фазы  $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$  и микронной фазы магнетита  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  в виде полых сферических частиц в процессе истечения высокоскоростной струи железосодержащей плазмы в газообразную смесевую атмосферу  $\text{O}_2+\text{Ar}$  с различным содержанием кислорода.

Полученные результаты являются новыми, поскольку существующие в настоящее время методы позволяют получать подобный материал с содержанием фазы  $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$  не более 50 масс.%.

#### **4. Практическая ценность и реализация результатов диссертационной работы.**

Разработана и исследована система плазмодинамического синтеза дисперсных оксидов железа с высоким содержанием эpsilon фазы. Определены граничные условия и параметры системы, обеспечивающие получение порошкообразных продуктов с преимущественным содержанием эpsilon фазы оксида железа (более 50 масс. %). С использованием различных схемных и конструктивных решений возможно добиться выхода  $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$  на уровне 90 масс. %. Продукты синтеза могут быть использованы при изготовлении радиопоглощающих покрытий. Полые сферические частицы с широким распределением по размерам характеризуются зоной эффективного поглощения (менее -10 дБ), шириной около 12 ГГц. Ультрадисперсная фракция с преобладанием  $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$  имеет максимум поглощения на частоте 130 ГГц. Практическая значимость данных результатов также подтверждена представленными в Приложении соответствующими актами их использования в ФГБУ «НМИЦ Гематологии» в лаборатории патологии и фармакологии гемостаза и Центре радиоизмерений ФГАОУ ВО «Томский государственный университет».

#### **5. Соответствие содержания паспорту специальности.**

Содержание диссертации соответствует паспортам научных специальностей 05.14.12 – «Техника высоких напряжений»:

П.4 Разработка научных основ техники использования высоких напряжений для технологических процессов, разработка оборудования для технологий, использующих высокое напряжение.

05.09.02 – «Электротехнические материалы и изделия»

П.1 Изучение на стадиях разработки, исследования, изготовления, эксплуатации и утилизации физико-химических процессов, определяющих свойства электротехнических и радиотехнических материалов и изделий в связи с их химическим составом, структурой и внешними условиями эксплуатации с целью обеспечения их высокого качества.

П.2 Оптимизация параметров электротехнических, радиотехнических материалов и изделий, технологии их производства, эксплуатации и утилизации.

#### **6. Апробация и публикация результатов диссертационной работы.**

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 5 международных научно-технических конференциях. По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ, в том числе 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 6 статей в журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, 3 из которых в журналах первого квартиля.

Следует отметить, что диссертация написана грамотным понятным языком и хорошим литературным стилем. Личный вклад автора в работу несомненен и выделен в тексте работы. Соискатель провел весьма трудоемкие исследования. Это многочисленные анализы образцов порошков, изменения конструкции установки с большим энерговыделением и просто ее ремонт.

#### **7. Замечания по диссертации.**

7.1. В работе измерение напряжения на разрядном промежутке производится высокоомным резистивным делителем. Как известно, делитель напряжения регистрирует не только активную, но и индуктивную составляющую напряжения  $d(LI)/dt$ . Однако ее роль в диссертации не обсуждается, а ее величина не оценивается.

7.2. Дисперсность (средний размер частиц) полученного материала определяется исключительно по размеру области когерентного рассеяния (ОКР). Такой подход возможен, когда частицы порошка монокристаллически. В случае поликристаллической структуры частиц размером ОКР пользоваться недостаточно. Существуют другие физические методы для определения дисперсности порошка, которые не используются в работе. Кроме того, в работе делаются заключения о ширине распределений частиц по размерам, однако, при этом не приводятся ни сами распределения, ни их параметры.

7.3. Хотелось бы более подробного описания режима съемки: время экспозиции кадра, чем оно обеспечивалось, от какого события идет отсчет времени, масштаб изображения.

7.4. Стоило бы привести также зависимость эродированной массы от протекшего заряда, как это обычно делают в литературе по эрозии. Это позволило бы сравнить результаты автора с другими работами по эрозии.

Кроме того, хотелось увидеть сравнение представленного метода с другими методами по основным показателям – производительность кг(г)/час, энергозатраты (кВт час/кг), качество материала (чистота, дисперсность).

## **8. Заключение.**

Отмеченные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы, которая представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную на актуальную тему. Полученные на основе проведенных исследований результаты являются значимыми и могут быть использованы, например, для улучшения электромагнитной совместимости высокочастотной аппаратуры. Актуальность, научная новизна, практическая значимость, содержание и публикации диссертационной работы «Плазменно-динамический синтез дисперсных оксидов железа с высоким содержанием эпсилон фазы в высокоскоростной струе электроразрядной плазмы» соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, в том числе п.п. 9-14, утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 «О порядке присуждения ученых степеней» с изменениями Постановления Правительства Российской Федерации от 21 апреля 2016 г. № 335 «О внесении изменений в Положение о присуждении ученых степеней», а её автор Шаненков Иван Игоревич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальностям 05.14.12 – Техника высоких напряжений 05.09.02 – Электротехнические материалы и изделия.

Диссертационная работа Шаненкова И.И. рассмотрена на расширенном научном семинаре лаборатории импульсных процессов ИЭФ УрО РАН 17 октября 2018 г., протокол № 14.

Заведующий лабораторией импульсных процессов  
Федерального государственного бюджетного  
учреждения науки Института электрофизики  
Уральского отделения Российской академии наук  
кандидат технических наук

Бекетов И.В.

Подпись Бекетова И.В. заверяю:

Ученый секретарь Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки  
Института электрофизики Уральского отделения  
Российской академии наук  
кандидат физ.- мат. наук

Кокорина Е.Е.

17 октября 2018 г.

Бекетов Игорь Валентинович  
620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 106, ИЭФ УрО РАН  
Тел: (343) 267-88-19  
E-mail: beketov@iep.uran.ru

#### Сведения о ведущей организации:

Полное и сокращенное наименование организации	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭФ УрО РАН).
Место нахождения	620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 106.
Телефон	8 (343) 267-87-96
Адрес электронной почты	admin@iep.uran.ru
Адрес сайта организации	http://www.iep.uran.ru/