

На правах рукописи

Ласёк Михаил Петрович

**СТРУКТУРА И СВЧ МАГНИТНЫЕ, ПРОВОДЯЩИЕ СВОЙСТВА
НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ КОМПОЗИТНЫХ И
МНОГОНАНОСЛОЙНЫХ ПЛЁНОК**

1.3.8. (01.04.07) – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Сыктывкар – 2021

Работа выполнена на кафедре радиофизики и электроники ФГБОУ ВО «Сыктывкарского государственного университета имени Питирима Сорокина».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор **Котов Леонид Нафанаилович**

Официальные оппоненты:

Коледов Виктор Викторович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, зам. заведующего НОЦ «Магнитоэлектроника & Нанозифика» Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Москва

Абдулвахидов Камалудин Гаджиевич, доктор физико-математических наук, доцент Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Южный Федеральный университет", г. Ростов-на-Дону

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет"

Защита состоится «17» декабря 2021 г. в 16 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.431.01 (Д 212.296.03) при ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет» по адресу: 454001, г. Челябинск, ул. Братьев Кашириных, 129.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Челябинского государственного университета; электронная версия автореферата доступна по адресу: <http://www.csu.ru>

Автореферат диссертации разослан _____ 2021 года

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.431.01 (Д 212.296.03),
доктор физ.-мат. наук, профессор

Беленков Е.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В текущем столетии происходят интенсивные исследования электрических и магнитных явлений в наноструктурированных тонких плёнках [1-9]. Многие физические явления в нанокompозитных системах ещё не получили ясной физической трактовки, так же, как и зависимости формируемых свойств от технологических параметров и структур. Интерес для исследований представляют собой электрические и магнитные свойства плёнок, а в связи с ними – микро- и наноструктуры этих плёнок и их размерные эффекты [10-15]. Вариации в широком диапазоне электрического сопротивления и высокая способность поглощения СВЧ излучения делает перспективным использование композитных плёнок в устройствах СВЧ магнитоэлектроники [16-19]. Знание сверхвысокочастотных магнитных и электрических свойств тонких композитных плёнок необходимо для объяснения механизмов электропереноса, поглощения СВЧ электромагнитных волн, понимания вклада в эти свойства нано- и микроструктуры композитных плёнок [20-22]. Развитие электронной техники требует уменьшения габаритов, снижения управляющих напряжений и повышения скорости срабатывания. Наблюдаемые в композитных и многослойных плёнках новые механизмы электропереноса, нелинейные эффекты при малых внешних воздействиях, изменение температур фазовых превращений и другие эффекты могут стать ключом для развития электроники [23-26]. Исследование плёнок с двумя проводящими (магнитный металл и углерод) фазами позволяет выявить новые механизмы изменения СВЧ магнитных и релаксационных свойств. Исследование спектров удельного импеданса при прохождении СВЧ-сигналов тока и электромагнитного поля в плёнках позволяет выявить особенности поведения электродинамических свойств, особенно в СВЧ-диапазоне, который широко используется в современной радиотехнике и связи. В диссертации поставлена задача нахождения плёнок с максимальным изменением удельного импеданса и магнитосопротивления при прохождении СВЧ тока через композитную плёнку, а также при намагничивании плёнок постоянным магнитным полем. При анализе результатов исследований необходимо установить наличие корреляции наблюдаемых характеристик с микро- и наноструктурой композитных плёнок.

Тема настоящей диссертационной работы соответствует перечню приоритетных направлений фундаментальных исследований, утвержденных Президиумом РАН (подраздел 1.2.5 — «Физика твердотельных наноструктур, мезоскопия»). Диссертационная работа является частью комплексных исследований, проводимых на кафедре радиофизики и электроники ФГБОУ ВО «Сыктывкарский государственный университет имени Питирима Сорокина» при финансовой поддержке грантов РФФИ (№№ 10-02-01327а, [13-02-01401-а](#), [17-02-01138-а](#)), госзадания Минобрнауки России №2014/217, а также за счет гранта Российского научного фонда (проект №21-72-20048).

Целью работы являлось установление фундаментальных закономерностей для СВЧ проводящих, магнитных свойств и нахождения связи с микро- и

наноструктурой металл-диэлектрических, металл-углеродных и многослойных плёнок: композит-полупроводник.

Для достижения поставленной цели надо было решить следующие задачи:

- Определить составы, толщины композитных метал-диэлектрических, метал-углеродных и многослойных плёнок с использованием электронно-сканирующей микроскопии. Получить изображения поверхности композитных плёнок методом магнито-силовой микроскопии.
- Провести измерения характеристик (ширины линии и резонансного поля) ферромагнитного резонанса (ФМР) композитных плёнок с различными металлическими и диэлектрическими фазами.
- Собрать установку и разработать методику измерений СВЧ импеданса тонких композитных и многослойных плёнок в диапазоне частот 0.1 ÷ 3.0 ГГц, которая должна работать при помещении плёнок в магнитное поле до 0.7 Тл. Получить спектры СВЧ импеданса композитных и многослойных плёнок при различных магнитных полях при комнатной температуре.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. В метал-диэлектрических композитных плёнках с толщиной более 600 нм обнаружены полосовая и сетчатая (зигзагообразная) микроструктуры с антипараллельным упорядочением магнитных моментов соседних областей.

2. Металл-диэлектрические плёнки (CoFeB+SiO₂) имеют один широкий пик поглощения в области ФМР, а плёнки с металлической и углеродной фазами (CoFeB+C) имеют два узких пика поглощения. Выявлено значительное сужение ширины линии ФМР в 10 раз и более за счёт уменьшения градиента концентраций магнито-металлической фазы в композитной плёнке.

3. СВЧ спектры удельного импеданса (полного сопротивления) композитных плёнок [(Co_{0.45}Fe_{0.45}Zr_{0.10})_x+(Al₂O₃)_y], [(Co_{0.44}Fe_{0.36}B_{0.2})_x+(SiO₂)_y], [(Co_{0.86}Nb_{0.12}Ta_{0.02})_x+(SiO₂)_y], где $y=(1-x)/5$ для Al₂O₃ и $y=(1-x)/3$ для SiO₂, $x=0.3 \div 0.75$ и многослойных плёнок композит/полупроводник: {[(Co_{0.86}Nb_{0.12}Ta_{0.02})_x+(SiO₂)_y]+[α-Si]}₅₆ в диапазоне частот 0.1÷3 ГГц. Разная форма спектров удельного модуля импеданса при разных концентрациях металлического сплава x связана с наличием различных механизмов проводимости: диэлектрического, промежуточного, металлического.

4. Получены спектры магнитосопротивления композитных плёнок [(Co_{0.43}Fe_{0.4}B_{0.17})_x+(SiO₂)_y] с концентрациями металлического сплава $x = 0.42 \div 0.86$ в диапазоне частот 0.1 ÷ 3.0 ГГц в постоянных магнитных полях до 0.7 Тл. В экспериментах постоянное магнитное поле и СВЧ ток были сонаправлены и лежали вдоль плоскости плёнки. Установлено наличие СВЧ гигантского отрицательного магнитосопротивления, достигающего 6% в композитных плёнках с $x=0.6$ при намагничивании постоянным магнитным полем 0.7 Тл. Большое значение отрицательного магнитосопротивления для СВЧ тока связано с разрушением полосовой антиферромагнитной структуры при намагничивании композитных плёнок постоянным магнитным полем.

Научная новизна работы

1. Обнаружены полосовая и сетчатая (зигзагообразная) микроструктуры с антипараллельным упорядочением магнитных моментов соседних областей в метал-диэлектрических композитных плёнках.

2. Обнаружены два узких пика поглощения в композитных плёнках с металлической и углеродной фазами (CoFeB+C). Выявлено значительное сужение (в 10 раз) ширины линии ФМР, которое связано с уменьшением градиента концентраций магнитометаллической фазы в композитных плёнках.

3. Получены СВЧ спектры коэффициента удельного импеданса (полного сопротивления) и магнитосопротивления композитных плёнок с различными металлическими и диэлектрическими фазами и многослойных плёнок: композит -полупроводник. Установлено наличие гигантского отрицательного СВЧ магнитосопротивления, достигающего 6% в композитных плёнках (CoFeB+SiO₂). Большое значение СВЧ отрицательного магнитосопротивления связано с наличием полосовой магнитной структуры в плёнках.

4. Обнаружено уменьшение ширины линии ФМР в 15 раз и более при замене диэлектрической матрицы на углеродную матрицу в композитных плёнках.

Практическая значимость работы

Разработана оригинальная методика и собрана установка для исследований СВЧ проводящих свойств композитных и многослойных плёнок, которые могут быть использованы для изучения СВЧ физических свойств широкого класса многофункциональных материалов, а также в учебном и в научном процессе при изучении фундаментальных вопросов взаимодействия СВЧ электромагнитного излучения с композитными и многослойными плёнками и структурами. Полученные результаты в диссертационной работе создают дополнительные методы диагностики микро- и наноструктуры и СВЧ магнитных, проводящих свойств различных тонких плёнок, а также открывают перспективы развития техники и технологии в получении наноконпозиционных материалов. Наличие эффекта гигантского отрицательного СВЧ магнитосопротивления в композитных плёнках $[(Co_{0.46}Fe_{0.4}B_{0.14})_x + (SiO_2)_y]$, для интервала концентраций $0.6 < x < 0.8$, может быть использовано для создания СВЧ устройств: диодов, переключателей, фильтров с регулируемой границей среза и т.д. Результаты диссертационной работы были использованы для выполнения проекта Российского Научного Фонда № 21-72-20048.

Достоверность, представленных в диссертации результатов, подтверждается их воспроизводимостью, надёжностью применённых методов исследования и обработки данных. Полученные результаты были признаны научной общественностью при обсуждениях на специализированных конференциях и опубликованы в рецензируемых научных журналах.

Личный вклад автора Результаты, изложенные в диссертации, получены автором лично, либо совместно с сотрудниками кафедры

радиофизики и электроники СыктГУ, причём при выполнении работ автором сделан определяющий вклад в постановку задач исследования, создание новых экспериментальных установок, проведение экспериментов, обработку результатов, моделировании СВЧ спектров полного сопротивления.

Апробация работы

Основные результаты работы и защищаемые положения диссертационной работы были доложены на конференциях: «Новое в магнетизме и магнитных материалах» (НМММ – 2012, 2021); «Релаксационные явления в твёрдых телах» (Воронеж, 2015, 2019); «Фазовые переходы и нелинейные явления в конденсированных средах» (Махачкала, 2015, 2017); Московском международном симпозиуме по магнетизму «MISM» (Москва, 2011, 2014, 2017), 5-ом европейско-азиатском симпозиуме «Trends in MAGnetism» (Владивосток, 2013); «Spin waves 2013» (Санкт-Петербург, 2013); «Functional Materials (ICFM'2013)» (Гаспра, Крым, 2013); «Современные проблемы радиоэлектроники» (Ростов-на-Дону, 2012); Всероссийской научной конференции студентов-радиофизиков (Санкт-Петербург, 2010, 2011); «Февральские чтения, СГУ им. Питирима Сорокина:» (Сыктывкар, 2017-2019); XIV и XIII Всероссийских школах-семинарах по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-14) (Екатеринбург, 2012, 2013); 3-ей Всероссийской научной конференции «Методы исследования состава и структуры функциональных материалов» (Новосибирск, 2020); II Всероссийской школе-семинаре молодых учёных (Махачкала, 2012).

Личный вклад автора состоит в разработке методик и проведение экспериментов по исследованию СВЧ удельного импеданса, измерению ФМР характеристик плёнок, разработке эквивалентных схем композитных плёнок, обсуждении результатов и оформлении их в виде научных публикаций.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 30 научных работ, в том числе: 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ и индексируемых базой Scopus; 2 статьи, индексируемых базой Web of Science; 5 статей, индексируемых РИНЦ; 20 тезисов докладов.

Краткое содержание работы

Во введении кратко обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи диссертации, научная и практическая значимость полученных результатов, а также научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приводится обзор литературы по структуре, статической и высокочастотной электропроводимости композитных плёнок с разными магнитными и немагнитными фазами. Описаны условия фазового расслоения, необходимого в формировании гранулированных структур в композитных плёнках при осаждении. Дано определение перколяции в композитных плёнках. Приведены и описаны механизмы проводимости, возникающие в плёнках до и после порога перколяции. Описаны механизмы влияния магнитных полей на сопротивление многослойных и композитных плёнок. Рассмотрены существующие методы исследования высокочастотных

проводящих свойств. В разделе 1.3 приведены основные уравнения теории микромагнетизма, указаны основные слагаемые свободной энергии ферромагнетика. Приведены существующие модели гранулированных сред. Указаны магнитные взаимодействия, которые могут давать основной вклад в ферромагнитные характеристики для разных концентраций металла в композитных плёнках. В разделе 1.5 приведено сравнение ферромагнитных характеристик композитных и многослойных плёнок. В разделе 1.7. Описаны известные магнитно-резистивные эффекты, которые могут наблюдаться в композитных и многослойных проводящих магнитных структурах с диэлектрической или проводящей не магнитными фазами.

Во второй главе описаны методики и техника экспериментов. В разделе 2.1 описана методика получения композитных и многослойных плёнок, приведена схема установки ионно-лучевого напыления. В разделе 2.2 описана методика и техника определения составов, толщин композитных плёнок. На основе полученных таблиц элементов были получены приближенные формулы атомных составов композитных плёнок, определены интервалы изменения концентраций металлических фаз:

$\{(Co_{0.45}Fe_{0.45}Zr_{0.10})_x+(Al_2O_3)_y\}$, где $x=0.25\div 0.66$, $y=(1-x)/5$ серия *A*;

$\{(Co_{0.86}Nb_{0.12}Ta_{0.02})_x+(SiO_2)_y\}$, где $x=0.14\div 0.86$, $y=(1-x)/3$ серия *B*;

$\{(Co_{0.2}Fe_{0.2}B_{0.6})_x+C_{1-x}\}$, где $x=0.28\div 0.57$, серия *C*;

$\{(Co_{0.44}Fe_{0.36}B_{0.2})_x+(SiO_2)_y\}$, где $x=0.22\div 0.62$, серия *D*; $x=0.42\div 0.87$, серия *E*;

$\{[(Co_{0.86}Nb_{0.12}Ta_{0.02})_x+(SiO_2)_y]+[\alpha-Si]\}_{56}$, где $x=0.3\div 0.6$, число 56 соответствует количеству пар чередующихся нанослоев со средней толщиной 3 нм: композит-полупроводник, серия *F*. Плёнки напылялись на ситалловую подложку, толщиной 0.5 мм, кроме плёнок *C* и *D* серий напыление плёнок осуществлялось на стеклянные подложки и серии *E*, для которых была использована лавсановая подложка, толщиной 0.05 мм.

В разделе 2.3 описаны методы исследования статической и сверхвысокочастотной электропроводимости композитных плёнок. Для определения СВЧ проводящих свойств композитных плёнок была собрана установка, состоящая из анализатора спектра (АС) GSP-7830, генератора качающейся частоты и подключаемого коаксиального контейнера, в который вставлялись исследуемые плёнки. Длина плёнок между контактами составляла 2.5 см, ширина плёнок 1 см. Рабочий диапазон частот установки составлял 0.1÷3.0 ГГц. Анализатор регистрировал спектры коэффициента прохождения K_{dBm} в децибелах (dBm), который равен $K_{dBm}=10\lg(P_{вх}/P_{вых})=10\lg K$, где $P_{вх}$ и $P_{вых}$ мощности на входе анализатора и выходе генератора. Учитывая, что импеданс плёнки $Z\sim(1-K)/K$, то через модуль импеданса определялся удельный модуль импеданса (удельное сопротивление) плёнки как $\rho=|Z|\cdot S/l$, где l , S –длина и поперечное сечение плёнки. В этом же разделе приведена методика расчетов удельного сопротивления композитных плёнок для СВЧ тока, на основе спектров коэффициента передачи K по относительной мощности. Для определения СВЧ спектров относительного удельного сопротивления в магнитном поле, вместо коаксиального модуля, был использована фольгированная текстолитная пластина, на которой устанавливались плёнки по типу копланарной структуры (рис.1).

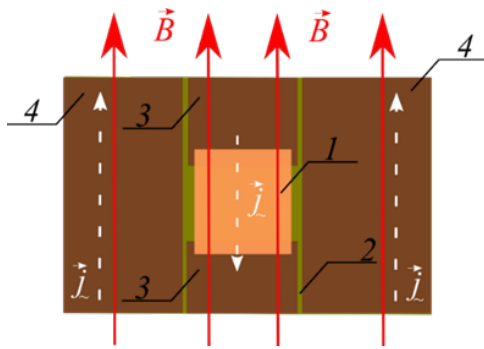


Рис. 1. Геометрия эксперимента: 1- композитная плёнка; 2- полоса из диэлектрика, 3, 4 -проводящие полосы, направления \vec{j} -вектор переменного тока, \vec{B} -вектор постоянного магнитного поля.

Пластина с закреплённой плёнкой на проводящей полосе с разрывом (рис.1) помещалась в зазор электромагнита. Напряжённость поля в зазоре электромагнита изменялась от 0 до 7 кЭ. Все измерения были проведены при комнатной температуре. Эксперименты проводились так, что вектора индукции магнитного поля \vec{B}_0 и плотности СВЧ тока \vec{j} были параллельны друг другу и лежали в плоскости плёнок. Магнитное поле изменялось от 0 до 7 кЭ.

В третьей главе приведены методика и результаты исследований микро- и наноструктуры композитных плёнок серий A, B, C, D, E. В параграфе 3.1 описан метод магнито-силовой микроскопии (МСМ) с целью получения изображений магнито-фазового контраста. Распределение магнитных полей на поверхности плёнок определялось с помощью сканирующего силового микроскопа Интегра Prima (NT-MDT). В микроскопе использовались кантилеверы MFM10 с силиконовым зондом, покрытым магнитным сплавом CoCr, толщиной 40 нм. Радиус закругления кончика зонда составлял 20 нм, который определял разрешение магнитных однородных областей. В микроскопе регистрировалась разность фаз $\Delta\phi$, которая изменялась в зависимости от силы магнитного взаимодействия зонда с поверхностью плёнок. Притяжение и отталкивание зонда к участку поверхности соответствует разным знакам $\Delta\phi$. Полученная зависимость $\Delta\phi$ от координат поверхности плёнок преобразовывалась в изображение, называемое магнитным фазовым контрастом, отображающем размеры и форму однородных магнитных областей (рис.2). Из рис. 2 видно, что для композитных плёнок серии A, при x равных 0.48 и 0.56, наблюдается полосовая магнитная структура с противоположно намагниченными полосами (доменами). Области, соответствующие областям с $\Delta\phi=0$, соответствуют диэлектрическим областям и частицам.

В разделе 3.2 приведены изображения магнито-фазового контраста (МФК) плёнок серии A составов $\{(Co_{0.45}Fe_{0.45}Zr_{0.10})_x+(Al_2O_3)_y\}$ при различных концентрациях металлического сплава x : 0,28 (а), 0,43 (б), 0,45(в) 0,48 (г), 0,51 (д) 0,62 (е) (рис.2). В плёнках с концентрацией $x = 0.28 \div 0.43$ наблюдается хаотичный разброс металлических магнитных наночастиц, расположенных в диэлектрической матрице. В области концентраций с $0.43 < x < 0.48$, в плёнках наблюдается явление перколяции, для которой характерна полосовая магнитная структура с соседними областями противоположной намагниченности (рис.2, г). Структура плёнок с большой x близка к магнитной однородной металлической плёнке, в которой хаотически распределены диэлектрические области.

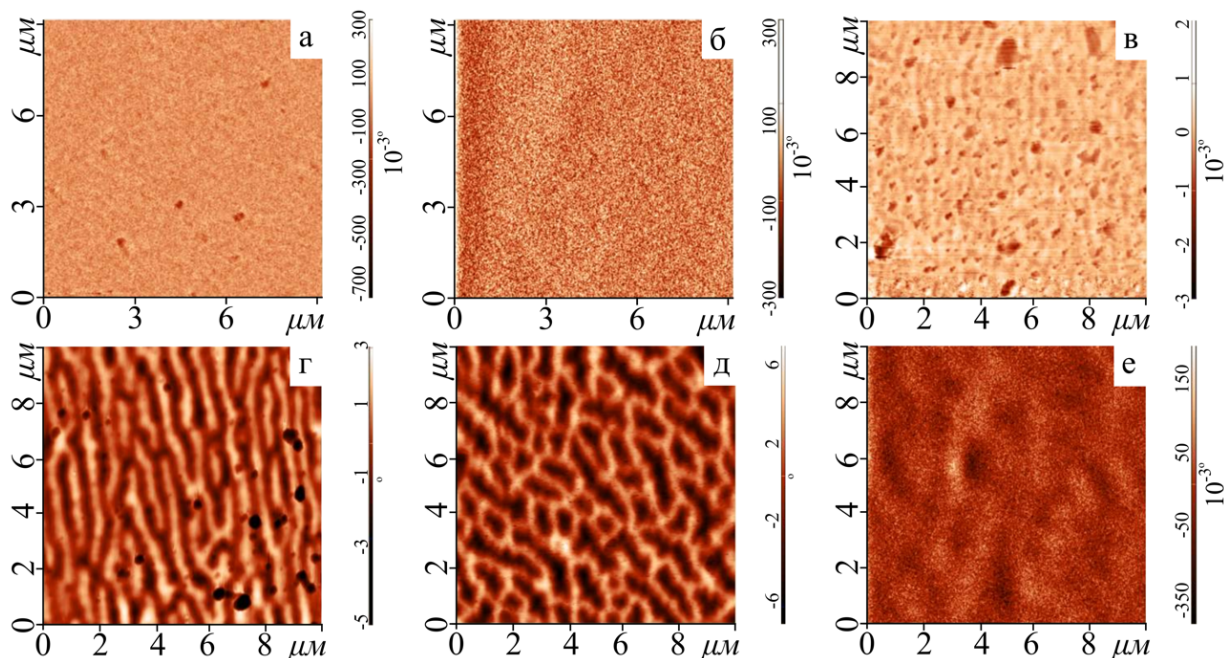


Рис.2. Изображения магнито-фазового контраста плёнок $\{(Co_{0.45}Fe_{0.45}Zr_{0.10})_x+(Al_2O_3)_y\}$ при различных x : 0.28(а); 0.43 (б); 0.45 (в); 0.48 (г); 0.51(д); 0.62 (е). Справа по оси ординат: значения сдвига фаз (в градусах) привязаны к цвету.

Четвертая глава посвящена исследованиям характеристик (ширины линии ΔH и резонансного поля H_{res}) ферромагнитного резонанса (ФМР) однослойных плёнок серии *C*, *D* и *E*. Ширина линии ФМР и значение резонансного поля плёнок были измерены с помощью радиоспектрометра РЭ-1306 на частоте поля $f = 9.36$ ГГц при комнатной температуре. В эксперименте постоянное магнитное поле было направлено касательно к плоскости плёнки, переменное магнитное поле направлено перпендикулярно ему в плоскости плёнки. Измерения проводились при комнатной температуре.

В разделе 4.1 описываются концентрационные зависимости ширины линии ΔH и резонансного поля H_{res} ФМР для двух серий: металл-диэлектрик $\{(Co_{0.44}Fe_{0.36}B_{0.2})_x+(SiO_2)_y\}$ и металл-углерод $\{(Co_{0.2}Fe_{0.2}B_{0.6})_x+C_{1-x}\}$ (рис. 3).

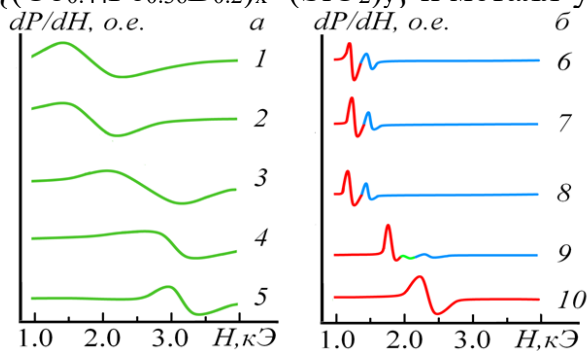


Рис. 3. Спектры производной поглощаемой мощности P композитных плёнок двух серий: металл-диэлектрик (а) и металл-углерод (б).

Для плёнок металл-диэлектрик наблюдается один пик поглощения сигнала в области ФМР. Для плёнок металл-углерод наблюдаются два узких пика поглощения сигнала в области ФМР при средних концентрациях металла ($0.34 < x < 0.54$). Такое поведение сигнала ФМР для плёнок с углеродом может быть связано с наличием более одной магнитной фазы с разной дисперсией намагниченности насыщения.

Значительное уменьшение ширины линии ФМР плёнок металл-углерод может быть связано с наличием обмена магнитных моментов между соседними магнитными областями за счет электронов в проводящих областях углерода. Углеродная проводящая фаза обуславливает однородные когерентные колебания магнитных моментов в соседних магнитных областях. Это приводит к уменьшению разброса размагничивающих полей плёнок, и как следствие к уменьшению ширины линии. Наличие диэлектрика между магнитными областями композитных металл-диэлектрических плёнок приводит к большим значениям ширины линии и резонансного поля. Для плёнок с углеродом для двух зависимостей $H_{\text{res}}(x)$, резонансное поле монотонно убывает с ростом x , что соответствует увеличению однородности поля внутри каждой магнитной области из-за увеличения их размеров. Было проведено сравнение интенсивностей двух мод поглощения от x для плёнок металл-углерод $\{(Co_{0.44}Fe_{0.36}B_{0.2})_x(SiO_2)_y\}$. Поведение зависимости отношения интенсивностей сигналов от x может быть связано с изменением объёмного соотношения двух магнитных фаз в композитных плёнках с углеродом. Одна из фаз в плёнках с углеродом может совпадать с магнитной металлической фазой, наблюдаемой в плёнках с диэлектриком, особенно при стремлении $x \rightarrow 1$. Вторая фаза может быть связана с способностью образования твёрдых растворов между углеродом и атомами металлической фазы, объём которой должен уменьшаться при $x \rightarrow 1$. Поведение кривой коррелирует с отношением объёмов двух магнитных фаз за счёт уменьшения углерода с ростом x .

Параграф 4.2 посвящен исследованию особенностей СВЧ магнитных характеристик металл-диэлектрических композитных плёнок $CoFeB/SiO_2$ серий D , E в зависимости от градиента концентраций, создаваемого при напылении. Плёнки серии D напылялись на ситалловую пластину с размерами $48 \cdot 48 \text{ мм}^2$, а плёнки серии E - на лавсановый лист с размерами $297 \cdot 210 \text{ мм}^2$. Для серии E концентрация металлического сплава изменялась в интервале $x = 0.28 \div 0.57$, а для серии D интервал $x = 0.42 \div 0.87$. Серия E характеризовалась малым градиентом концентраций металлической фазы и составляла $1.5 \cdot 10^{-3}$ ат.доли/мм. Концентрация металлического сплава изменялась в пределах $0.42 \div 0.87$ атомных доли вдоль длины листа лавсана, составляющей 297 мм. Напротив, серия D характеризовалась сильным изменением концентрации металла в пределах $0.42 \div 0.87$ атомных доли вдоль листа длиной 48 мм, т. е. имела большой градиент концентрации металлической фазы $9.4 \cdot 10^{-3}$ ат.доли/мм.

Исследование магнитной структуры плёнок произведено методом магнито-силовой микроскопии (МСМ) с максимальным окном сканирования $70 \times 70 \text{ мкм}^2$. Из изображений, полученных методом МСМ (рис. 4) видно, что плёнки серии E с более однородным распределением металлической фазы обладают ярко выраженной доменной структурой полосового типа. Средняя длина домена составляет 2.5 мкм, средняя ширина — 0.25 мкм. Плёнки серии D , которые имеют большое значение градиента концентраций металла, доменной структурой не обладают.

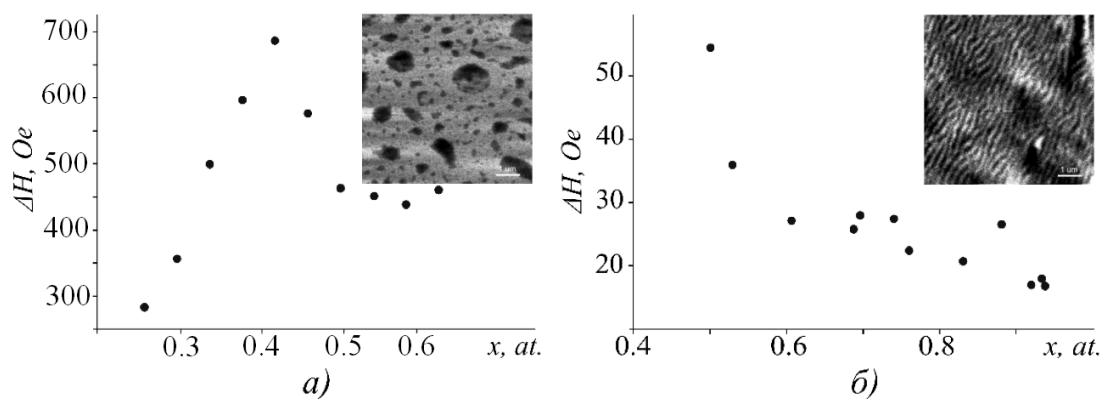


Рис. 4. Ширина линии ФМР композитных плёнок серий: D (а) и E (б).

Существенные различия магнитных структур, выявленные методом МСМ, проявляются и в результатах ФМР спектроскопии плёнок. На графиках (рис. 4) показаны концентрационные зависимости ширины резонансной линии ФМР для образцов обеих серий плёнок. Можно видеть, что на графике, построенном для плёнок серии D, зависимость ширины линии от концентрации металла имеет характер, аналогичный для однородно намагниченных композитных плёнок: при низких концентрациях металла основной вклад в ширину резонансной линии вносит дипольное уширение, связанное со сложной формой и конфигурацией соединений гранул, при высокой концентрации, особенно за порогом перколяции, когда обмен между гранулами происходит не только за счет туннелирования электронов, но и напрямую из-за их объединения в крупные структуры, доминирует обменное сужение. Плёнки серии E благодаря наличию доменной структуры, обладают существенно более узкой линией ФМР.

Пятая глава посвящена исследованию СВЧ проводящих свойств композитных и многослойных плёнок. В разделе 5.1 приведены исследования СВЧ проводящих свойств композитных плёнок серий A, B, C, E. В композитных плёнках для малых концентраций металлического сплава $x \leq 0.38$ наблюдается уменьшение удельного импеданса (сопротивления) ρ с ростом частоты (кривые 1, 2, рис. 5), что характерно для диэлектрического механизма проводимости. Для плёнок с концентрацией, находящейся в интервале $x=0.38 \div 0.48$, сначала наблюдается увеличение, а затем уменьшение сопротивления ρ с ростом частоты. Такое поведение спектров удельного сопротивления соответствует композитным плёнкам, характеризующихся наличием процесса перколяции (рис. 2). Такие плёнки обладают как металлическим, так и диэлектрическим механизмом проводимости, или промежуточным механизмом проводимости. При большой концентрации металлического сплава $x=0.48 \div 0.67$ наблюдается увеличение удельного сопротивления с ростом частоты (кривая 5, рис.5), что характерно для металлического механизма проводимости.

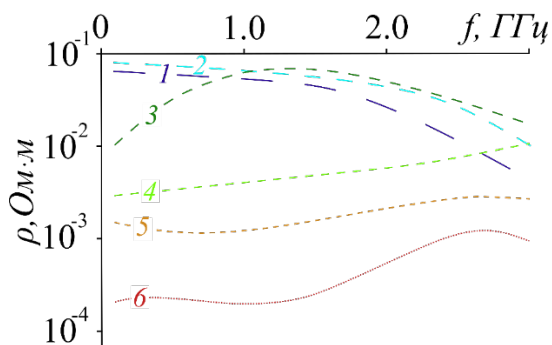


Рис. 5. Спектры удельного сопротивления композитных плёнок серии А $\{(Co_{0.45}Fe_{0.45}Zr_{0.10})_x+(Al_2O_3)_y\}$ для x : 0.28 (1), 0.32 (2), 0.46 (3), 0.51 (4), 0.54 (5), 0.61 (6).

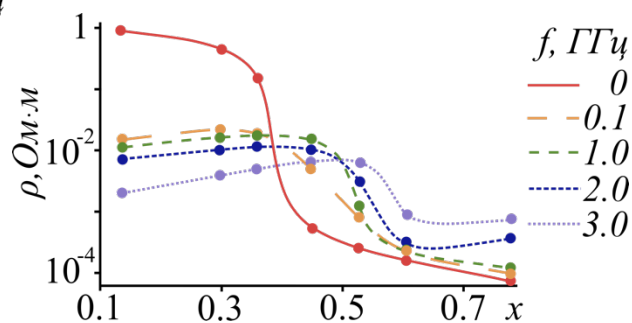


Рис. 6. Зависимости удельного сопротивления композитных плёнок серии В от концентрации x .

Плёнки с такими значениями x характеризуются лабиринтоподобной структурой, для которой может быть свойственна не монотонная частотная зависимость сопротивления ρ . Для однослойных композитных плёнок серии В (Рис. 6.) при $x \leq 0.40$ характерна диэлектрическая проводимость. Для плёнок с концентрацией x в области перколяции $x=0.46$ характерна промежуточная проводимость. Для плёнок после порога перколяции $x=0.54$; 0.62; 0.78 характерна металлическая проводимость. Для максимальной концентрации металла в плёнках серии В при $x=0.78$ наблюдаются значительное увеличение потерь мощности тока с ростом частоты. Такое поведение связано с изменением магнитной проницаемости плёнок. У плёнки с концентрацией $x=0.78$ магнитная проницаемость в 2-3 раза выше, чем у плёнки с концентрацией 0.62 и 0.54. Изменение характера проводимости согласуется с изменением микроструктуры композитных плёнок. Из концентрационных зависимостей удельного сопротивления композитных плёнок можно выделить три интервала концентраций: до порога перколяции, в области перколяции и за областью порога перколяции. До порога перколяции увеличение частоты приводит к уменьшению удельного электрического сопротивления ρ , из-за уменьшения ёмкостного сопротивления, что приводит к уменьшению полного сопротивления композитной плёнки. В области порога перколяции наблюдается резкое уменьшение ёмкостного сопротивления на несколько порядков с ростом x . Образование проводящих каналов приводит к смене механизмов проводимости. За порогом перколяции рост частоты тока приводит к росту удельного сопротивления композитных плёнок, поскольку переменный ток преимущественно распространяется через проводящие каналы, которые обладают индуктивным сопротивлением. Активное сопротивление с ростом частоты также увеличивается за счёт вытеснения СВЧ тока к поверхности проводника, в результате чего возрастает удельное сопротивление. В многослойных плёнках серии F $\{[(Co_{0.86}Nb_{0.12}Ta_{0.02})_x+(SiO_2)_y]+[\alpha-Si]\}_{56}$ зависимости полного удельного сопротивления от частоты и концентраций представлены на рис. 7 и рис. 8.

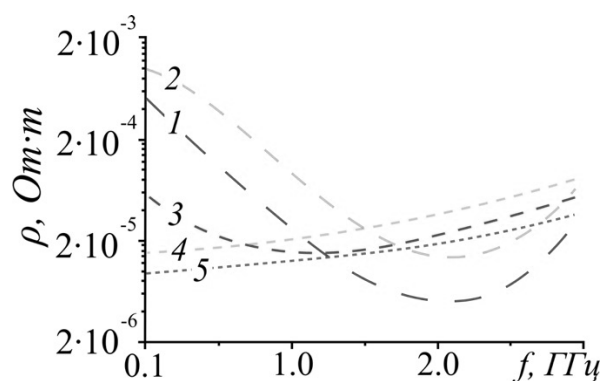


Рис. 7. Спектры удельного сопротивления плёнок $\{[(Co_{0.86}Nb_{0.12}Ta_{0.02})_x+(SiO_2)_y]+[\alpha-Si]\}_{56}$, где x : 1-0.30; 2-0.43; 3-0.44; 4-0.49; 5-0.60

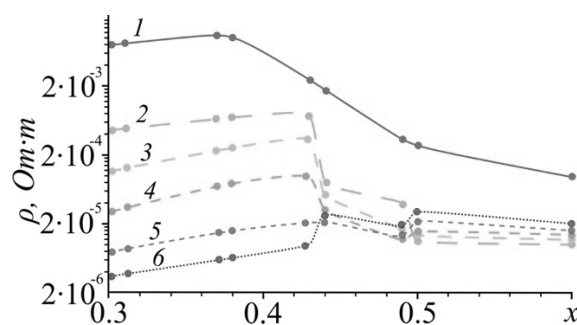


Рис. 8. Зависимости удельного сопротивления плёнок от x $\{[(Co_{0.86}Nb_{0.12}Ta_{0.02})_x+(SiO_2)_y]+[\alpha-Si]\}_{56}$ при частотах: 1- 0МГц, 2- 0.1 ГГц, 3- 0.5 ГГц, 4-1.0 ГГц, 5-1.5 ГГц, 6-2.0 ГГц

При концентрациях $x \leq 0.43$ в многослойных плёнках наблюдается уменьшение импеданса с ростом частоты до 2.0 ГГц, что характерно для диэлектрического механизма проводимости. При $x \geq 0.49$ рост частоты приводит к росту импеданса, что характерно для металлического механизма проводимости. При концентрациях выше 0.43 и ниже 0.49 происходит смена механизма проводимости. Из зависимостей удельного сопротивления видно, при концентрациях $x=0.43$ происходит, как и в композитных плёнках того же состава, образование проводящих каналов в композитных слоях. Поскольку толщины слоёв порядка единиц нанометров, каждый композитный слой обладает большим сопротивлением, чем композитная плёнка с толщинами на порядки больше. При $x=0.48$ происходит замыкание композитных слоёв через полупроводниковые слои и смена механизма проводимости завершается.

В разделе 5.2 приведены спектры относительного изменения СВЧ удельного магнитосопротивления (модуля импеданса) композитных плёнок серии E $\{(Co_{0.44}Fe_{0.36}V_{0.2})_x+(SiO_2)_y\}$ или величины $M=\Delta\rho/\rho_0=(\rho_H-\rho_0)/\rho_0$, где ρ_H и ρ_0 – удельные импедансы (сопротивления) композитных плёнок в магнитном поле и без поля. Как видно из рис. 9, в спектре наблюдается минимум отрицательного МС, который смещается в сторону низких частот. Смещение минимума в сторону низких частот при увеличении концентрации металлического сплава x может быть связано с изменением магнитопроводящей структуры плёнок. Структура для этой серии плёнок меняется от магнитопроводящих длинных полос (около 1 мкм), до лабиринтоподобной структуры и далее, до сплошной магнитопроводящей матрицы с включениями диэлектрических наночастиц. Наибольшее значение отрицательного МС, равное -0.06, обнаружено у композитных плёнок с концентрацией $x=0.84$ при постоянном магнитном поле $H_0=7кЭ$. Также обнаружено небольшое (порядка 0.01) по величине положительное МС при небольших постоянных магнитных полях до 1 кЭ. В этих полях может возникать нестабильная магнитная структура, которая может варьироваться от полосовых доменов до монодоменизации плёнки при изменении магнитного поля. Как видно из рис.10, в интервале концентраций $x=0.67 \div 0.84$ наблюдается

монотонное изменение магнитосопротивления M . В зависимости от частоты и постоянного магнитного поля может наблюдаться как монотонное уменьшение, так и монотонный рост отрицательного магнитосопротивления $M(x)$. Такое поведение $M(x)$ может быть обусловлено монотонным увеличением концентрации магнитопроводящей фазы x и уменьшением диэлектрической фазы y . Наличие точки перегиба в интервале $x=0.67-0.84$ свидетельствует о значительном изменении структуры плёнок с ростом концентрации x . Максимальное по модулю магнитосопротивление наблюдается в этом же интервале при больших значениях магнитного поля $H_0=7\text{кЭ}$. Структура плёнок в этом интервале меняется от больших (порядка 0.5 мкм) магнитопроводящих парных областей до сплошной магнитопроводящей матрицы с включениями диэлектрических наночастиц.

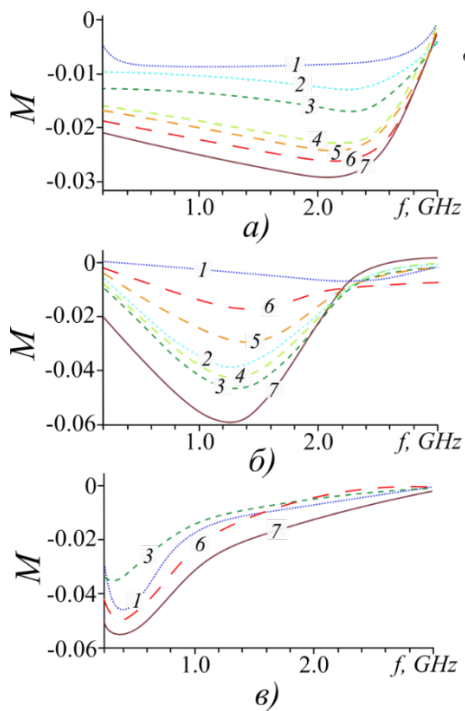


Рис.9. Спектры магнитосопротивления M плёнок серии E составов $\{(Co_{0.44}Fe_{0.36}B_{0.2})_x+(SiO_2)_y\}$ при x : 0.67 (а); 0.84 (б); 0.85 (в). Цифры на кривых соответствуют напряженности магнитного поля H_0 в кЭ.

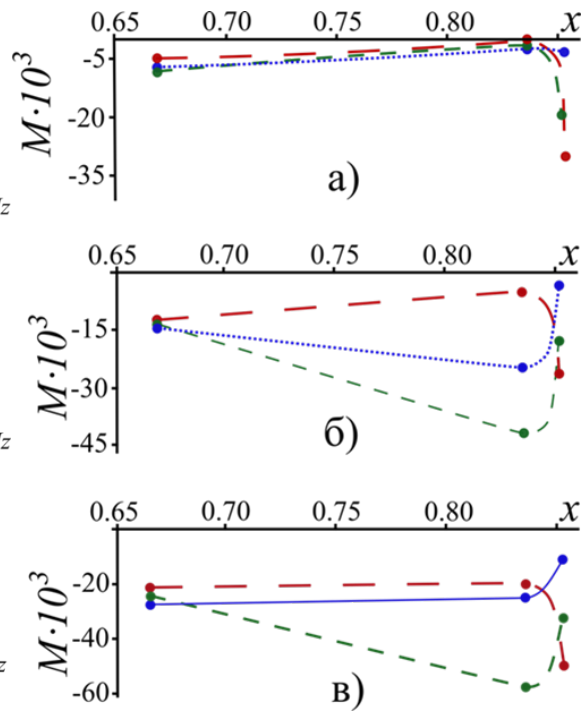


Рис.10. Концентрационные зависимости магнитосопротивления M композитных плёнок серии E в магнитных полях H (в кЭ): а-1-(а), 2-(б), 3-(в).

В разделе 5.3 приведены результаты моделирования СВЧ проводящих свойств металл-диэлектрических композитных плёнок. Композитные плёнки до порога перколяции состоят из сложной неоднородной композиции проводящих и непроводящих микро- и нанообластей, которые можно представить в виде упрощённой эквивалентной электрической схемы, состоящей из резисторов, индуктивностей и конденсаторов, которые могут быть соединены как последовательно, так и параллельно. Спектры удельного сопротивления композитных плёнок от концентрации металла x были

рассчитаны исходя из модуля импеданса эквивалентных электрических схем и размеров композитных плёнок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Определены характерные изменения микро- и наноструктуры композитных плёнок для различных концентраций магнитного металлического сплава x : с малыми $x \leq 0.3$ наблюдается хаотичный разброс металлических частиц, расположенных в диэлектрической матрице; в интервале $0.43 < x < 0.48$ в плёнках наблюдается явление перколяции, для которого характерно возникновение полосовой магнитной структуры с соседними областями противоположной намагничённости; плёнки с большой $x \geq 0.8$ характеризуются большими однородными металлическими областями с размерами более 2 мкм, в которых имеются диэлектрические включения. Наличие полосовой магнитной структуры при малых градиентах x .

2. Обнаружено принципиальное отличие магнитных спектров ФМР двух серий композитных плёнок: магнитный сплав-диэлектрик $\{(Co_{0.44}Fe_{0.36}B_{0.2})_x+(SiO_2)_{(1-x)/3}\}$ и металл-углерод $\{(Co_{0.2}Fe_{0.2}B_{0.6})_x+(C)_{(1-x)}\}$. У плёнок с добавлением углерода обнаружено две магнитной фазы разного состава и структуры методом ФМР. Получены магнито-резонансные характеристики исследованных композитных плёнок. Плёнки $\{(Co_{0.44}Fe_{0.36}B_{0.2})_x+(SiO_2)_{(1-x)/3}\}$ напыленные на стекло и лавсан обладают различными магнитными структурами и ФМР характеристиками.

3. Измерены спектры СВЧ удельного импеданса (сопротивления) в композитных плёнках с различными металлическими и диэлектрическими фазами. Показано, что для каждого механизма проводимости (диэлектрического, промежуточного, металлического) характерна своя форма спектра сопротивления. Для описания спектров удельного сопротивления в композитных плёнках предложена принципиальная электрическая схема с усреднёнными параметрами.

4. Определены значения СВЧ магнитосопротивления композитных плёнок $\{(Co_{0.44}Fe_{0.36}B_{0.2})_x+(SiO_2)_{(1-x)/3}\}$, с концентрациями металлического сплава $x=0.42 \div 0.86$ для диапазона частот $0.12 \div 3$ ГГц. Магнитное постоянное поле и СВЧ ток, распространяющийся по плёнке, были направлены вдоль плоскости плёнки и по одной оси. Установлено наличие отрицательного магнитосопротивления в СВЧ диапазоне, достигающего 6%. Большое значение СВЧ отрицательного магнитосопротивления связано с наличием полосовой магнитной структуры в плёнках.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, рецензируемых ВАК РФ

- A1. Котов, Л.Н. Ферромагнитный резонанс в композитных плёнках металл–диэлектрик и металл–углерод / Л.Н. Котов, М.П. Ласёк, В.К. Турков и др. // Известия РАН. Серия физическая. – 2020. – Т. 85, № 9. – С. 1255–1257.
- A2. Котов, Л.Н. Магнитная структура и ВЧ, СВЧ электрические потери в композитных плёнках / Л.Н. Котов, М.П. Ласёк, О.А. Кирпичёва и др. // Вестник Челябинского государственного университета. Серия Физика, вып. 21. – 2015. – № 22 (377). – С. 44–48.
- A3. Турков, В.К. Влияние отжига на структуру и СВЧ-магнитные свойства однослойных и многослойных плёнок различного состава / В.К. Турков, В.С. Власов, Л.Н. Котов, В.А. Устюгов, М.П. Ласёк и др. // Известия РАН. Серия физическая. – 2013. – Т. 77, № 10. – С. 1414–1418.

Публикации в зарубежных рецензируемых журналах, входящих в Международные базы данных и системы цитирования Web of Science:

- A4. Kotov, L.N. The particle size distribution function in the composite films and microwave magnetic properties / L.N. Kotov, V.A. Ustyugov, V.V. Vlasov, V.K. Turkov, M.P. Lasek et al. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – V. 123. P. – 012027.
- A5. Kotov, L. Conductive, magnetic and structural properties of multilayer films / L. Kotov, V. Turkov, V. Vlasov, M. Lasek, Yu. Kalinin, A. Sitnikov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2013. – V. 47. P. – 012027.

Труды и материалы конференций

- A6. Котов, Л.Н. СВЧ магнитосопротивление и структура композитных плёнок (FeCoB)/(SiO₂) [Электронный ресурс] / Л.Н. Котов, М.П. Ласёк, В.С. Власов и др. // Сборник трудов XXIV международной конференции «Новое в магнетизме и магнитных материалах» (НМММ). – 2021. – С. 9-30–9-33. – Режим доступа:
<https://drive.google.com/file/d/1UNv6b9kUet3Ur4tSyC0003oDN1V5scr/view?usp>.
- A7. Котов, Л.Н. ВЧ, спектры магнитной проницаемости и структура композитных плёнок (FeCoB)/(SiO₂) [Электронный ресурс] / Л.Н. Котов, М.П. Ласёк, Р.И. Королёв и др. // Сборник трудов XXIV международной конференции «Новое в магнетизме и магнитных материалах» (НМММ). – 2021. – С. 3-24–3-27. – режим доступа:
<https://drive.google.com/file/d/1UNv6b9kUet3Ur4tSyC0003oDN1V5scr/view?usp>.
- A8. Котов, Л.Н. О влиянии градиента концентрации металла на ФМР в композитных плёнках [Электронный ресурс] / Л.Н. Котов, В.С. Власов, В.А. Устюгов, П.А. Макаров, М.П. Ласёк и др. // Сборник трудов XXIV

межд. конференции «Новое в магнетизме и магнитных материалах» (НМММ). – 2021. – С. 9-78–9-81. – режим доступа: <https://drive.google.com/file/d/1UNv6b9kUet3Ur4tSyC0003oDN1V5scr/view?usp>.

- A9. Котов, Л.Н. Метод ФМР для исследования структуры и магнитных свойств композитных плёнок / Л.Н. Котов, М.П. Ласёк, В.В. Власов и др. // Всероссийская конференция «Методы исследования состава и структуры функциональных материалов» (МИССФМ-2020). – Новосибирск: ИК СО РАН, 2020. – С. 105–106.
- A10. Котов, Л.Н. Магнитная релаксация в композитных плёнок: металл-диэлектрик/углерод / Л.Н. Котов, М.П. Ласёк, В.К. Турков и др. // Материалы XXIV международной конференции «Релаксационные явления в твёрдых телах». – Воронеж: ВГТУ, 2018. – С. 139–141.
- A11. Котов, Л.Н. Влияние структуры на ВЧ, СВЧ проводящие свойства композитных плёнок / Л.Н. Котов, М.П. Ласёк, А.М. Уляшев и др. // Материалы XXIV межд. конференции «Релаксационные явления в твёрдых телах». – Воронеж: ВГТУ, 2018. – С. 111–114.
- A12. Котов, Л.Н. ВЧ диэлектрические спектры металл-диэлектрических композитных плёнок на лавсановой подложке / Л.Н. Котов, Т.А. Ключкова, М.П. Ласёк и др. // Тезисы докладов XXIII Межд. научной конференции «Релаксационные явления в твёрдых телах». – Воронеж: ВГТУ, 2015. – С. 115.
- A13. Ласёк, М.П. Электрические потери и релаксация мощности ВЧ и СВЧ сигналов тока в композитных плёнках / М.П. Ласёк, Л.Н. Котов, О.А. Кирпичёва и др. // Тезисы докладов XXIII Международной научной конференции «Релаксационные явления в твёрдых телах». – Воронеж: ВГТУ, 2015. – С. 123.
- A14. Котов, Л.Н. ВЧ магнитные спектры металл-диэлектрических композитных плёнок на лавсановой подложке / Л.Н. Котов, А.О. Шмаков, К.А. Канев, Е.В. Варзер, М.П. Ласёк, Ю.Е. Калинин, А.В. Ситников // Тезисы докладов XXIII Международной научной конференции «Релаксационные явления в твёрдых телах». – Воронеж: ВГТУ, 2015. – С. 114.
- A15. Котов, Л.Н. Структурные и магнитные свойства в области перколяции в композитных плёнках и влияние на них отжига / Л.Н. Котов, М. П. Ласёк, В.К. Турков и др. // Тезисы докладов XXIII Международной научной конференции «Релаксационные явления в твёрдых телах». – Воронеж: ВГТУ, 2015. – С. 10.
- A16. Ласёк, М.П. Электрические и магнитные свойства композитных плёнок с магнитной металлической и диэлектрической фазами / М.П. Ласёк, Л.Н. Котов, О.А. Кирпичёва и др. // Тезисы докладов Международной конференции, посвящённой 80-летию члена-корреспондента РАН И.К. Камилова. – Челябинск: ЧелГУ, 2015. – С. 174.
- A17. Котов, Л.Н. Структурные и магнитные свойства в области перколяции в композитных плёнках / Л.Н. Котов, М.П. Ласёк, В.К. Турков и др. // Тезисы докладов Международной конференции, посвящённой 80-летию

- члена-корреспондента РАН И.К. Камилова. – Челябинск: изд-во Челябинского государственного университета, 2015. – С. 172.
- A18. Kotov, L.N. Structures, surface magnetic fields and fmr parameters of composite films. / L.N. Kotov, V.S. Vlasov, V.K. Turkov, M.P. Lasek et al. // Moscow International Symposium on Magnetism (MISM). Book of Abstracts. – Moscow: Faculty of Physics M.V. Lomonosov MSU, 2014. – P. 459.
- A19. Lasek, M.P. Influence of the magnetic properties of composite films on RF and microwave complex conductivity / M.P. Lasek, L.N. Kotov, O.A. Kirpicheva et al. // Moscow International Symposium of Magnetism (MISM): book of abstracts. – Moscow: MSU, 2014. – P. 866.
- A20. Lasek, M.P. The spectra of the RF power dissipation in thin magnetic granular composite films / M.P. Lasek, V.S. Vlasov, L.N. Kotov et al. // V Euro-Asian symposium "Trends in MAGnetism": Nanomagnetism (EASTMAG-2013): Abstract Book. – Russky Island, Vladivostok, Russia, 15th-21st September, 2013. – P. 175.
- A21. Lasek, M.P. Microwave current power dissipation in composite magnetic granular films / M.P. Lasek, V.S. Vlasov, L.N. Kotov et al. // International conference "Functional Materials" ICFM'2013: Abstract Book. – Ukraine, Crimea, Yalta, Haspra, September 29 – October 5, 2013. – P. 322.
- A22. Lasek, M.P. Microwave current power dissipation and spin excitation in composite granular films $(\text{Co}_{45}\text{Ni}_{45}\text{Zn}_{10})_x(\text{SiO}_2)_y$ / M.P. Lasek, O.A. Kirpicheva, V.S. Vlasov et al. // Spin waves 2013 International symposium: Program Abstracts. – Saint Petersburg, Ioffe Physical-Technical Institute, 2013. – P. 163.
- A23. Ласёк, М.П. Исследование рассеивания сигналов ВЧ и СВЧ диапазона в коаксиальной линии с тонкими плёнками / М.П. Ласёк, Л.Н. Котов, О.А. Кирпичёва. // XIV Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-14): тез. Докладов. – Екатеринбург, 2013. – С. 113.
- A24. Ласёк, М.П. Спектры модуля адмитанса тонких аморфных композитных плёнок с содержанием магнитной металлической фазы / М.П. Ласёк, В.С. Власов, Л.Н. Котов, О.А. Кирпичёва // XIII Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества. – Екатеринбург: ИФМ УрО РАН, 2012. – С. 107.
- A25. Котов, Л.Н. СВЧ проводящие свойства наногранулированных композитных плёнок при различных концентрациях металлической фазы / Л.Н. Котов, М.П. Ласёк, О.А. Кирпичёва и др. // Сборник трудов II Всероссийской школы-семинара молодых учёных, посвящённой 55-летию создания Института физики и 105-летию со дня рождения Х.И. Амирханова. – Махачкала: ИП «Султанбегова Х.С.», 2012. – С. 52–55.
- A26. Ласёк, М.П. Спектры затухания электромагнитной волны в композитных плёнках / М.П. Ласёк, В.С. Власов, Л.Н. Котов, О.А. Кирпичёва // Сборник трудов XXII межд. конференции «Новое в магнетизме и магнитных материалах» (НМММ). – Астрахань: Издательский дом «Астраханский университет», 2012. – С. 31–32.

- A27. Кирпичёва, О.А. Измерение и исследование спектров затухания электрического сигнала в композитных плёнках / О.А. Кирпичёва, М.П. Ласёк, Л.Н. Котов // Современные проблемы радиоэлектроники: Сборник научных трудов. – Ростов-на-Дону: РИО РТИСТ ФГБОУ ВПО «ЮРГУЭС», 2012. – С. 212–214.
- A28. Vlasov, V.S. Complex conductivity spectrum of thin composite films: experiment and modeling / V.S. Vlasov, L.N. Kotov, M.P. Lasek et al. // Moscow Intern. Symposium of Magnetism: book of abstracts. – Moscow: MSU, 2011. – P. 806.
- A29. Ласёк, М.П. Расчет спектров модуля комплексной удельной проводимости в тонких композитных плёнках / М.П. Ласёк // Тезисы докладов XV Всероссийской научной конференции студентов-радиофизиков. – Санкт-Петербург, 2011. – С. 102–103.
- A30. Ласёк, М.П. Расчёт спектров комплексной проводимости тонких композитных плёнок / М.П. Ласёк // Тезисы докладов XIV Всероссийской научной конференции студентов-радиофизиков. – Санкт-Петербург, 2010. – С. 63–65.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Бухараев, А.А. Стрейнтроника — новое направление микро- и нанoeлектроники и науки о материалах / А.А. Бухараев, А.К. Звездин, А.П. Пятаков, Ю.К. Фетисов. // УФН. – 2018. – Т. 188, № 12. – С. 1288–1330.
2. Баранов, П.Г. Спинтроника полупроводниковых, металлических, диэлектрических и гибридных структур (к 100-летию Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН) / П.Г. Баранов, А.М. Калашников, В.И. Козуб, и др. // УФН. – 2019. – Т. 189, № 8. – С. 849–880.
3. Ларионов, К.В. Исследование плёнок многоатомной толщины / К.В. Ларионов, П.Б. Сорокин // УФН. – 2021. – Т. 191, № 1. – С. 30–51.
4. Kotov, L.N. Influence of Annealing on Magnetic, Relaxation and Structural Properties of Composite and Multilayer Films / L.N. Kotov, V.S. Vlasov, V.K. Turkov, Y.E. Kalinin, A.V. Sitnikov // Journal of Nanoscience and Nanotechnology. – 2012. – V. 12, № 2. – P. 1696–1699.
5. Bedanta, S. Magnetic Nanoparticles: A Subject for Both Fundamental Research and Applications / S. Bedanta, A. Barman, W. Kleemann, O. Petravic, T. Seki. // Journal of Nanomaterials. – 2013. – V. 2013. – P. 952540.
6. Clauss, C. Broadband electron spin resonance from 500 MHz to 40 GHz using superconducting coplanar waveguides / C. Clauss, D. Bothner, D. Koelle, R. Kleiner, L. Bogani, M. Scheffler, M. Dressel // Applied Physics Letters. – 2012. – V. 102. – P. 162601.
7. Ukleev, V. Morphology and magnetic properties of nanocomposite magnetic multilayers $[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}]/[\text{C}]_{47}$ / V. Ukleev, E. Dyadkina, A. Vorobiev et al. // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2016. – V. 432, № Part B. – P. 499 – 504.

8. Kim, K.H. FEM analysis on the effects of soft magnetic film as a noise suppressor at GHz range. / K.H. Kim, S. Ikeda, M. Yamaguchi, K. Arai // *Journal of Applied Physics*. – 2003. – V. 93, № 10. – P. 8588–8590.
9. Kim, K.H. Effect of radio-frequency noise suppression on the coplanar transmission line using soft magnetic thin film / K.H. Kim, M. Yamaguchi, K. Arai, H. Nagura, S. Ohnuma // *Journal of Applied Physics*. – 2003. – V. 93, № 10. – P. 8002–8004.
10. Kotov, L.N. Relaxation of magnetization in thin composite $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$ films / L.N. Kotov, V.K. Turkov, V.S. Vlasov et al. // *Materials Science and Engineering*. – 2006. – V. 442, № 1. – P. 352.
11. Рыльков, В.В. Транспортные, магнитные и мемристивные свойства наногранулированного композита $(\text{CoFeB})_x(\text{LiNbO}_y)_{100-x}$ / В.В. Рыльков, С.Н. Николаев, В.А. Демин и др. // *ЖЭТФ*. – 2018. – Т. 153, № 3. – С. 424.
12. Vlasov, V.S. Specific features of static and dynamic conduction of a composite film containing metal nanogranules in dielectric matrix / V.S. Vlasov, L.N. Kotov, V.G. Shavrov, V.I. Shcheglov // *Journal of Communications Technology and Electronics*. – 2014. – V. 59, № 9. – P. 920–932.
13. Антонец, И.В. Наноструктура и проводимость аморфных гранулированных композитных плёнок $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{(1-x)}$ / И.В. Антонец, Е.А. Голубев, Л.Н. Котов, Ю.Е. Калинин, А.В. Ситников // *ЖТФ*. – 2016. – Т. 86, № 3. – С. 98-105.
14. Антонец, И.В. Структура, проводящие и отражающие свойства аморфных гранулированных композитных плёнок $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{ZrO})_{(1-x)}$ / И.В. Антонец, Л.Н. Котов, Е.А. Голубев, Ю.Е. Калинин, А.В. Ситников // *ЖТФ*. – 2017. – Т. 87, № 2. С. 234–242.
15. Svalov, A.V. Thickness-dependent Curie temperature in ferrimagnetic GdCo/Ti multilayers / A.V. Svalov, G.V. Kurlyandskaya, V.O. Vas'kovskiy et al. // *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 2016. – Т. 90. – P. 242–246.
16. Shi, J. Structural and magnetic properties of Co-C composite films and Co/C multilayer films / J. Shi, M. Azumi, O. Nittono // *Appl. Phys. A*. – 2001. – V. 73. – P. 215–218.
17. Гриднев, С.А. Нелинейные явления в нано- и микрогетерогенных системах / С.А. Гриднев, Ю.Е. Калинин, А.В. Ситников, О.В. Стогней – М.: Бинوم, 2012. – 355 с.
18. Yoshida, S. High-Frequency Noise Suppression in Downsized Circuits Using Magnetic Granular Films / S. Yoshida, H. Ono, S. Ando, F. Tsuda et al. // *IEEE transactions on magnetics*. – 2001. – V. 37. – P. 2401–2403.
19. Калинин, Ю.Е. Особенности отражения СВЧ волн от гранулированных плёнок // Ю.Е. Калинин, Л.Н. Котов, С.Н. Петрунёв, А.В. Ситников // *Известия РАН. Серия физическая*. – 2005. – Т. 69, № 8, P. 1195–1199.
20. Kim, K.H. FEM analysis on the effects of soft magnetic film as a noise suppressor at GHz range / K.H. Kim, S. Ikeda, M. Yamaguchi, K. Arai // *Journal of Applied Physics*. – 2003. – V. 93, № 10. – P. 8588–8590.
21. Kim, K.H. Effect of radio-frequency noise suppression on the coplanar transmission line using soft magnetic thin film / K.H. Kim, M. Yamaguchi,

- K. Arai, H. Nagura, S. Ohnuma // *Journal of Applied Physics*. – 2003. – V. 93, № 10. – P. 8002–8004.
22. Рыльков, В.В. Транспортные свойства магнитных наногранулированных композитов с диспергированными ионами в изолирующей матрице / В.В. Рыльков, С.Н. Емельянов, К.Э. Николаев и др. // *ЖЭТФ*. – 2020. – Т. 158, № 1. – С. 164-183.
23. Блинов, М.И. Магнитотранспортные свойства тонких плёнок $\text{Ni}_{49.7}\text{Fe}_{17.4}\text{Co}_{4.2}\text{Ga}_{28.7}$ / М.И. Блинов, В.Н. Черненко, В.Н. Прудников и др. // *ЖЭТФ*. – 2021. – Т. 159, № 3. – С. 546-552.
24. Larionov, K.V. Insights into the regularity of the formation of 2D 3d transition metal monocarbides / K.V. Larionov, G. Seifert, P.B. Sorokin // *Nanoscale* – 2020. – V. 12. – P. 13407.
25. Погребняк, А.Д. Защитные покрытия с наноразмерной многослойной архитектурой: современное состояние и перспективы / А.Д. Погребняк, М.А. Лисовенка, В.В. Турлыбекулы, В.В. Буранович // *УФН*. – 2021. – Т. 191, № 3. – С. 262-291.