

На правах рукописи



ТАРАСОВА ОКСАНА СЕРГЕЕВНА

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ МАГНИТНЫЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ  
СВОЙСТВА ПЛЕНОК И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СТРУКТУР  
НА ОСНОВЕ НАНОКОМПОЗИТА  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$

Специальность: 1.3.8. Физика конденсированного состояния

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Воронеж – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный технический университет»

Научный руководитель Доктор физико-математических наук, доцент, **Ситников Александр Викторович**

Официальные оппоненты: **Вызулин Сергей Александрович**, доктор физико-математических наук, доцент, ФГКВОУ ВО «Краснодарское высшее военное орденов Жукова и Октябрьской Революции Краснознаменное училище имени генерала армии С.М. Штеменко» Министерства обороны Российской Федерации, научно-исследовательский центр, 2 управление научно-исследовательское, 22 отдел научно-исследовательский, 221 лаборатория научно-исследовательская, старший научный сотрудник  
**Юрасов Алексей Николаевич**, доктор физико-математических наук, доцент, Институт перспективных технологий и индустриального программирования ФГБОУВО "МИРЭА – Российский технологический университет", кафедра наноэлектроники, профессор.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов;

Защита состоится «30» июня 2022 г. в 13 ч.00 мин. на заседании диссертационного совета при Воронежском государственном университете по адресу: 394018, г. Воронеж, Университетская пл., д. 1 ауд. 428.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Воронежского государственного университета, с авторефератом – на сайте ВУЗа <http://www.vsu.ru> и на сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки РФ – <http://vak.ed.gov.ru>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
24.2.288.03



Голощاپов Дмитрий Леонидович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Повышенный интерес к нанокompозитам металл-диэлектрик обусловлен проявлением в них квантовых эффектов при высоких температурах (гигантский магниторезистивный и магниторефрактивный эффекты, прыжковая проводимость, аномальный эффект Холла и т. д.) [1-3]. Поэтому данные гетерогенные системы актуальны как функциональные среды в элементах памяти на магниторезистивном и мемристорном эффектах, датчиках магнитного поля, устройствах спинтроники и т.д. [4-6]. К тому же, введение в качестве металлической фазы элементов или сплавов с ферромагнитным упорядочением, обеспечивает применение нанокompозита в высокочастотной области электромагнитного излучения (МГц, ГГц) [7,8].

Установление влияния структуры нанокompозитов на магнитные и электрические свойства в гигагерцовом диапазоне частот является важной задачей физики конденсированного состояния. В этом случае важнейшее значение приобретает выявление закономерностей естественного ферромагнитного резонанса, условий согласования волнового сопротивления функционального материала с воздушным пространством, принципы достижения высокой магнитной проницаемости гетерогенных структур, и др. [9,10]. Для нанокompозитов ферромагнитный металл-диэлектрик, подходящих для применения в качестве активных сред, поглощающих электромагнитное излучение в области ВЧ и СВЧ частот, решение подобного рода задач является актуальным с точки зрения развития указанных выше приложений. Однако на пути реализации данного направления имеются серьезные физические ограничения. Так, величина удельного электрического сопротивления пленки нанокompозита имеет не высокое значение после порога перколяции, где наблюдается ферромагнитное упорядочение магнитной структуры гетерогенных пленок. Наличие анизотропии формы наногранул в перпендикулярном к поверхности пленки направлении существенно понижает величину ее магнитной проницаемости. В данной работе разрабатывались оригинальные подходы преодоления этих ограничений. Введение наноразмерных прослоек окисленного нанокompозита между слоями композита толщиной соизмеримой с размером металлических наногранул (4-6 нм) дает возможность уменьшить магнитную анизотропию формы ферромагнитных частиц и повысить значение удельного электрического сопротивления пленки. Фрагментация функционального покрытия и распределение этих фрагментов в пространстве уменьшает значение эффективной диэлектрической проницаемости активной среды. Обозначенные направления существенно изменяют механизм взаимодействия электромагнитного излучения с пленкой нанокompозита и позволяют создать перспективное направление на пути использования нанокompозитов в ВЧ и СВЧ устройствах. Таким образом, установление закономерностей структуры, электрических и магнитных свойств новых многослойных систем на основе нанокompозита  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$  является **актуальной научной проблемой**.

**Целью работы** являлось установление закономерностей взаимодействия электромагнитного излучения в диапазоне частот 1 – 10 ГГц с пленками нанокompозита  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$  и многослойной структуры  $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}]/[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x} + \text{O}_2]\}_n$  в зависимости от соотношения диэлектрической и металлической фаз, параметров формирования 2D неоднородностей в процессе синтеза, структурных и пространственных особенностей фрагментации пленочного покрытия на подложке.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Разработка комплекса технологических приемов для получения образцов нанокompозитов  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$  и многослойной структуры  $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}]/[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x} + \text{O}_2]\}_n$  размером 400x400 мм<sup>2</sup> на поверхности лавсана и стеклоткани, формирования рисунка квазифрактальной структуры на поверхности лавсана и формовки стеклотекстолита из стеклоткани с нанесенным на ее поверхность пленки нанокompозита, обеспечивающего возможности исследований взаимодействия электромагнитного излучения с пленками рупорным методом на частоте от 1 ГГц до 10 ГГц .

2. Анализ взаимосвязи параметров осаждения (парциальное давление кислорода и концентрация диэлектрической фазы) и электрических свойств нанокompозита  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}$  и многослойной структуры  $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}]/[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5} + \text{O}_2]\}_n$ .

3. Исследование магнитостатических и магнитодинамических свойств синтезируемых гетерогенных пленок.

4. Установление параметров абсорбции электромагнитного излучения в диапазоне частот 1 – 10 ГГц образцов стеклотекстолита с нанесенным функциональным покрытием из нанокompозита  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}$  и многослойной структуры  $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}]/[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5} + \text{O}_2]\}_n$  на поверхность стеклоткани и квазифрактальной структуры с нанесенным функциональным покрытием из нанокompозита  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$  на поверхности лавсана.

5. Разработка эмпирической модели механизмов взаимодействия электромагнитного излучения в диапазоне частот 1 – 10 ГГц с исследуемыми структурами.

### **Научная новизна работы**

1. Установлено, что для пленок нанокompозитов  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$  и многослойных структур  $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}]/[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5} + \text{O}_2]\}_n$ , полученных при циклическом добавлении кислорода, в диапазоне концентраций x от 22 ат.% до 70 ат.% невозможно согласовать волновое сопротивление воздушного пространства и гетерогенной пленки.

2. Установлено, что фрагментация пленки композита приводит к увеличению частоты естественного ферромагнитного резонанса и полуширины на

кривой частотной зависимости мнимой части комплексной магнитной проницаемости за счет формирования магнитной анизотропии формы, которая задается структурой стеклотканного полотна.

3. Выявлен превалирующий вклад электрической составляющей электромагнитной волны во взаимодействие электромагнитного излучения с функциональным покрытием образцов на основе нанокompозитов  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$  в диапазоне частот 1-10 ГГц, связанный с большим значением мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости пленок по сравнению с мнимой частью комплексной магнитной проницаемостью.

### **Теоретическая значимость**

Теоретическая значимость работы заключается в том, что выявлены механизмы взаимодействия электромагнитного излучения СВЧ диапазона с пленками нанокompозитов металл-диэлектрик, многослойными структурами композит-окисленный композит при однородном осаждении и различной структурой их фрагментации и пространственного распределения. Обосновано применение рупорных методов исследования для изучения диэлектрических свойств и процессов взаимодействия с электромагнитным излучением фрагментированных нанокompозиционных пленок.

### **Практическая значимость**

1. Разработан комплекс технологических приемов обеспечивающий получение образцов стеклотекстолита из стеклоткани с нанесенной на ее поверхность пленки нанокompозита  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$  и многослойной структуры  $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}]/[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}+\text{O}_2]\}_n$  размером до  $350 \times 300 \text{ мм}^2$  для высокочастотных электромагнитных измерений.

2. Использование ионно-лучевого осаждения и технологии лазерной резки, позволяет получить образцы квазифрактальной структуры с нанесенным функциональным покрытием из нанокompозита  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$  на поверхности лавсана размером до  $400 \times 400 \text{ мм}^2$  для высокочастотных электромагнитных измерений.

3. Выявлены оптимальные параметры, обеспечивающие максимальное поглощение в квазифрактальных структурах функционального покрытия. При толщине пленки нанокompозитов  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{66,1}(\text{SiO}_2)_{33,9}$  1.4 мкм и удельном электрическом сопротивлении 4.75 Ом·м СВЧ поглощение достигает ~ 50 % по мощности излучения в диапазоне частот 2 - 7 ГГц .

4. Установлен оптимальный состав нанокompозита  $((\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{53,1}(\text{SiO}_2)_{46,9})$  для квазифрактальных структур на лавсановой подложке и  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}$  для стеклотекстолита изготовленного из стеклоткани 1) и толщина воздушного зазора (12 мм), для которых в геометрии экрана Солсбери достигнут максимальный коэффициент поглощения по энергии электромагнитной волны, равный 0.8 в диапазоне частот 3 - 5 ГГц.

### **Научные положения, выносимые на защиту**

1. Максимально достигнутые значения произведения удельного электрического сопротивления на магнитную проницаемость для пленки

многослойной структуры  $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}]/[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}+\text{O}_2]\}_n$ , полученной при циклическом добавлении кислорода с давлением  $\sim 4.3$  пар.%, в области концентраций металлической фазы от 40 ат.% до 60 ат.% на частоте 50 МГц, обусловлено увеличением магнитной проницаемости за счет подавления перпендикулярной магнитной анизотропии пленки, а также увеличением удельного электрического сопротивления образцов и незначительным сдвигом порога перколяции гетерогенной структуры.

2. Пленки нанокompозита  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}$  и многослойных структур  $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}]/[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}+\text{O}_2]\}_n$ , осажденные на стеклоткани имеют большую частоту естественного ферромагнитного резонанса и полуширину частотной зависимости мнимой части комплексной магнитной проницаемости по сравнению с образцами на гладкой поверхности, что связано с наличием магнитной анизотропии формы фрагментов пленки на поверхности стеклотканей.

3. Пространственное перераспределение электрической составляющей электромагнитной волны в объеме образца относительно проводящих частиц структуры определяет уменьшение эффективной диэлектрической проницаемости стеклотекстолита с пленкой нанокompозита  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}$  и многослойной структуры  $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}]/[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}+\text{O}_2]\}_n$ , осажденной на стеклоткань по сравнению с квазифрактальной структурой пленки нанокompозита  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$  на лавсане при равенстве удельных электрических сопротивлений резистивных слоев.

4. Основной вклад во взаимодействии СВЧ излучения (1-10 ГГц) с пленкой функционального покрытия на основе нанокompозитов  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$  определяется электрической составляющей электромагнитной волны.

5. Частотная зависимость коэффициента поглощения в области частот 1 – 10 ГГц нанокompозита  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}$  и многослойных структур  $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}]/[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}+\text{O}_2]\}_n$ , определяется пространственным распределением и топологией функционального покрытия.

### **Достоверность**

Достоверность полученных результатов исследований определяется применением современных апробированных научно обоснованных методов и методик исследования, использованием современного исследовательского оборудования, привлечением взаимодополняющих методов исследования и статистической обработки результатов измерений, широкой апробацией результатов работы.

**Апробация работы** Основные результаты научно-квалификационной работы были доложены и обсуждены на следующих конференциях: 8 th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures “Saint Petersburg OPEN 2021” St. Petersburg, Russia, (May 25 – 28, 2021); Международная молодежная научная конференция. Физика. Технологии. Инновации. ФТИ-2021 (ФТИ-2020, ФТИ-2019, ФТИ-2018); VIII

Международная научная конференция «Актуальные проблемы физики твердого тела» (ФТТ-2018) (г. Минск, 24-28 сентября 2018 г.); VIII Байкальская Международная конференция «Магнитные материалы. Новые технологии» (г. Иркутск, 24–28 августа 2018 г.); Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли» (8-10 августа 2018 г.); XXIII Международная конференция «Новое в магнетизме и магнитных материалах» (НМММ- XXIII) (г. Москва, 30 июня – 5 июля 2018 г.); 20th International Conference on Composite Structures (ICCS20) (4-7 September 2017); Moscow International Symposium on Magnetism (MISM) (Moscow, 1-5 July, 2017).

**Связь работы с научными программами и проектами.** В основу диссертации положены результаты исследований по следующим научно-исследовательским программам и проектам:

ЕГСУ № АААА-А20-120072190018-7 проект № FZGM-2020-007 «Нелинейные явления в функциональных и конструкционных гетероструктурах на основе оксидных систем», в рамках базовой части государственного задания (2020-2022 г.).

ЕГИСУ № АААА-А19-119091790020-9 РФФИ № 19-42-363011 p\_мол\_a Функциональные тонкопленочные наноконпозиционные покрытия ферромагнитный металл-диэлектрик для пространственно-структурированных радиопоглощающих сред (2018-2021г.).

ЕГИСУ № АААА-А16-116051810136-7 РФФИ № 16-42-360483 p\_a Разработка 3D активных структур с повышенной индукционной составляющей для адсорбции электромагнитного излучения в гигагерцовой области частот (2016-2018).

ЕГИСУ № 01201375357 РФФИ № 13-02-97511 p\_центр\_a «Магнитные свойства тонкопленочных многослойных гетерогенных структур на основе наноконпозитов металл-диэлектрик» (2013-2015 г.).

#### **Личный вклад автора**

Обсуждение полученных результатов и подготовка работ к печати проводились при участии доктора физико-математических наук, доцента Ситникова Александра Викторовича, доктора физико-математических наук, профессора Калинина Юрия Егоровича.

Автор принимал непосредственное участие в синтезе образцов, при анализе, систематизации, обсуждении результатов и подготовке статей к публикации. Экспериментальные данные по исследованию электрических, магнитных и адсорбционных свойств структур с функциональным покрытием на основе наноконпозитов, представленные в диссертации, получены автором лично.

### Публикации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 15 научных работах, входящих в перечень ВАК, среди которых 7 статей, опубликованных в ведущих рецензируемых изданиях, индексируемых базами данных Web of Science и Scopus и получен патент РФ на полезную модель.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 148 наименований. Основная часть работы изложена на 144 страницах, содержит 79 рисунков и 17 таблиц.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, описаны объекты исследования, отмечены новизна и практическая значимость диссертационного исследования, описаны основные результаты и положения, выносимые на защиту, приводятся апробация работы, количество публикаций и структура работы.

**В первой главе** выполнен обзор литературы по теме диссертации, даны краткие сведения о структуре и свойствах нанокompозитов, магнитных явлениях в гетерогенных наноструктурированных системах и многослойных структур на их основе, приведены абсорбционные свойства наногранулированных композиционных структур.

**Во второй главе** представлены используемые в диссертации методики получения тонкопленочных нанокompозитов металл-диэлектрик и многослойных систем на их основе и исследования их структурных, электрических и магнитных свойств.

Для исследования намагниченности гранулированных нанокompозитов многослойных систем на их основе применялась установка вибрационного магнетометра. Для определения комплексной магнитной проницаемости в диапазоне частот от 15 до 250 МГц использовали измеритель добротности E9-5A. Аналогичные исследования в диапазоне частот 0.5-10 ГГц выполнены с помощью ВЧ генератора и анализатора спектра. Для исследования электромагнитных свойств образцов, использовали однорупорный метод, двухрупорный и однорупорный в геометрии Солсбери. Измерения проводили с использованием рупорных антенн с широкой полосой излучения П6-126. Коэффициент отражения  $S_{11}$  и коэффициент прохождения  $S_{21}$  был измерен с помощью векторного анализатора Agilent E8363B.

Методом ионно-лучевого напыления были получены три вида образцов. Пленки композитов  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$  и многослойных гетерогенных структур  $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}]/[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}+\text{O}_2]\}_n$  на поверхности ситалловых подложек. Варьировались состав и величина парциального давления кислорода при осаждении прослойки композита  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}+\text{O}_2$  и многослойных гетерогенных структур



$\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}]/[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}+\text{O}_2]\}_n$  пленки были получены на поверхности ситалловых подложек. Параметры напыления представлены в табл. 1.

*Параметры получения композитов и многослойных структур Таблица 1*

№ п/п	Партия	$t_1$ , с	$P_{\text{Ar}} \times 10^{-4}$ , Торр	$t_2$ , с	$P_{\text{Ar}} \times 10^{-4}$ , Торр	$P_{\text{O}_2}$ , пар. %	n
1	$(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$	18000	6	-	-	0	1
2	$(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$			18000	6	4.3	1
3	$\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}]/[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}+\text{O}_2]\}_n$	47	6	15	6	4.3	176
4	$\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}]/[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}+\text{O}_2]\}_n$	47	6	15	6	5.3	178
5	$\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}]/[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}+\text{O}_2]\}_n$	47	6	15	6	10.5	176
6	$\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}]/[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}+\text{O}_2]\}_n$	47	6	15	6	16.6	176

$t_1$  - время одного цикла напыления в атмосфере Ar,  $t_2$  - время одного цикла напыления в атмосфере Ar+O<sub>2</sub>, n – количество циклов напыления  $t_1+t_2$ .

Для подтверждения слоистой структуры полученных образцов были проведены ПЭМ исследования поперечного сечения пленки  $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{60}(\text{SiO}_2)_{40}]/[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{60}(\text{SiO}_2)_{40}+\text{O}_2]\}_n$  (рис.1).

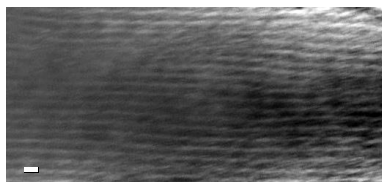


Рис. 1 Микрофотография поперечного сечения пленки многослойной гетерогенной структуры  $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{60}(\text{SiO}_2)_{40}]/[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{60}(\text{SiO}_2)_{40} + \text{O}_2]\}_{176}$ , полученных при циклическом напылении в атмосфере Ar 47сек и при добавлении O<sub>2</sub> (4.3 пар. %) в течение 15 сек

Пленки композитов  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$  и многослойных гетерогенных структур  $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}]/[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}+\text{O}_2]\}_n$  были нанесены на поверхность стеклоткани. Размер полотна составлял 1050x300 мм<sup>2</sup>. Использовалась оригинальная методика крепления подложки. Напыление проводилось при медленном вращении карусели (один оборот в течение 10 часов) и циклическом напуске реактивного газа (O<sub>2</sub>). Величина парциального давления кислорода при осаждении прослойки композита  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}+\text{O}_2$  составляла 0%, 8.3% и 13.3%. Напыление проводилось два раза по ~ 480 минут с двух сторон полотна стеклоткани. Использовались два вида стеклоткани с параметрами плетения 700x700 мкм (тип 1) и 350x3300 мкм (тип.2). Диаметр стеклонитей составлял ~ 7 мкм (рис.2). Распределение пленки на поверхности стеклонитей показаны на рис. 3

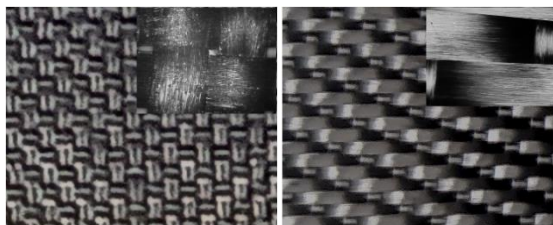


Рис. 2 Стеклоткань типа 1 и типа 2 (табл.3).

Стеклоткань с функциональным покрытием разрезалась на 3 части, из которых формировался стеклотекстолит согласно оригинальному технологическому процессу. Характеристики образцов стеклотекстолита представлены в табл. 2.

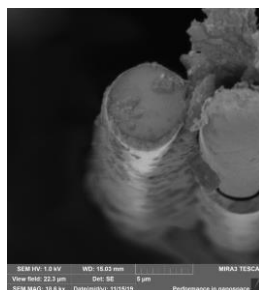


Рис. 3 - РЭМ микрофотография сечения стеклоткани с пленкой нанопокрытия  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}$

*Параметры стеклотекстолита с функциональным тонкопленочным покрытием*

*Табл. 2*

Состав пленки	Парциальное давление $\text{O}_2$ , %	Вид стекло-ткани	Количество слоев стеклоткани	Суммарная толщина пленки комп., мкм	Толщина стеклотекстолита, мм
$(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}$	0	1	3	3	0.4
$\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}]/[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}+\text{O}_2]\}_n$	8.3	1	3	3	0.4
$\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}]/[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}+\text{O}_2]\}_n$	13.3	1	3	3.6	0.4
$\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}]/[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}+\text{O}_2]\}_n$	13.3	2	3	3	0.7

Пленки композитов  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$  были нанесены на поверхность лавсановой пленки. Размер подложки составлял  $297 \times 420 \times 0.125 \text{ мм}^3$ . Для этого использовалась оригинальная методика крепления подложки и напыления, аналогичные в случае напыления на поверхность стеклоткани. Варьировался состав композита путем изменения количества навесок  $\text{SiO}_2$  на поверхности пластины сплава  $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$ . Образцы гетерогенного покрытия имели 72.4 ат.%, 66.1 ат.%, 58.5 ат.%, 53.1 ат.% и 47.6 ат.% металлической фазы, а толщина пленки составляла 1.7 мкм, 1.5 мкм, 1.4 мкм, 1.5 мкм, 1.4 мкм и 1.4 мкм, соответственно. Параметры напыления представлены в табл. 5 и 6.

Методом лазерной резки на поверхности лавсана формировался квазифрактальный рисунок частично-избирательной решетки (рис. 4 и 5). Перфорированная пленка с рисунком ламинировалась и общая толщина образца составляла  $\sim 0.4 \text{ мм}$ .

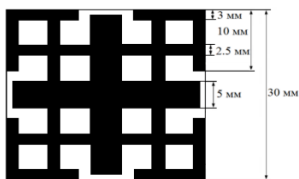


Рис. 4 Топология элементарной ячейки частотно-избирательной решетки с крестообразной формой элементов

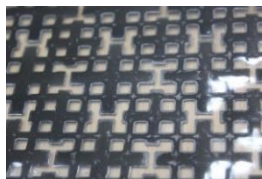


Рис. 5 Структура образца после лазерной резки

**Третья глава** посвящена изучению электрических и магнитных свойств композитов  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$  и многослойных структур  $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}]/[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}+\text{O}_2]\}_n$ .

Исследования полученных гетерогенных тонкопленочных структур показали, что их электрические свойства зависят от соотношения металлической и диэлектрической фаз, элементного состава пленки, степени окисления диэлектрической и металлической фаз, структурных особенностей композитов и т.д. На рис. 6 представлены значения  $\rho(x)$  для композитов  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$  и многослойных гетерогенных структур  $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}]/[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}+\text{O}_2]\}_n$ . Из рисунка видно, что величина  $\rho$  наиболее сильно зависит от концентрации металлической фазы и изменяется на 6 порядков величины при изменении  $x$  от 20 ат. % до 70 ат. %. Добавление кислорода 4,3 пар. % более чем на порядок увеличивает значения  $\rho$ , а циклическое добавление  $\text{O}_2$  не столь значительно влияет на удельное электрическое сопротивление, хотя данным изменением пренебрегать нельзя.

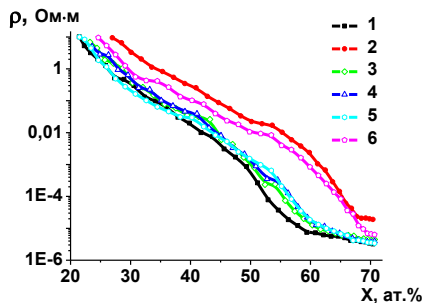


Рис. 6 Концентрационные зависимости удельного электрического сопротивления композитов  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ , полученных в атмосфере Ar (кривая 1), в атмосфере Ar с добавлением  $\text{O}_2$  (4,3 пар. %) (кривая 2), многослойных гетерогенных структур  $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}]/[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}+\text{O}_2]\}_n$ , полученных при циклическом напылении в атмосфере Ar в течение 47 сек и при добавлении  $\text{O}_2$  (4,3 пар.% - кривая 3), (5,3 пар. % - кривая 4), (10,5 пар.% - кривая 5), (16,6 пар. % - кривая 6) в течение 15 сек

Для практического использования пленок композита в области высоких частот оценивали толщину скин-слоя исследуемых материалов.

$$\Delta_{max} = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (1)$$

Оценка соответствует не магнитной пленке и  $\Delta$  считали максимальным. Проведенные расчеты показали, что минимальная толщина скин-слоя на частоте

10 ГГц составляет величину  $\sim 10$  мкм, что существенно меньше толщины исследуемых пленок.

Оценку мнимой части диэлектрической проницаемости  $\epsilon''$  для данных пленок оценивали с помощью выражения:

$$\epsilon'' = \frac{1}{\rho \epsilon_0 2\pi f}. \quad (2)$$

Оценка показала, что в области концентраций  $x > 50$  ат.% для всех приведенных структур  $\epsilon''$  значительное, более 10 000 для  $f=1$  ГГц. Значение величины  $\mu$  не может достигать подобных значений. Следовательно, волновое сопротивление  $Z$  композита и воздушного пространства не может быть согласовано. Для доказательства данных рассуждений были измерены значения  $\mu'(x)$ ,  $\mu''(x)$  для исследуемых образцов (рис.7).

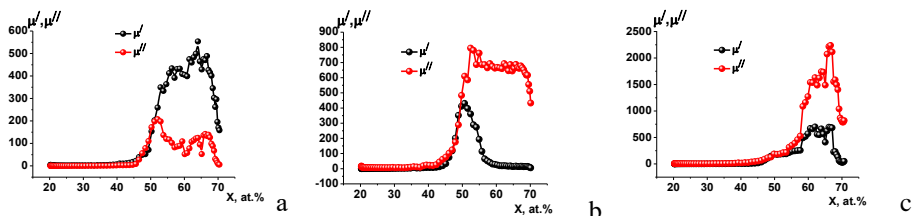


Рис. 7 Концентрационные зависимости действительной и мнимой частей комплексной магнитной проницаемости композитов  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$  (а) многослойных структур  $\{[(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}]/[(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}+\text{O}_2]\}_{176}$ , полученных при циклическом напылении в атмосфере Ag в течение 47 сек и при добавлении  $\text{O}_2$  4.3 пар. % (b), при добавлении  $\text{O}_2$  16.6 пар.% (c). Измерения проводились на частоте 50 МГц

Оценка волнового сопротивления исследуемых образцов согласно уравнению (3) приведена на рис. 8.

$$Z = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu}{\epsilon_0 \epsilon}}, \text{ Ом} \quad (3)$$

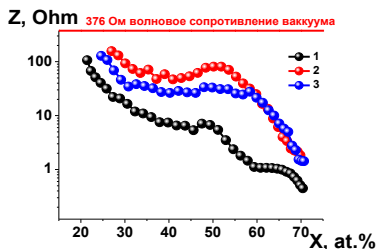


Рис. 8. Концентрационные зависимости волнового сопротивления композитов  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ , полученных в атмосфере Ag (кривая 1), многослойных гетерогенных структур  $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}]/[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}+\text{O}_2]\}_n$ , полученных при циклическом напылении в атмосфере Ag в течение 47сек и при добавлении  $\text{O}_2$  4.3 пар.% (кривая 2), 16.6 пар.% (кривая 3) в течение 15 сек., для 50 МГц

Видно, что пленки многослойной структуры  $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}]/[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}+\text{O}_2]\}_n$ , полученные при циклическом добавлении кислорода с давлением  $\sim 4.3$  пар.%, в области концентраций металлической фазы от 40 ат.% до 60 ат.% имеют

наибольшее значение волнового сопротивления и наименьшее значение коэффициента отражения по сравнению с наноккомпозитом  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$  и многослойными структурами полученными при больших парциальных давлениях кислорода на частоте 50 МГц, что связано с максимальным значением произведения удельного электрического сопротивления на магнитную проницаемость исследуемых неоднородных систем. Однако в диапазоне концентраций  $x$  от 22 ат.% до 70 ат.% значения  $Z$  гетерогенных структур ниже, чем волновое сопротивление воздушного пространства.

Измерения процессов намагничивания наноккомпозиционных покрытий на стеклоткани и пленки лавсана показали, что пленки в значительной мере изотропны в плоскости подложки (см. табл. 3 и 4).

*Значения коэрцитивной силы и поля выхода намагниченности в насыщение вдоль ( $H_c^{\parallel}$ ,  $H_a^{\parallel}$ ) и перпендикулярно основы плетения ( $H_c^{\perp}$ ,  $H_a^{\perp}$ )* Таблица 3

Состав	Парциальное давление $\text{O}_2$ , %	$H_c^{\parallel}$ , Э	$H_a^{\parallel}$ , Э	$H_c^{\perp}$ , Э	$H_a^{\perp}$ , Э
$(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}$	0	8	182,3	8	105,3
$\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}]/[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}+\text{O}_2]\}_n$	8.3	12	102,3	14	155,6
$\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}]/[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}+\text{O}_2]\}_n$	13.3	7	191,2	8	155,6
$\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}]/[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}+\text{O}_2]\}_n$	13.3	6	155,6	5	128,9

*Значения коэрцитивной силы и поля выхода намагниченности в насыщение наноккомпозитов в плоскости пленки вдоль оси образца ( $H_c^{\parallel}$ ,  $H_a^{\parallel}$ ), а также в плоскости пленки перпендикулярно оси образца ( $H_c^{\perp}$ ,  $H_a^{\perp}$ )* Таблица 4

Состав	$H_c^{\parallel}$ , Э	$H_a^{\parallel}$ , Э	$H_c^{\perp}$ , Э	$H_a^{\perp}$ , Э
$(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{47,6}(\text{SiO}_2)_{52,4}$	2.5	6	2.5	18
$(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{53,1}(\text{SiO}_2)_{46,9}$	4.5	5	2.5	11
$(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}$	5	8	5	10
$(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{66,1}(\text{SiO}_2)_{33,9}$	6	7	6	10.5
$(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{66,1}(\text{SiO}_2)_{33,9}$	6.5	6	4	10
$(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{72,4}(\text{SiO}_2)_{27,6}$	6.2	9	5.2	12

Видно, что величина  $H_a$  композитов на стеклотканной подложке значительно больше, чем на лавсановой, что может быть связано с фрагментарным характером нанесения пленки на стеклонити (см. рис. 3). В этом случае размер частичек пленки задается диаметром стеклонити (~7 мкм) и шагом плетения стеклоткани (700x700 мкм). Исследование кривых намагничивания на нитях, извлеченных из стеклоткани, вдоль и поперек оси подтвердило наши предположения о наличии магнитной анизотропии формы фрагментов ферромагнитной пленки осажденной на поверхность стеклоткани (рис. 9).

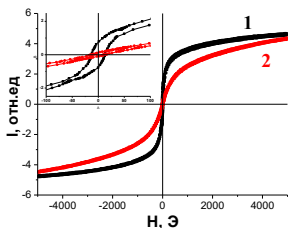


Рис. 9 – Кривые намагничивания для пленки многослойной структуры  $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}]/[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}+\text{O}_2]\}_n$ , полученных при циклическом напылении в атмосфере Ar в течение 45 сек и при добавлении  $\text{O}_2$  13.3 пар.%. Кривые 1 – вдоль стеклонити, 2 – перпендикулярно стеклонити

Параметр магнитной анизотропии (4) оказывает существенное влияние на частоту естественного ферромагнитного резонанса.

$$f_{\text{рез}} = 2\pi\nu\sqrt{H_a 4\pi M_S}. \quad (4)$$

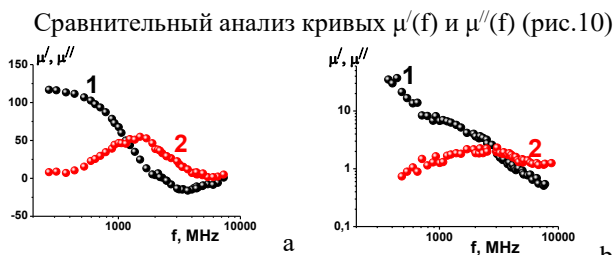


Рис. 10 – Частотные зависимости  $\mu'$  (1),  $\mu''$  (2) для пленки нанокompозита  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{66,1}(\text{SiO}_2)_{33,9}$  на лавсановой подложки (а) и многослойной структуры  $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}]/[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}+\text{O}_2]\}_n$ , полученных при циклическом напылении в атмосфере Ar в течение 45 сек и при добавлении  $\text{O}_2$  13.3 пар. %, в течение 15 сек на поверхности стеклоткани (б)

Сравнительный анализ кривых  $\mu'(f)$  и  $\mu''(f)$  (рис.10) показал, что осажденные пленки нанокompозита на поверхность стеклоткани имеют большую частоту естественного ферромагнитного резонанса и ширину максимума на кривой зависимости мнимой части комплексной магнитной проницаемости от частоты относи-

тельно данных параметров для образцов на гладкой поверхности, что связано с наличием магнитной анизотропии формы фрагментов пленки на поверхности стеклонитей.

**Четвертая глава** посвящена изучению высокочастотных свойств (СВЧ) композитов  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$  и структур на их основе.

Проведены измерения коэффициента отражения (R) однорупорным методом от стеклотекстолита с нанесенным функциональным покрытием из нанокompозита  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}$ , многослойных структур  $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}]/[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}+\text{O}_2]\}_n$  и квазифрактальных структур на лавсановой поверхности с функциональным покрытием на основе композитов  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ . Обобщение полученных зависимостей в координатах R от  $\rho$  функциональных тонкопленочных покрытий представлено на рис. 11.

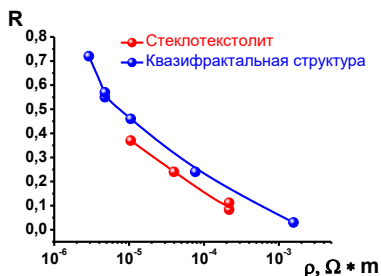


Рис. 11 Зависимости коэффициента отражения исследуемых ВЧ структур от удельного электрического сопротивления функциональных нанокomпозиционных покрытий

Данный эффект можно объяснить исходя из геометрических особенностей образцов. В случае квазифрактальной структуры аппликации проводящего

материала были нанесены на гладкую поверхность и соизмеримы с длиной падающей электромагнитной волны (лавсан) и сами являются границей раздела сред. В этом случае волновое сопротивление ( $Z=376(\mu/\epsilon)^{1/2}$ ) в основном определяется мнимой частью диэлектрической проницаемости проводника (пленки композита), которая пропорциональна его удельному сопротивлению. В случае напыления на стеклоткань, проводящие области локализованы на поверхности стекловолокон, распределены в пространстве и имеют размеры гораздо меньше длины волны. Поэтому, диэлектрическую компоненту (составляющей) данной среды, можно характеризовать, как эффективную диэлектрическую проницаемость ( $\epsilon_{эф}$ ) мелкодисперсной смеси двух компонент. Существуют многочисленные подходы к расчету гомогенных матричных смесей, например выражение Лихтенекера:

$$\ln \epsilon_{эф} = x_1 \ln \epsilon_1 + (1 - x_1) \ln \epsilon_2, \quad (5)$$

где,  $x_1$  – объемная доля композита,  $\epsilon_1$  – диэлектрическая проницаемость композита,  $\epsilon_2$  – диэлектрическая проницаемость стеклоткани и связующего. К сожалению, в нашем случае система в высокой степени гетерогенна и представляет собой слоистую структуру, где значительно изменяется параметр заполнения островками проводящей композиционной пленки диэлектрической матрицы. Такая ситуация теоретически не исследована. Однако, общий вывод из теоретических работ, посвящённых расчету  $\epsilon_{эф}$  гомогенных матричных смесей, о том, что  $\epsilon_{эф}$  гораздо меньше, чем  $\epsilon$  компонента с высоким значением диэлектрической проницаемости, можно считать вполне оправданными для исследуемых структур. Это позволяет объяснить низкие значения отражающей способности образцов стеклотекстолита более низкими значениями эффективной диэлектрической проницаемости последних относительно пленочных покрытий с квазифрактальной структурой функционального слоя нанокomпозита  $(Co_{40}Fe_{40}B_{20})_x(SiO_2)_{100-x}$ , осажденного на лавсановую поверхность.

Проведены измерения коэффициента поглощения ( $L$ ) для исследуемых образцов двухрупорным методом. Анализ зависимостей  $L$  от  $\rho$  функциональных пленок (рис.12), показал возможности оптимизировать данный параметр путем изменения  $\rho$ .

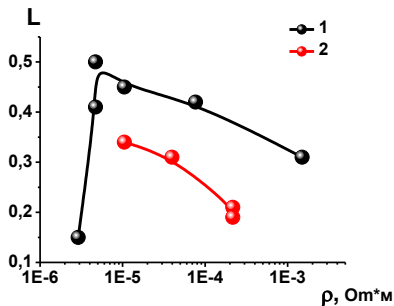


Рис. 12. Зависимости коэффициента поглощения на частоте 4 ГГц квазифрактальных структур (1) и стеклотекстолита (2) от  $\rho$  функциональных покрытий на основе нанокompозитов  $(Co_{40}Fe_{40}B_{20})_x(SiO_2)_{100-x}$

Проведены измерения коэффициента поглощения для исследуемых образцов однорупорным методом в геометрии Солсбери (рис.13), показали значительные величины  $L$

при ненулевых зазорах между образцом и отражающей поверхностью.

С другой стороны, отсутствие зазора (образец находится в пучности магнитного поля отраженной электромагнитной волны) практически уменьшало поглощение всех исследуемых материалов до незначительных величин. Это дает нам основание утверждать, что основной вклад во взаимодействие электромагнитного излучения с функциональным покрытием образцов на основе нанокompозитов  $(Co_{40}Fe_{40}B_{20})_x(SiO_2)_{100-x}$  в диапазоне частот 1-10 ГГц происходит за счет электрической составляющей электромагнитной волны.

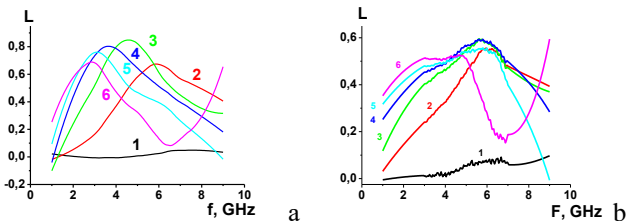


Рис. 13. Частотные зависимости  $L$  стеклотекстолита (а), с тонкпленочным покрытием на основе нанокompозита  $(Co_{40}Fe_{40}B_{20})_{58,5}(SiO_2)_{41,5}$  и квазифрактальных структур на лавсановой подложке с функциональным покрытием из пленки композита  $(Co_{40}Fe_{40}B_{20})_{66,1}(SiO_2)_{33,9}$  с толщиной прослойки: 1 – 0 мм; 2 – 4 мм; 3 – 8 мм; 4 – 12 мм; 5 – 16 мм; 6 – 20 мм

Анализ зависимостей  $L(f)$  для исследуемых образцов, измеренных в геометрии Солсбери показал, что спектр резистивного поглощения стеклотекстолита с нанесенным функциональным покрытием из

нанокompозита  $(Co_{40}Fe_{40}B_{20})_{58,5}(SiO_2)_{41,5}$  и многослойных структур  $\{[(Co_{40}Fe_{40}B_{20})_{58,5}(SiO_2)_{41,5}] / [(Co_{40}Fe_{40}B_{20})_{58,5}(SiO_2)_{41,5}+O_2]\}_n$  характеризуется широким Гауссовым пиком на частоте 5 ГГц (рис 14а). Квазифрактальные структуры на лавсановой поверхности с функциональным покрытием на основе композитов  $(Co_{40}Fe_{40}B_{20})_x(SiO_2)_{100-x}$  характеризуются суперпозицией двух Гауссовых кривых (рис 14б) с резонансной частотой 4 ГГц и 7 ГГц (рис



15), что связано со структурными особенностями пространственного распределения и фрагментации функционального покрытия, а величина поглощения - с удельным электрическим сопротивлением гетерогенных пленок.

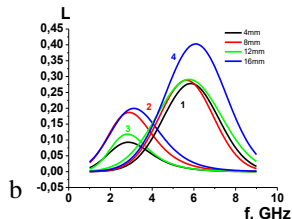
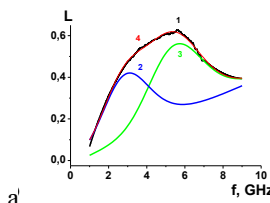
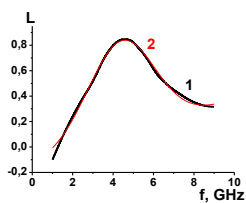


Рис. 14. Частотные зависимости  $L$  стеклотекстолита (а), с тонкопленочным покрытием нанокомпозита  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}$  и квазифрактальных структур на лавсановой подложке с функциональным покрытием из пленки композита  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{66,1}(\text{SiO}_2)_{33,9}$  (б), с толщиной прослойки 8 мм (1), рассчитанные резонансные кривые Гауссовым распределением (2, 3) и аппроксимационная зависимость (4)

Рис. 15. Аппроксимация частотной зависимости  $L$  квазифрактальных структур с функциональным покрытием из пленки композита  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{66,1}(\text{SiO}_2)_{33,9}$  на лавсановой подложке с толщиной прослойки: 1 – 4 мм; 2 – 8 мм; 3 – 12 мм; 4 – 16 мм

Сопоставление значений  $L$ , измеренных двухрупорным методом и в геометрии экрана Солсбери (с учетом двух прохождений волны через образец в последнем случае), представлено в таблицах 5 и 6. Видно, что для образцов стеклотекстолита (табл. 5)  $2L \approx L_{\text{Сол}}$ , следовательно, мы в основном наблюдаем собственное резистивное поглощение электромагнитной волны. В случае лавсановой поверхности с функциональным покрытием на основе композитов  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_X(\text{SiO}_2)_{100-X}$  прямое сопоставление не является корректным, так как частотные зависимости  $L$  описываются двумя Гауссовыми кривыми. Мы провели разложение  $L(f)$  для зависимостей, измеренных двухрупорным методом и однорупорным в геометрии экрана Солсбери. Однако простая аппроксимация  $2L \approx L_{\text{Сол}}$  не выглядит достаточно убедительной (табл. 6). По этой причине можно предположить, что в данном случае имеет место значимое влияние интерференционного взаимодействия волн, отраженных от поверхности образца и металлического экрана.

*Параметры  $2L$  и  $L_{\text{Сол}}$ , для стеклотекстолита, изготовленного из стеклоткани с тонкопленочным покрытием на основе нанокомпозита  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}$ , измеренные двух рупорным методом и в геометрии Солсбери*

Таблица 5

Состав	Парциальное давление $\text{O}_2$ , %	$2L$	$L_{\text{Сол}}$
$(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}$	0	0,78	0.84
$\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}]/[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}+\text{O}_2]\}_n$	8.3	0,74	0.76
$\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}]/[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}+\text{O}_2]\}_n$	13.3	0,50	0.52
$\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}]/[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}+\text{O}_2]\}_n$	13.3	0,46	0.53

Параметры  $2L$  и  $L_{\text{Сол}}$ , для квазифрактальных структур с функциональным покрытием на основе композитов  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ , измеренные двух рулонным методом и в геометрии Солсбери

Таблица 6

Состав	$2L$ ,	$L_{\text{Сол}}$	$2L$ ,		$L_{\text{Сол}}$	
			4 ГГц	7 ГГц	3 ГГц	6 ГГц
$(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{72,4}(\text{SiO}_2)_{27,6}$	0.32	0.52	0.18		0.35	
$(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{66,1}(\text{SiO}_2)_{33,9}$	0.88	0.58	0.32	0.18	0.2	0.4
$(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{66,1}(\text{SiO}_2)_{33,9}$	1.3	0.54	0.34	0.46	0.17	0.23
$(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}$	0.96	0.63	0.24	0.24	0.32	0.3
$(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{53,1}(\text{SiO}_2)_{46,9}$	0.96	0.85	0.28	0.36	0.5	0.46
$(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{47,6}(\text{SiO}_2)_{52,4}$	0.86	0.37	0.36		0.37	

В **заключении** приведены основные результаты работы.

1. Разработан комплекс технологических приемов, позволяющий получить пленки нанокompозита  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}$  и многослойной структуры  $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}]/[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}+\text{O}_2]\}_n$  на поверхности стеклоткани размером до  $350 \times 300$  мм<sup>2</sup> с последующей формовкой образцов стеклотекстолита для высокочастотных электромагнитных измерений.

2. Разработан комплекс технологических приемов, позволяющий получить образцы квазифрактальной структуры с нанесенным функциональным покрытием из нанокompозита  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$  на поверхности лавсана размером до  $400 \times 400$  мм<sup>2</sup> для высокочастотных электромагнитных измерений.

3. Пленки многослойной структуры  $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}]/[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}+\text{O}_2]\}_n$ , полученные при циклическом добавлении кислорода, имеют меньшую величину волнового сопротивления и большую толщину скин-слоя, чем нанокompозит  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ , однако в диапазоне концентраций  $x$  от 22 ат.% до 70 ат.% значения  $Z$  гетерогенных структур ниже, чем волновое сопротивление воздушного пространства.

4. Выявлено, что наличие магнитной анизотропии формы в случае нанесения композиционной пленки на стеклонити стеклотканной поверхности, увеличивают частоту естественного ферромагнитного резонанса и уширяют максимум на кривой мнимой части комплексной магнитной проницаемости от частоты относительно данных параметров пленки, нанесенной на гладкую поверхность.

5. Фрагментация пленок нанокompозита  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}$  и многослойной структуры  $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}]/[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}+\text{O}_2]\}_n$  на поверхности стеклоткани и распределение ее по толщине образца стеклотекстолита значительно понизило вклад проводящей фазы в эффективную диэлектрическую по причине значительно больших значений диэлектрической проницаемости пленок по сравнению с магнитной.

6. Выявлено, что основное взаимодействие электромагнитного излучения с функциональным покрытием образцов на основе нанокompозитов

$(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$  в диапазоне частот 1-10 ГГц происходит за счет электрической составляющей электромагнитной волны по причине значительно больших значений диэлектрической проницаемости пленок по сравнению с магнитной.

7. Показано, что максимальное поглощение в квазифрактальных структурах функционального покрытия наблюдается при толщине пленки нанокomпозитов  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$  1.4 мкм, удельном электрическом сопротивлении 4.75 Ом·м и ограничено значением 0.5 по причине высокого коэффициента отражения от поверхности образца.

8. Обнаружено, что в диапазоне частот 1 – 10 ГГц спектр резистивного поглощения стеклотекстолита с нанесенным функциональным покрытием из нанокomпозита  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}$  и многослойных структур  $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}]/[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}+\text{O}_2]\}_n$  характеризуется широким Гауссовым пиком на частоте 5 ГГц. Квазифрактальные структуры на лавсановой поверхности с функциональным покрытием на основе композитов  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$  характеризуются суперпозицией двух Гауссовых кривых с резонансной частотой 4 ГГц и 7 ГГц, что связано со структурными особенностями пространственного распределения и фрагментации функционального покрытия, а величина поглощения определяется удельным электрическим сопротивлением гетерогенных пленок.

9. Показано, что адсорбционные свойства образцов, измеренных в геометрии экрана Солсбери, в диапазоне частот 1 – 10 ГГц для стеклотекстолита с нанесенным функциональным покрытием из нанокomпозита  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}$  и многослойных пленок  $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}]/[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}+\text{O}_2]\}_n$  хорошо описываются в рамках собственного резистивного поглощения. При интерпретации зависимостей поглощения для квазифрактальных структур на лавсановой поверхности с функциональным покрытием на основе композитов  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$  обнаружено значимое влияние интерференционного взаимодействия волн, отраженных от поверхности образца и металлического экрана.

### **Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах, рекомендованных ВАК РФ, 8-14 публикации индексируемые базами данных Web of Science и Scopus:**

1. Высокочастотная магнитная проницаемость однослойных и многослойных нанокomпозитов  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$  Тарасова О.С. и др. Физика твердого тела. 2016. Т. 58. № 12. С. 2365-2368.

2. Влияние окисленных прослоек на магнитные свойства многослойных пленок на основе нанокomпозитов аморфный ферромагнетик-диэлектрик Тарасова О.С. и др. Физика твердого тела. 2016. Т. 58. № 5. С. 910-916.

3. Высокочастотные свойства многослойных систем на основе нанокomпозитов  $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$  и  $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$  О.С.Тарасова и

др. Перспективные материалы, Издательство: ООО "Интерконтакт Наука" Москва, 2015 №5, С 42-49.

4. Высокочастотные магнитные свойства стеклотекстолита с нанокomпозиционным функциональным тонкопленочным покрытием  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ , О.С. Тарасова и др. Материаловедение, 2018 Вып. 10, С 18-22.

5. Структура и электрические свойства многослойных пленок на основе композитов ферромагнетик-диэлектрик, О.С. Тарасова и др., Вестник Воронежского государственного технического университета, 2015 Т.11. №5, С 100-108.

6. Высокочастотные магнитные свойства многослойных гетерогенных пленок на основе нанокomпозитов ферромагнитный металл-диэлектрик, О.С. Тарасова и др, Вестник Воронежского государственного технического университета, 2015 Т.11. №5, С 112-119.

7. Магнитостатические и магнитодинамические свойства многослойных систем на основе нанокomпозитов  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ , О.С. Тарасова и др., Вестник Воронежского государственного технического университета, 2016 Т.12. №6, С 30-37.

8. Magnetic properties of nanocomposites metal-carbon, Tarasova, O. and etc, Solid State Phenomena [this link is disabled](#), (2015) Vol.233-234, pp. 538–541.

9. High-frequency properties of multilayer systems based on the  $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$  and  $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)$  nanocomposites, Tarasova, O. and etc, Solid State Phenomena, (2015), 233-234, p. 467–470

10. High-Frequency Magnetic Properties of Glass-Reinforced Plastic Laminate with Deposited Functional Thin-Film Coating Based on  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$  Nanocomposite, Tarasova, O.S., and etc, Inorganic Materials: Applied Research [this link is disabled](#), (2019), Vol. 10(4), pp. 812–817.

11. Magnetodynamic properties of spatially distributed films based on a metal-dielectric composite, O. S. Tarasova, and etc, Physics, Technologies and Innovation (PTI-2017) AIP Conf. Proc. Vol. 1886, P.020051-1–020051-4.

12. Creation of Broadband Radio-Absorbing Structures Based on Frequency-Selective Gratings with Distributed Losses, O. S. Tarasova, and etc, Physics, Technologies and Innovation (PTI-2018), AIP Conf. Proc. Vol. 2015, P.020101-1–020101-5.

13. High-frequency properties of a fractal-like structure of a frequency-selective lattice with a distributed resistive load based on a nanocomposite  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$  film, Tarasova, O.S., and etc, AIP Conference Proceedings [this link is disabled](#), (2019), Vol. 2174, pp. 020258.

14. Magnetic Properties of  $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$  Nanocomposites near the Percolation Threshold, Tarasova, O.S., and etc, Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics [this link is disabled](#), (2019), Vol. 83. Iss. 7, p. 835–837.

## Результаты интеллектуальной деятельности

1. Патент 209860 U1 Российская Федерация, СПК H01Q 17/00 (2022.01). Тонкий сверхширокополосный поглотитель электромагнитного излучения / О.С. Тарасова, А.В. Ситников, В.А. Пендюрин; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ВГТУ». -№ 2021104827; заявл. 25.02.2021; опублик.23.03.2022 Бюл. №9.

## Список цитируемой литературы

1. P. W. Haycock, M. F. Chioncel, J. Shah // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. –2002. – № 242. – P. 1057.
2. H. M. Lu, W. T. Zheng and Q. Jiang // *J. Phys. D: Appl. Phys.* –2007. – № 40. – P. 320.
3. M. Ohtake, O. Yabuhara, J. Higuchi, M. Futamoto // *Journal of Appl.Phys.* . – 2011. – № 109. – P. 07C105 –1.
4. J. I. Wong, L. Ramirez, A. G. Swartz, A. Hoff, W. Han, Y. Li, R. K. Kawakami // *Phys. Rev. B.* – 2010. –№ 81. – P.094406 – 1.
5. A. Munoz–Martin, C. Prieto, C. Ocal , J.L. Martinez // *Scripta mater.* – 2000. –№ 43. –P. 919.
6. W.T. Wang, D.Y. Guan, G. Yang, G.Z. Yang, Y.L. Zhou, H.B. Lu, Z.H. Chen // *Thin Solid Films.* – 2005. – № 471. –P. 86.
7. H. Huang, G.H. Gilmer // *Computational Materials Science.* –2002. –№ 23. –P.190.
8. C.–W. Pao, S.M. Foiles, E.B. Webb, D. J. Srolovitz, J.d A. Floro // *Phys. Rev. B.* – 2009. – №79, – P. 224113–1.
9. J. Lintymer, N. Martin, J.–M. Chappe, J. Takadom // *Wear.* –2008. –V. 264. –P. 444.
10. B. G. Priyadarshini, S. Aich, M. Chakraborty // *J. Mater. Sci.* – 2011. –V. 46. –P.2860.

Подписано в печать 29.04.2022  
Формат 60x84/16. Бумага для множительных аппаратов.  
Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.  
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»  
394026 Воронеж, Московский просп., 14