

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ ЭКСПЕРТНОЙ КОМИССИИ**

по защите диссертации Дарвиша Мустафы Адела Абделазица Элсайеда на тему «Структурные, магнитные и электродинамические характеристики функциональных магнитных материалов на основе замещенных гексаферритов М-типа», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности

01.04.10 – физика полупроводников,  
состоявшейся в НИТУ «МИСиС» 21.06.2021 г.

Диссертация принята к защите Диссертационным советом НИТУ «МИСиС» 12.04.2021 г., протокол № 27.

Диссертация выполнена на кафедре Технологии материалов электроники Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (НИТУ «МИСиС»), Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук Морченко Александр Тимофеевич, работает доцентом кафедры Технологии материалов электроники НИТУ «МИСиС»,

Научный консультант – кандидат физико-математических наук Труханов Алексей Валентинович, кандидат физико-математических наук, работает научным сотрудником кафедры Технологии материалов электроники НИТУ «МИСиС».

Экспертная комиссия утверждена Диссертационным советом НИТУ «МИСиС» (протокол № 27 от 12.04.2021 г.) в составе:

1. Ховайло Владимир Васильевич – доцент, д.ф.-м.н., профессор кафедры функциональных наносистем и высокотемпературных материалов НИТУ «МИСиС» – председатель комиссии;
2. Конюхов Юрий Владимирович, доктор технических наук, доцент кафедры функциональных наносистем и высокотемпературных материалов НИТУ «МИСиС»;
3. Головин Игорь Станиславович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры металловедения цветных металлов НИТУ «МИСиС»;
4. Мерзликин Александр Михайлович, доктор физико-математических наук, заместитель директора по научной работе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук (ИТПЭ РАН);
5. Перов Николай Сергеевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой магнетизма Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.

В качестве ведущей организации утверждено Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта», г. Калининград.

Экспертная комиссия отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- Синтезированы образцы гексаферритов бария  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Sn}_x\text{O}_{19}$  и  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Zr}_x\text{O}_{19}$ . Установлено, что в диапазоне концентраций  $x \leq 0,3$  составы являются однофазными. При увеличении степени замещения выше  $x=0,6$  в образцах отмечается наличие примесных фаз, идентифицированных как исходные оксиды  $\text{SnO}_2$  и  $\text{ZrO}_2$ . Вторая фаза затрудняет рост зерен основной фазы, что особенно заметно в случае Zr-замещенных составов. Размер зерен гексаферрита монотонно уменьшается с увеличением степени замещения железа катионами олова во всем диапазоне исследованных составов. В случае замещения цирконием до выпадения второй фазы наблюдается увеличение размера зерен, после чего начинается его плавное снижение.
- Установлено, что увеличение степени замещения ионов  $\text{Fe}^{3+}$  в гексаферритах  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Sn}_x\text{O}_{19}$  и  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Zr}_x\text{O}_{19}$  ионами Sn и Zr приводит к изменению намагниченности за счет фрустрации магнитной структуры и разрыва обменных связей  $\text{Fe}^{3+}-\text{O}^{2-}-\text{Fe}^{3+}$ . Показано, что в обоих составах значения намагниченности и остаточной намагниченности уменьшаются с ростом степени замещения. При увеличении степени замещения от 0,1 до 1,2 коэрцитивная сила в  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Sn}_x\text{O}_{19}$  снижается более чем в 4,6 раза, а в  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Zr}_x\text{O}_{19}$  возрастает практически в 2,5 раза. Это закономерно приводит и к изменению поглощения электромагнитного излучения в материале.
- Установлена связь электродинамических характеристик обоих изученных типов гексаферритов бария с их химическим составом, обусловленная в первую очередь ослаблением взаимодействий между магнитоактивными ионами  $\text{Fe}^{3+}$  в структуре феррита и изменением диэлектрических потерь при замещениях диамагнитными ионами. Обнаружено, что максимальное поглощение электромагнитного излучения наблюдается в образцах с наибольшей степенью замещения  $x = 1,2$ . Показано, что основной вклад в поглощение электромагнитного излучения обусловлен механизмом диэлектрических потерь.
- Разработаны композиционные материалы ГФ/ПВДФ на основе порошкообразного гексаферрита  $\text{BaFe}_{11,7}\text{Al}_{0,3}\text{O}_{19}$  (ГФ) в полимерной (ПВДФ) матрице с варьируемым соотношением фаз. Установлено, что при увеличении доли ПВДФ от 5 до 20 масс.% значения намагниченности насыщения, остаточной намагниченности и коэрцитивной силы снижаются пропорционально содержанию ГФ. Продемонстрирована возможность практического использования композитов ГФ/ПВДФ в антенных технологиях.
- Обнаружена сильная зависимость магнитных и электродинамических характеристик композиционного материала, содержащего 15 масс.% ПВДФ и 85 масс.%  $\text{BaFe}_{11,7}\text{Al}_{0,3}\text{O}_{19}$ , от добавок углеродного наполнителя. Показано, что свойствами такого композита можно эффективно управлять, изменяя его назначение от материала-отражателя до материала-поглотителя за счет малых доз эксфолиированного графита. Использование таких добавок значительно увеличивает экранирующую способность в первую очередь за счет процессов поглощения энергии излучения. Основным фактором увеличения поглощения в композитах этого типа является рост электропроводности.

- Все графит-содержащие композиты могут быть использованы в качестве экранирующих материалов. При этом предпочтительный выбор какого-либо из них зависит от поставленных задач и конкретных требований к параметрам материала по частоте, широкополосности или уровню экранирования.

Теоретическая значимость работы заключается в установлении принципиальных закономерностей трансформации фазового состава, структурных характеристик, магнитных и электродинамических свойств гексаферритов М-типа при частичном гетеровалентном замещении ионов железа диамагнитными катионами. Научную ценность также представляет выявление механизмов энергетических потерь в композиционных материалах различного типа при взаимодействии с электромагнитным излучением (поглощение излучения).

Практическая значимость полученных соискателем результатов исследования обусловлена возможностью использования как составов керамических ферритов, так и разработанных на их основе композитов в реальных устройствах СВЧ-диапазона (покрытия, экранирующие и поглощающие электромагнитное излучение, антенные системы, устройства СВЧ-техники). Продемонстрированы преимущества разработанного состава композиционного материала перед материалом-аналогом FR4, применяющегося в антеннах типа Bluetooth.

Достоверность научных результатов подтверждается использованием современных методик исследования, измерительных установок и приборов, согласованностью результатов, полученных различными методами, отсутствием противоречий с результатами, опубликованными другими научными группами.

Личный вклад соискателя состоит в том, что результаты, составившие основу диссертации, получены лично автором или при его определяющем участии. Автор лично проводил эксперименты, занимался обработкой и анализом результатов экспериментов, готовил статьи для публикации.

Материалы диссертации Дарвиша Мустафы Адела Абделаиза Элсайеда были представлены на четырех международных конференциях и опубликованы в 10 статьях в международных и российских журналах, входящих в базы данных WOS и Scopus (1-2 квартиль).

Пункт 2.6 Положения присуждения ученой степени кандидата наук, ученой степени доктора наук НИТУ «МИСиС» соискателем ученой степени не нарушен.

Диссертация М.Дарвиша соответствует критериям п. 2 Положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ «МИСиС», так как в ней на основании выполненных автором исследований содержится решение задач разработки и всестороннего исследования новых типов функциональных материалов – радиоэкранирующих материалов на базе гексаферритов М-типа и матричных полимерных композитов с наполнителями из таких ферритов, а также обоснованием их практического использования в качестве радиопоглощающих и радиоотражающих материалов для электромагнитного экранирования и в качестве подложек в антенных

системах. Продемонстрированы методы управления свойствами полимерных композитов на основе гексаферрита и указаны пути дальнейшего совершенствования таких материалов.

Экспертная комиссия приняла решение о возможности присуждения Дарвишу Мустафе Аделу Абделазиу Элсайеду ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности по специальности 01.04.10 – Физика полупроводников.

При проведении тайного голосования экспертная комиссия в количестве 5 человек, участвовавших в заседании, из 5 человек, входящих в состав комиссии, проголосовала: за 5, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель Экспертной комиссии



В.В. Ховайло

21.06.2021г.