

На правах рукописи



Власов Владимир Сергеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЛАКСАЦИОННОЙ И НЕЛИНЕЙНОЙ
ДИНАМИКИ МАГНИТНЫХ И МАГНИТОУПРУГИХ
КОЛЕБАНИЙ ПЛЕНОК И ЧАСТИЦ**

01.04.07 – физика конденсированного состояния

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 2007

Работа выполнена на кафедре радиофизики и электроники Сыктывкарского государственного университета

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

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Грановский Александр Борисович

доктор физико-математических наук,
профессор Бучельников Василий Дмитриевич

Ведущая организация: Институт радиотехники и электроники РАН

Защита состоится « ____ » _____ 2007 года в ____ часов на заседании диссертационного совета К 501.001.02 в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова по адресу: 119992, ГСП-2, г. Москва, Воробьевы горы, МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, аудитория _____

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2007 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета К 501.001.02,
кандидат физико-математических наук

И.А. Никанорова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В последнее время в связи с интенсивным изучением нелинейных свойств магнитных систем и возможностью получения высококачественных тонких плёнок и других наноразмерных магнитных объектов открываются возможности создания новых материалов для компактных ВЧ и СВЧ устройств, работающих в нелинейных режимах. Корректное описание поведения магнитных систем невозможно без учёта диссипативных процессов в них [1]. Поэтому в настоящее время исследование нелинейной магнитной и магнитоупругой динамики и её релаксационных особенностей в тонких плёнках и частицах является перспективным направлением. Актуальность исследования связана также с возможностью разработки акустического усилителя, работающего на электромагнитной накачке, на основе магнитострикционного эффекта. Другим не менее перспективным направлением, является исследование динамических и релаксационных свойств нанокompозитных магнитных пленок с заданными свойствами. Уникальность поведения таких плёнок состоит в сильной зависимости их свойств от наноструктуры, которая определяется составом, температурой отжига и т.д. [2-4]. Нанокompозитные плёнки являются новыми материалами, которые, обладая необычными свойствами, могут найти широкое применение в радиотехнике и микроэлектронике. Очень важным, поэтому, является исследование влияния внешних воздействий на релаксационные и нелинейные свойства нанокompозитных материалов и ансамблей частиц, составляющих элементы наноструктуры этих материалов.

Современные энергонезависимые магнитные накопители информации характеризуются гигантской плотностью записи и малым временем доступа, причем с каждым годом эти характеристики улуч-

шаются. Однако уменьшение времени доступа рано или поздно должно достигнуть своего предела, поскольку в современных накопителях используются механические системы: движущиеся головки и вращающиеся диски. Одним из альтернативных накопителей с очень малым временем доступа может быть накопитель, основанный на радиоимпульсной записи [5]. Улучшение характеристик, необходимых для внедрения таких носителей информации, невозможно достичь без изучения следующих механизмов: а) взаимодействия ферритовых плёнок, частиц и ансамблей частиц с импульсными и переменными магнитными полями, б) возникновения сигналов нелинейного радиоимпульсного эха или магнитоакустического эха (МАЭ). Выяснение этих механизмов выдвигает круг задач по исследованию линейных и нелинейных радиочастотных магнитных и магнитоупругих свойств ферритовых частиц и плёнок.

При взаимодействии магнетиков с переменными полями идет процесс магнитоупругого или магнитоакустического взаимодействия [1]. Отличие времени релаксации упругой подсистемы от времени релаксации спиновой подсистемы, и наличие нелинейностей приводит к возможности реального наблюдения эха в порошках ферритов. Результаты исследования явления МАЭ дают важную информацию об условиях и степени нелинейности системы и магнитоакустического взаимодействия, магнитоупругих константах, величине и динамике внутренних магнитных полей [6].

Цели и задачи настоящего исследования

Цель данной работы – выявление критических явлений и новых особенностей релаксационных и нелинейных магнитных и магнитоупругих свойств тонких магнитных плёнок, частиц и ансамблей частиц в

радиочастотных (ВЧ и СВЧ диапазоны) магнитных полях. Для достижения поставленной цели был решен ряд задач:

1. Теоретическое изучение зависимости времени магнитной релаксации в области ферромагнитного резонанса (**ФМР**) в тонких магнитных плёнках от параметров внешних воздействий в линейном и нелинейном режимах.
2. Экспериментальное исследование зависимости частоты магнитной релаксации f_r в тонких композитных плёнках, состоящих из ферромагнитной и диэлектрической фаз, от состава и внешних воздействий, приводящих к изменению топологии наноструктуры плёнки.
3. Изучение нелинейной динамики магнитоупругих колебаний тонкой ферритовой плёнки, частицы с учетом релаксации, вблизи акустического резонанса при возбуждении их радиоимпульсным магнитным полем.
4. Развитие теории нелинейного МАЭ с учётом членов с большим порядком нелинейности в выражении для свободной энергии частиц; изучение влияния релаксации на нелинейные эффекты на примере явления МАЭ.

Научная новизна работы

В данной работе, определены частоты релаксации намагничённости композитных плёнок при различной топологии наноструктурных элементов (ферромагнитных и диэлектрических наночастиц, гранул и т.п.). Впервые обнаружен эффект значительного изменения частоты релаксации намагничённости f_r в этих плёнках вблизи порога перколяции, вызванный изменением топологии наноструктуры эле-

ментов, происходящем при изменении состава, уменьшении температуры или температурного отжига образцов.

Выявлено сильное влияние материальных параметров на релаксационные и нелинейные свойства ферритовых плёнок и частиц в области ФМР и акустического резонанса (АР). Выявлены две области релаксации магнитоупругих колебаний после действия импульса переменного поля в ферритовой пленке, которые характеризуются сильно отличающимися временами релаксации τ_r . Определена область значений параметра магнитной диссипации α , в которой взаимодействие магнитной и упругой подсистем является наибольшим. Предложена методика определения времени релаксации магнитоупругих колебаний плёнок и частиц в нелинейном режиме по значению времени установления стационарного режима магнитных или упругих колебаний.

Показано возникновение магнитоупругих автоколебаний релаксационного типа в ферритовой пленке вблизи АР при превышении порогового значения амплитуды переменного поля. Вычислена пороговая амплитуда возбуждения магнитоупругих автоколебаний в зависимости от материальных параметров и внешних воздействий.

Получены аналитическое выражение и численное решение, описывающие поведение сигналов МАЭ в зависимости от параметров возбуждающих импульсов и внешних воздействий.

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты исследований магнитной релаксации в композитных плёнках составов $(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_x(Al_2O_3)_{1-x}$ при разных концентрациях x ($0.32 < x < 0.6$) при комнатной температуре и 77 К, а также после отжига плёнок.

2. Зависимости амплитуд магнитных и упругих колебаний ферритовых плёнок и частиц в нелинейном режиме с учётом релаксации в области ФМР и акустического резонанса от времени, амплитуды переменного и постоянного магнитных полей, параметра магнитной диссипации, намагничённости насыщения, константы магнитоупругой связи.
3. Динамика и механизм зарождения и гашения магнитоупругих автоколебаний релаксационного типа в тонких ферритовых плёнках и частицах.
4. Зависимости амплитуды сигналов двухимпульсного магнитоакустического эха для ансамбля ферритовых частиц от амплитуд возбуждающих импульсов, интервала между импульсами.

Научная и практическая значимость работы

Полученные результаты являются качественно новыми и вносят существенный вклад в формирование современных представлений о релаксационных и нелинейных магнитных и магнитоупругих свойствах плёнок и ансамблей частиц. Они могут быть использованы при дальнейших теоретических исследованиях радиоимпульсной динамики магнитной и упругой подсистем твёрдых тел, включающих в себя наноразмерные структуры. Описание релаксационных и нелинейных эффектов в магнитных материалах является универсальным и может быть распространено на другие объекты. Приведённые в работе результаты могут оказаться полезными при решении нелинейных задач в других областях физики, изучающих нелинейные явления, например, в нелинейной оптике, физике плазмы, а также при изучении нелинейных динамических процессов в квантовых системах.

Обнаруженные критические явления в магнитной и магнитоупругой динамике, происходящие при изменении внешних факторов или наноструктуры материалов, открывают предпосылки для создания устройств обработки, преобразования упругих колебаний и волн и магнитоакустических преобразователей. В данной работе приведены оптимальные характеристики ферритовых материалов, которые могут быть использованы для создания акустических усилителей с радиоимпульсной магнитной накачкой на основе тонких ферритовых плёнок и частиц.

Апробация работы

Основные результаты, приведенные в диссертации, докладывались на III-IV Всероссийских научных конференциях студентов-радиофизиков (Санкт-Петербург, 1999 и 2000); Международных школах-семинарах «Новые магнитные материалы микроэлектроники» (Москва, 2002, 2004, 2006); 16 Международном симпозиуме по нелинейной акустике (Москва, 2002); Международном семинаре: «Выездная секция по проблемам магнетизма в магнитных пленках, малых частицах и наноструктурных объектах» (Астрахань, 2003); Международных зимних школах физиков-теоретиков «Коуровка» (Кыштым, 2004, 2006); на III-ем Московском Международном Симпозиуме по Магнетизму (Москва, 2005); на 14 Международной конференции по внутреннему трению и механической спектроскопии (Киото, Япония, 2005); на III Объединенном Европейском симпозиуме по магнетизму (Сан-Себастьян, Испания, 2006); Выездной сессии научного совета РАН по магнитоакустике и акустоэлектронике (Сыктывкар, 2004); на 15 Коми республиканской молодёжной научной конференции (Сыктывкар, 2004); а также на многочисленных республиканских, внутри вузовских и научных семинарах Сыктывкарского государственного университета.

Публикации

Результаты работы опубликованы в 2 статьях в международных реферируемых и рецензируемых журналах, 1 статье в центральной печати, 10 статьях в сборниках трудов международных конференций, из них 7 в трудах Международной школы-семинара «Новые магнитные материалы микроэлектроники (НМММ)», в 2 статьях Вестника СыктГУ, и 25 тезисах всероссийских и международных конференций.

Структура и объём работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитированной литературы и авторского списка. Работа изложена на 149 страницах. Список литературы содержит 120 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследуемой проблемы, сформулирована цель и задачи диссертационной работы, обозначены полученные в диссертации новые результаты, раскрыты научная и практическая значимость работы, описана структура диссертации.

Первая глава посвящена литературному обзору по магнитной и магнитоупругой ВЧ и СВЧ динамике ограниченных образцов. Рассмотрены линейные и нелинейные магнитные и магнитоупругие колебания, их релаксация. Описаны способы возбуждения колебаний и условия резонансов для них в случаях объемных образцов, плёнок, частиц, пленочных структур и ансамблей частиц. Магнитная динамика описана на основе уравнения Ландау-Лифшица [1]:

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\gamma [\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff}] + \mathbf{R}, \quad (1)$$

где \mathbf{M} - вектор намагниченности, γ - гиромагнитное отношение, \mathbf{H}_{eff} - эффективное магнитное поле, действующее на намагниченность, \mathbf{R} - релаксационный член.

В случае магнитоупругой динамики выражение (1) дополняется уравнениями для компонент вектора упругого смещения:

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} + 2\rho\Gamma \frac{\partial u_i}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k}, \quad (2)$$

где ρ - плотность среды, u_i - компоненты вектора упругого смещения ($i=x,y,z$), Γ - частота релаксации упругих колебаний, σ_{ik} - тензор упругих напряжений, x_k - пространственные координаты. На основе решений уравнений (1, 2) определены частоты ферромагнитного и акустического резонансов и исследована нелинейная и релаксационная динамика намагниченности в ферритовых пленках и частицах.

Во второй главе проведена оценка корректности используемой в работе нелинейной модели и рассмотрена методика численного расчета решения системы уравнений, описывающей магнитную и магнитоупругую динамику пленок и частиц. Магнитная динамика описывалась на основе уравнения Ландау-Лифшица с релаксационным членом в форме Гильберта [1], упругая динамика описывалась на основе уравнения (2). Рассмотрены методы определения основных слагаемых эффективного поля \mathbf{H}_{eff} и приведен вывод усредненной по пространственным координатам системы уравнений, описывающей магнитоупругую динамику пленок и частиц при наличии магнитной, магнитоупругой и упругой нелинейностей.

В третьей главе исследованы линейные и нелинейные магнитные колебания и их релаксация в пленках при ФМР. Экспериментально исследована магнитная релаксация при условии линейного ФМР

нанокompозитных пленок составов $(Fe_{45}Co_{45}Zr_{10})_x(Al_2O_3)_{1-x}$, x – концентрация металлической фазы. Определены значения частот релаксации намагниченности f_r в пленках в зависимости от x . После некоторого увеличения f_r наблюдается сильный спад f_r (более, чем на порядок) при увеличении x от 0.32 до 0.6. Наличие такой зависимости $f_r(x)$ связано с тем, что изменение x приводит к изменению топологии наноструктуры плёнки, состоящей из ферромагнитной и диэлектрической фаз. При малых x , топология наноструктуры представляет собой ансамбль ферромагнитных наночастиц, распределённых в диэлектрической матрице, а при больших x , плёнка становится почти сплошной ферромагнитной средой с хаотически распределёнными в ней диэлектрическими наночастицами. Обнаружено резкое увеличение частоты релаксации намагниченности f_r для пленок с доперколяционной концентрацией $x < 0.42$, при охлаждении пленок до азотных температур или при отжиге пленок.

Выявлены механизмы магнитной диссипации, ответственные за сильную зависимость частоты релаксации от x .

Исследовано поведение формы линии нелинейного ФМР перпендикулярно намагниченной ферритовой пленки, при изменении амплитуды СВЧ поля h_0 , величины постоянного поля, параметра диссипации намагниченности α . Получена зависимость времени магнитной релаксации от величины внутреннего постоянного поля H_0^{in} , h_0 и α по полуширине линии ФМР и по времени установления стационарного колебательного режима.

В четвертой главе исследованы особенности магнитоупругих колебаний и их релаксация в ферритовой пленке при ФМР, вблизи акустического резонанса (АР). Определена зависимость времени ре-

лаксации магнитоупругих колебаний τ_r при соблюдении условий АР от параметра магнитной диссипации α , а также материальных параметров и внешних магнитных полей. В частности, показано, что сильное влияние на время релаксации τ_r оказывают параметры, определяющие степень магнитоупругой связи: константа магнитоупругой связи b_2 (рис. 1а) и намагниченность насыщения M_S (рис. 1б).

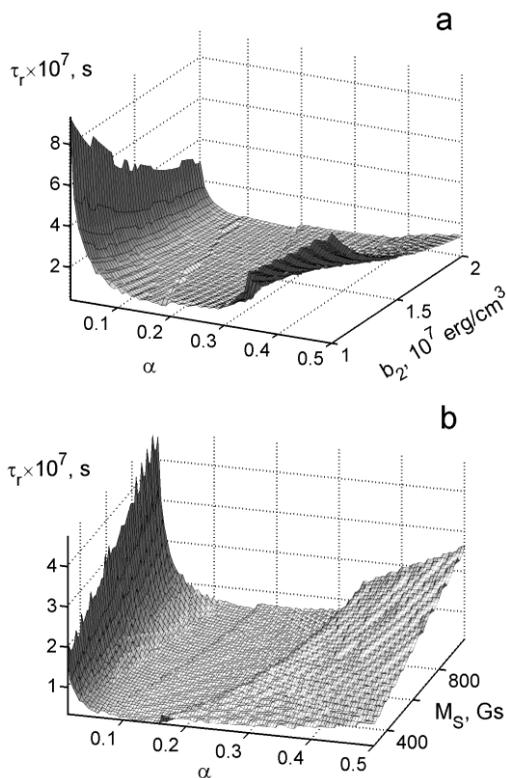


Рис. 1. Зависимость времени релаксации τ_r магнитоупругих колебаний от α и b_2 при $M_S=600 Gs$ (а), а также от α и M_S при $b_2 = 1.8 \cdot 10^7 \text{ erg/cm}^3$ (б). $H_0^m = 10 \text{ Oe}$, $h_0 = 3 \text{ Oe}$.

Выявлена область значений α , в которой взаимодействие магнитной и упругой подсистем является наибольшим. На рис. 1 эта область соответствует значениям α , при которых наблюдается минимальное время $\tau_r(\alpha)$. Показано, что ширина области минимума $\Delta\tau_r(\alpha)$ коррелирует с величиной $B_2 = b_2 / M_S$, определяющей эффективность магнитоупругой связи при АР. Область минимума времени релаксации сужается при уменьшении B_2 (рис. 1). Выявлен нелинейный режим релаксации магнитоупругих колебаний после действия импульса переменного поля, который проявляется в наличии нескольких, иногда сильно отличающихся (на порядок и более), времен релаксации.

Описано возникновение магнитоупругих автоколебаний релаксационного типа вблизи АР при превышении порогового значения амплитуды переменного поля. Определена пороговая амплитуда возбуждения магнитоупругих автоколебаний от параметра магнитной диссипации α , внутреннего постоянного магнитного поля H_0^{in} (рис. 2), намагниченности насыщения материала пленки M_S , константы магнитоупругой связи b_2 (рис. 3) и относительной расстройки частоты магнитной и упругой подсистем ξ :

$$\xi = (\omega_0 - \Omega_1) / \omega_0, \quad (3)$$

где Ω_1 - частота первой акустической моды, ω_0 - частота нелинейного ФМР. Из рис. 2 следует, что пороговая амплитуда возбуждения автоколебаний h_{thr} немонотонно возрастает при увеличении параметра магнитной диссипации α и постоянного поля. Из рис. 3 видно, что зависимость пороговой амплитуды h_{thr} от константы магнитоупругой связи b_2 имеет осциллирующий характер. При некоторых значениях b_2 возбуждение автоколебаний возникает при незначительной амплитуде поля в

области минимума $h_{\text{thr}}(b_2)$. При увеличении намагниченности M_S для плёнок, первый максимум, и следующий за ним минимум расширяется и смещается в область больших констант магнитоупругой связи b_2 .

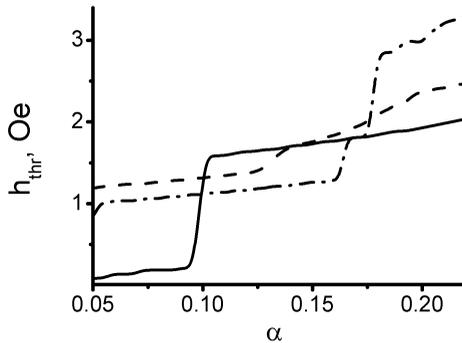


Рис. 2. Зависимость пороговой амплитуды возбуждения автоколебаний h_{thr} от α при разных значениях H_0^{in} (в Oe): — - 5; ---- - 10; -.-.- - 20. $M_S=300$ Gs, $b_2 = 1.5 \cdot 10^7$ erg/cm³, $\xi=0.015$.

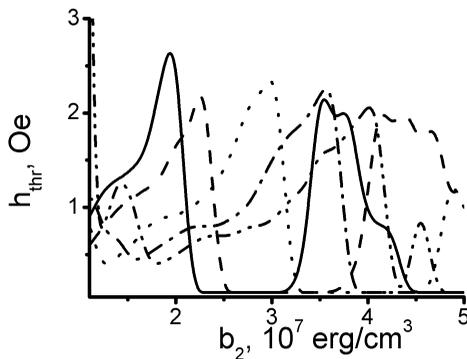


Рис. 3. Зависимость пороговой амплитуды возбуждения автоколебаний h_{thr} от b_2 при разных значениях M_S (в Gs): — - 300; ---- - 400; - 600; -.-.- - 800; -.-.-.- - 1000. $H_0^{\text{in}}=10$ Oe, $\alpha=0.1$, $\xi=0.015$.

В пятой главе приведены результаты исследований зависимости амплитуды и времени релаксации, нелинейных магнитоупругих колебаний ансамбля ферритовых частиц, возбуждённых двумя радиоимпульсами магнитного поля с интервалом τ . Получено аналитическое выражение, описывающее сигналы магнитоакустического эха (МАЭ) для малых амплитуд возбуждающих импульсов. Для случая больших амплитуд возбуждающих импульсов численно исследована зависимость амплитуды сигналов МАЭ от интервала τ между возбуждающими радиоимпульсами и от амплитуды поля. Проведён анализ экспериментальных и расчетных данных времени релаксации в зависимости от величины постоянного поля.

В заключении приводятся основные выводы по диссертационной работе.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ

[1] *Власов, В.С.* Высокочастотная долговременная память в порошках ферритов [Текст] / В.С. Власов // II Всероссийская конференция студентов-радиофизиков: тез. докл. (Санкт-Петербург, 1-2 декабря 1998 г.). –СПб: из-во СПбГУ, 1998. – С. 23–25.

[2] *Власов, В.С.* Расчет сигналов высокочастотной памяти в порошках ферритов на основе «внутренней» модели [Текст] / В.С. Власов // III Всероссийская конференция студентов-радиофизиков: тез. докл. (Санкт-Петербург, 30 ноября-2 декабря 1999 г.). –СПб: из-во СПбГУ, 1999. – С. 30–32.

[3] *Власов, В.С.* Исследование долговременной памяти в ферритах [Текст] / В.С. Власов // 6 Всероссийская конференция студентов-

физиков и молодых учёных (ВНКСФ-6): тез. докл. (Томск, 28 марта-3 апреля 2000 г.). –Томск: из-во АСФ России, 2000. – С. 406–407.

[4] *Власов, В.С.* Электромагнитный отклик системы ферритовых частиц с учетом магнитоупругой связи [Текст] / В.С. Власов // IV Всероссийская конференция студентов-радиофизиков: тез. докл. (Санкт-Петербург, 5-7 декабря 2000 г.). –СПб: из-во СПбГУ, 2000. – С. 16–18.

[5] *Власов, В.С.* Расчет сигналов магнитоакустического эха в порошках ферритов [Текст] / В.С. Власов // Сборник научных работ аспирантов и молодых ученых Сыктывкарского Государственного Университета: – Сыктывкар: изд-во СыктГУ, 2002. Вып. 1. – С. 12–17.

[6] *Котов, Л.Н.* Расчет сигналов магнитоакустического эха с учетом упругого ангармонизма [Текст] / Л.Н. Котов, В.С. Власов // «Новые магнитные материалы микроэлектроники (НМММ-18)»: тр. XVIII междунар. шк. –сем. (Москва, 25-28 июня 2002 г.). – Москва, 2002. – С. 830–832.

[7] *Kotov, L.N.* Calculation of magnetoacoustic echo signals in the ferrite powder [Text] / L.N. Kotov, V.S. Vlasov, S.N. Karpachev // 16th International Symposium on Nonlinear Acoustics (ISNA-16): abstr. of intern. symp. (Moscow, August 19-22, 2002). – Moscow: MSU, 2002. – P. 54.

[8] *Kotov, L.N.* Calculation of Magnetoacoustic Echo in Ferrite Powders [Text] / L.N. Kotov, V.S. Vlasov, S.N. Karpachev // «Nonlinear Acoustics at the Beginning of the 21st Century»: proceedings of intern. symp. (ISNA-16). – Moscow: MSU, 2002. – V. 2. – P. 677–680.

[9] *Власов, В.С.* Расчет сигналов магнитоакустического эха в области насыщения [Текст] / В.С. Власов // 9 Всероссийская конференция сту-

дентов-физиков и молодых учёных (ВНКСФ-9): тез. докл. (Красноярск, 28 марта-3 апреля 2003 г.). – Т.1. –Екатеринбург; Красноярск: изво АСФ России, 2003. – С. 299–301.

[10] *Котов, Л.Н.* Динамика намагниченности в ферритовых наночастицах с учётом магнитоупругой связи [Текст] / Л.Н. Котов, В.С. Власов, Ф.Ф. Асадуллин // «Выездная секция по проблемам магнетизма в магнитных пленках, малых частицах и наноструктурных объектах»: тр. междунар. сем. (Астрахань, 7-10 сентября 2003 г.). – Астрахань: АГУ, 2003. – С. 36–39.

[11] *Kotov, L.N.* Nonlinear dynamics of the magnetization in ferrite nanoparticles in the area of the magnetoacoustic resonance [Text] / L.N. Kotov, V.S. Vlasov // «Functional Materials» (ICFM-2003): abstr. of intern. conf. (Ukraine, Crimea, Partenit, October 6-11, 2003). –Partenit, 2003. – P. 10.

[12] *Котов, Л.Н.* Исследование релаксационных свойств намагниченности в ферритовых малых частицах [Текст] / Л.Н. Котов, В.С. Власов, Ф.Ф. Асадуллин, В.А. Богданов // «Новые магнитные материалы микроэлектроники (НМММ-19)»: тр. XIX междунар. шк. –сем. (Москва, 28 июня-2 июля 2004 г.). – Москва, 2004. – С. 304.

[13] *Котов, Л.Н.* Нелинейные магнитоупругие колебания в малых ферритовых частицах при резонансных условиях [Текст] / Л.Н. Котов, В.С. Власов // «Новые магнитные материалы микроэлектроники (НМММ-19)»: тр. XIX междунар. шк. –сем. (Москва, 28 июня-2 июля 2004 г.). – Москва, 2004. – С. 249–251.

[14] *Асадуллин, Ф.Ф.* Нутационная динамика намагниченности в ферромагнетиках [Текст] / Л.Н. Котов, Г.В. Уфимцев, С.М. Полещиков, В.С. Власов // «Новые магнитные материалы микроэлектроники

(НМММ-19)»: тр. XIX междунар. шк. –сем. (Москва, 28 июня-2 июля 2004 г.). – Москва, 2004. – С. 119–121.

[15] *Котов, Л.Н.* Особенности нелинейного магнитоакустического резонанса в малых ферритовых частицах и плёнках [Текст] / Л.Н. Котов, В.С. Власов, Д.Е. Цуриков, Ф.Ф. Асадуллин // Магнитные фазовые переходы: сб. тр. VI междунар. сем., посвященного памяти К.П. Белова (Махачкала, 7-10 сентября 2004 г.). – Махачкала, 2004. – С. 61–64.

[16] *Власов, В.С.* Особенности нелинейной динамики магнитной и упругой подсистем малых частиц [Текст] / В.С. Власов // XV Коми республиканская молодежная научная конференция: тез. докл. (Сыктывкар, 19-23 апреля 2004 г.). – Т. 1. – Сыктывкар, 2004. – С. 26–28.

[17] *Власов, В.С.* Исследование релаксационных свойств намагничённости в ферритах [Текст] / Власов В.С., Иванов А.П., Котов Л.Н., Богданов В.А., Асадуллин Ф.Ф. // «Коуровка-2006»: тез. докл. XXX междунар. зимней шк. физиков-теоретиков (Кыштым, 22-28 февраля 2004 г.). – Екатеринбург; Челябинск, 2004. – С. 138.

[18] *Асадуллин, Ф.Ф.* Исследование динамики намагничённости на основе аналитического решения уравнения Гильберта [Текст] / Асадуллин Ф.Ф., Уфимцев Г.В., Котов Л.Н., Власов В.С. // «Коуровка-2006»: тез. докл. XXX междунар. зимней шк. физиков-теоретиков (Кыштым, 22-28 февраля 2004 г.). – Екатеринбург; Челябинск, 2004. – С. 162.

[19] *Власов, В.С.* Особенности нелинейной динамики магнитной и упругой подсистем малых частиц [Текст] / Власов В.С., Котов Л.Н., Асадуллин Ф.Ф. // «Коуровка-2006»: тез. докл. XXX междунар. зимней шк. физиков-теоретиков (Кыштым, 22-28 февраля 2004 г.). – Екатеринбург; Челябинск, 2004. – С. 182.

- [20] *Власов, В.С.* Исследование релаксации намагниченности в ферромагнетиках [Текст] / Власов В.С., Котов Л.Н., Асадуллин Ф.Ф. // The XXI International Conference on Relaxation Phenomena in Solids: abstr. of inter. conf. (Voronezh, October 5-8, 2004). – Voronezh, 2004. – P. 153.
- [21] *Власов, В.С.* Релаксация намагниченности в ферритовых частицах и пленках с магнитоупругой связью [Текст] / Власов В.С., Котов Л.Н. // The XXI International Conference on Relaxation Phenomena in Solids: abstr. of inter. conf. (Voronezh, October 5-8, 2004). – Voronezh, 2004. – P. 211.
- [22] *Власов, В.С.* Особенности нелинейной динамики магнитной и упругой подсистем малых частиц [Текст] / Власов В.С. // 10 Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-10): тез. докл. (Москва, 1-7 апреля, 2004 г.). – Т.1. Екатеринбург; Москва: изд-во АСФ России, 2004. – С. 451–453.
- [23] *Vlasov, V.S.* Nonlinear oscillations in a thin ferrite film close to the condition of magnetoacoustic resonance [Text] / Vlasov V.S., Kotov L.N., Asadullin F.F.// Moscow International Symposium of Magnetism (MISM): book of abstract (Moscow, June 25-30, 2005). – Moscow: MSU, 2005. – P. 406–407.
- [24] *Asadullin, F.F.* Nutational dynamics of magnetization in ferromagnetics [Text] / Asadullin F.F., Kotov L.N., Ufimcev G.V., Poleshikov S.M. Vlasov V.S.// Moscow International Symposium of Magnetism (MISM): book of abstract (Moscow, June 25-30, 2005). – Moscow: MSU, 2005. – P. 430–431.
- [25] *Kotov, L.N.* Nonlinear relaxation phenomena in a ferrite film close to the condition of magnetoacoustic resonance [Text] / Kotov L.N., Asadullin F.F.,

Vlasov V.S.// «Functional Materials» (ICFM-2005): abstr. of inter. conf. (Ukraine, Crimea, Partenit, October 3-8, 2005). – Partenit, 2005. – P. 182.

[26] *Vlasov, V.S.* Relaxation of oscillations in a thin ferrite film in the condition of magnetoacoustic resonance [Text] / Vlasov V.S., Kotov L.N.// The 14th International Conference on Internal Friction and Mechanical Spectroscopy (ICIFMS-14): progr. & abstr. of intern. conf. (Kyoto, Japan, September 5-9, 2005). – Kyoto, 2005. – P. 127.

[27] *Kotov, L.N.* Relaxation of magnetization in thin composite films $(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_x(Al_2O_3)_{100-x}$ [Text] / Kotov L.N., Turkov V.K., Kalinin Yu.E., Sitnikov A.V., Vlasov V.S.// The 14th International Conference on Internal Friction and Mechanical Spectroscopy (ICIFMS-14): progr. & abstr. of intern. conf. (Kyoto, Japan, September 5-9, 2005). – Kyoto, 2005. – P. 135.

[28] *Котов, Л.Н.* Релаксация намагниченности в композитных плёнках составов $(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_x(Al_2O_3)_{1-x}$ [Текст] / Котов Л.Н., Турков В.К., Власов В.С., Носов Л.С., Асадуллин Ф.Ф., Калинин Ю.Е., Ситников А.В.// «Коуровка-2006»: тез. докл. XXXI междунар. зимней шк. физиков-теоретиков (Кыштым, 19-25 февраля 2006 г.). – Екатеринбург, 2006. – С. 101.

[29] *Власов, В.С.* Релаксационная динамика магнитоупругих колебаний тонкой ферритовой плёнки вблизи акустического резонанса [Текст] / Власов В.С., Котов Л.Н., Асадуллин Ф.Ф. // «Коуровка-2006»: тез. докл. XXXI междунар. зимней шк. физиков-теоретиков (Кыштым, 19-25 февраля 2006 г.). – Екатеринбург, 2006. – С. 120.

[30] *Асадуллин, Ф.Ф.* Нутационная динамика намагниченности в ферромагнетиках. [Текст] / Асадуллин Ф.Ф., Котов Л.Н., Уфимцев Г.В.,

Полещиков С.М., Носов Л.С., Власов В.С. // «Коуровка-2006»: тез. докл. XXXI междунар. зимней шк. физиков-теоретиков (Кыштым, 19-25 февраля 2006 г.). – Екатеринбург, 2006. – С. 142.

[31] *Котов, Л.Н.* Релаксация намагниченности и автоколебания в ферритовых плёнках с магнитоупругой связью [Текст] / Котов Л.Н., Власов В.С., Уляшев А.М. // Вестник Сыктывкарского Университета. Серия 2. – Сыктывкар: изд-во СыктГУ, 2006. – Вып. 1. – С. 4–13.

[32] *Vlasov, V.S.* Nonlinear oscillations in a thin ferrite film close to the condition of magnetoacoustic resonance [Text] / Vlasov V.S., Kotov L.N., Asadullin F.F. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2006. – Vol. 300, Issue 1. – P. e48–e51.

[33] *Власов, В.С.* Релаксационные нелинейные явления в тонкой ферритовой пленке вблизи акустического резонанса [Текст] / Власов В.С., Котов Л.Н., Асадуллин Ф.Ф. // «Новые магнитные материалы микроэлектроники (НМММ-XX)»: тр. XX междунар. шк. –сем. (Москва, 12 – 16 июня 2006 г.). – Москва, 2006. – С. 668–670.

[34] *Котов, Л.Н.* Расчет средних полей поликристаллических ферритов [Текст] / Котов Л.Н., Асадуллин Ф.Ф., Власов В.С., Носов Л.С., Полещиков С.М. // «Новые магнитные материалы микроэлектроники (НМММ-XX)»: тр. XX междунар. шк. –сем. (Москва, 12 – 16 июня 2006 г.). – Москва, 2006. – С. 715.

[35] *Котов, Л.Н.* Магнитные и релаксационные свойства тонких металл-диэлектрических пленок составов $(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_x(Al_2O_3)_{1-x}$ [Текст] / Котов Л.Н., Турков В.К., Власов В.С., Носов Л.С., Калинин Ю.Е., Ситников А.В., Асадуллин Ф.Ф. // «Новые магнитные материалы мик-

роэлектроники (НМММ-XX)»: тр. XX междунар. шк. –сем. (Москва 12 – 16 июня 2006 г.). – Москва, 2006. – С. 1041–1043.

[36] *Kotov, L.N.* Calculation of average fields of polycrystalline ferrite [Text] / Kotov L.N., Asadullin F.F., Vlasov V.S., Nosov L.S., Poleshchikov S.M., Asadullina N.S. // Joint European Magnetic Symposia (JEMS'06): abstr. of inter. symp. (San Sebastian, Spain, June 26-30, 2006). – San Sebastian, 2006. – P. 38.

[37] *Turkov, V.K.* Magnetic and Relaxation properties of thin composite films $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1-x}$ [Text] / Turkov V.K., Kotov L.N., Vlasov V.S., Kalinin Yu.E., Sitnikov A.V. // Joint European Magnetic Symposia (JEMS'06): abstr. of inter. symp. (San Sebastian, Spain, June 26-30, 2006). – San Sebastian, 2006. – P. 159.

[38] *Kotov, L.N.* Relaxation dynamics of nonlinear magnetoelastic oscillations in thin ferrite film [Text] / Kotov L.N., Vlasov V.S., Asadullin F.F. // Joint European Magnetic Symposia (JEMS'06): abstr. of inter. symp. (San Sebastian, Spain, June 26-30, 2006). – San Sebastian, 2006. – P. 219.

[39] *Vlasov, V.S.* Magnetoelastic autooscillations in thin ferrite film [Text] / Vlasov V.S., Kotov L.N. // International Conference on Magnetism (ICM 2006): abstr. of inter. conf. (Kyoto, Japan, August 20-25, 2006). – Kyoto, 2006. – P. 372.

[40] *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 [Text] / L. N. Kotov, V. K. Turkov, V.S. Vlasov, Yu. E. Kalinin, A. V. Sitnikov, F.F. Asadullin // Materials Science and Engineering: A. – 2006. – Vol. 442, Nos. 1-2. – P. 352–355.

[41] *Карпачев, С.Н.* Нелинейная релаксационная динамика магнитной и упругой подсистем тонкой ферритовой пленки вблизи акустического резонанса [Текст] / Карпачев С.Н., Власов В.С., Котов Л.Н. // Вестник Московского Университета. Серия 3. – 2006. – №6. – С. 60–62.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

[1] *Гуревич, А.Г.* Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках [Текст] / А.Г. Гуревич. – М.: Наука, 1973. – 464 с.

[2] *Mitani, S.* Anomalous behavior of temperature and bias-voltage dependence of tunnel-type giant magnetoresistance in insulating granular systems [Text] / S. Mitani, K. Takanashi, K. Yakushiji, H. Fujimori // J. Appl. Phys. – 1998. V. 83, №11. – P. 6524–6526.

[3] *Butera, A.* Ferromagnetic resonance in as-deposited and annealed Fe-SiO₂ heterogeneous thin films [Text] / A. Butera, J.N. Zhou, J.A. Barnard // Phys. Rev. B. – 1999. V. 60, №17. – P. 12270–12278.

[4] *Аронзон, Б.А.* Концентрационное поведение аномального эффекта Холла в гранулированных пленках Fe/SiO₂ ниже порога протекания [Текст] / Б.А. Аронзон, А.Б. Грановский [и др.] // Письма в ЖЭТФ. – 2000. –Т. 71, № 11. – С. 687–692.

[5] *Котов, Л.Н.* Переориентация намагниченности в однодоменных частицах и отклик на импульс поля [Текст] / Л.Н. Котов, Л.С. Носов // ЖТФ. – 2005. – Т. 75, № 10. – С. 55–60.

[6] *Голдин, Б.А.* Спин - фононные взаимодействия в кристаллах (ферритах) [Текст] / Б.А. Голдин, Л.Н. Котов, Л.К. Зарембо, С.Н. Карпачев. – Л.: Наука, 1991. – 149 с.

ООП СыктГУ. Заказ К-141. Тираж 120 экз.