

На правах рукописи

Плешев Дмитрий Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ МАГНИТОУПРУГОЙ
ДИНАМИКИ В ОДНО- И МНОГОСЛОЙНЫХ МАГНИТНЫХ
ПЛЕНКАХ**

Специальность 01.04.07. – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Сыктывкар - 2017

Работа выполнена на кафедре «Радиофизики и электроники» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сыктывкарский государственный университет имени Питирима Соркина»

Научный руководитель:	доктор физико-математических наук, доцент Асадуллин Фанур Фаритович
Официальные оппоненты:	Вахитов Роберт Миннисламович доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической физики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Башкирский государственный университет» Буцько Леонид Николаевич кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей и прикладной физики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Челябинский государственный университет»
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики им. Х.И. Амирханова» Дагестанского научного центра РАН

Защита состоится «__» _____ 2017 г. в 16-00 на заседании диссертационного совета Д 212.296.03 в Челябинском государственном университете по адресу: 454001, г. Челябинск, ул. Бр. Кашириных, 129, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Челябинского государственного университета.

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,
профессор

Е.А. Беленков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Актуальность исследований релаксационных, магнитных и магнитоупругих свойств тонких твердых моно- и поликристаллических пленок, композитных и многослойных пленок, а также разработка моделей их поведения в импульсных и переменных магнитных полях представляют собой важное и быстро развивающееся направление физики [1, 2]. Это связано, в первую очередь, с возможностью наблюдения принципиально новых эффектов, которые невозможно получить в массивных образцах [3, 4]. Бурное развитие спинтроники и магнитоакустики [3, 4], в рамках развития прикладной электроники, стимулирует развитие фундаментальных областей физической науки, а это в свою очередь стимулирует развитие вычислительной техники.

На сегодняшний день магнитные пленки, созданные на основе многослойных структур, используются при построении датчиков магнитного поля [4, 5], датчиков наночастиц, биосенсоров, а также одноэлектронных устройств [6, 7].

На основе реализации управления внешним воздействием на вектор намагниченности в магнетиках возможно создание новых типов устройств хранения данных, таких как оперативная память на основе многослойных магнитных структур [8], а также наноманитная элементная база для вычислительных устройств на мультиферроидной логике [9].

В настоящее время для создания высокоэффективных малоразмерных магнитных устройств используются разнообразные методы управления магнитным порядком ферромагнетика, в том числе с использованием внешних магнитных полей, микромеханические, электрические и оптические методы [10-13]. Однако, при возбуждении магнитной подсистемы магнетиков одним из вышеуказанных методов, явление магнитострикции вызывает процесс магнитоупругого или магнитоакустического взаимодействия, что может отрицательно сказываться на стабильность работы подобных устройств.

Несмотря на активное изучение магнитной, упругой и магнитоупругой динамики в тонких пленках магнетиков и в связи с разнообразием видов материалов, их структурных и материальных характеристик, поведение одно- и многослойных пленок в магнитных полях остается мало изученным.

В настоящей работе проведено исследование магнитоупругой динамики однослойных и многослойных пленок магнетиков при воздействии на них постоянных и переменных магнитных полей. Диссертационная работа является частью комплексных исследований,

проводимых на кафедре радиофизики и электроники ФГБОУ ВО «Сыктывкарский государственный университет имени Питирима Сорокина» при финансовой поддержке Министерства образования и науки (тематический план НИР «Сыктывкарского государственного университета имени Питирима Сорокина» 2016-2017), грантов РФФИ №13-02-01401-а.

Цель и задачи диссертационной работы

Целью диссертационной работы является исследование взаимосвязи между структурой одно- и многослойных магнитных пленок и их магнитной и упругой динамикой при воздействии на них постоянных и переменных магнитных полей.

В связи с поставленной целью решались следующие задачи:

1. Построение теоретической модели нелинейного взаимодействия магнитной и упругой подсистем в безобменном приближении с учетом магнитокристаллической анизотропии для описания магнитных и упругих характеристик одно- и многослойных пленок.
2. Выявление влияния значений материальных параметров образцов, таких как размер, намагниченность насыщения, магнитокристаллическая анизотропия и параметры магнитной и упругой диссипации на магнитную, упругую и магнитоупругую динамику однослойных пленок.
3. Изучение зависимостей динамики магнитной и упругой подсистем от структуры и материальных характеристик слоев трехслойных магнитных пленок.
4. Исследование влияния материальных характеристик магнитных пленок и параметров переменного поля на магнитоупругую динамику при преобразовании частот.
5. Исследование влияния материальных характеристик пленок на динамику магнитной и упругой подсистем при перемагничивании постоянным полем.

Методы исследования

В ходе выполнения данной работы использовались хорошо зарекомендовавшие себя методы:

1. Численные методы решения трансцендентных уравнений и систем дифференциальных уравнений, в том числе метод прямых и метод разложения по собственным функциям.
2. Оригинальные численные коды и программы расчета магнитоакустических волн в пленках и частицах.

Для численного решения систем дифференциальных уравнений использовался метод Рунге-Кутты 4-5 и 7-8 порядка точности с контролем длины шага интегрирования.

Научная новизна работы

В диссертационной работе впервые:

1. Установлено влияние материальных параметров образца, вида кристаллографической анизотропии, соотношения значений частот переменного поля и акустического резонанса пленки в различных режимах возбуждения на динамику магнитной и упругой подсистем магнитной пленки.
2. Выявлено, что возникновение статической деформации образца возможно в случае, когда намагниченность насыщения на внешних слоях магнитной пленки больше, чем намагниченность насыщения внутреннего слоя.
3. Установлено, что, при магнитострикционном преобразовании частот за счет подбора соотношения частоты акустического резонанса магнитной пленки и частоты переменного поля, увеличение кратности деления частоты приводит к увеличению амплитуды колебаний упругого смещения на частоте акустического резонанса, а увеличение кратности умножения частоты к уменьшению амплитуды колебаний упругого смещения на частоте акустического резонанса.
4. Показано, что увеличение значения намагниченности насыщения пленки вызывает рост амплитуды колебаний упругого смещения. Характерные времена развития колебаний упругого смещения минимальны в случае, когда частота переменного поля находится вблизи ФМР.

Положения, выносимые на защиту:

1. Динамика магнитной и упругой подсистем магнитных пленок зависит от материальных параметров образца, вида кристаллографической анизотропии, соотношения значений частот переменного поля и акустического резонанса пленки в различных режимах возбуждения.
2. Режимы прецессии вектора намагниченности и колебания упругого смещения зависят от распределения потенциальных барьеров поля анизотропии в кристаллической решетке.
3. Колебания упругого смещения в трехслойной тонкой магнитной пленке зависят от распределения намагниченности насыщения этих слоев в объеме пленки.
4. Амплитуды колебаний упругого смещения на частоте переменного поля и частоте акустического резонанса пленки зависят от распределения моды упругой волны в объеме образца.

5. Характерные времена развития колебаний компонент вектора намагниченности и упругих смещений при перемагничивании пленки постоянным полем зависят от параметра упругой диссипации.

Научная и практическая значимость работы

Полученные результаты расширяют теоретические знания о магнитоупругих свойствах магнитных пленок в динамическом режиме. Они могут быть использованы в теоретических и экспериментальных исследованиях, проводимых в научных лабораториях «Сыктывкарского государственного университета имени Питирима Сорокина», «Челябинского государственного университета», «Институт радиотехники и электроники Российской академии наук», а также «Института физики им. Х.И. Амирханова Дагестанского научного центра РАН». Результаты численных экспериментов могут ускорить процесс выбора материала при реализации магнитострикционных генераторов, преобразователей частот, устройств хранения данных и наномагнитной элементной базы. Полученные объемные прецессионные портреты колебаний вектора намагниченности в различных режимах возбуждения позволяют прогнозировать динамику намагниченности в пленках с различными материальными параметрами.

Разработанное программное обеспечение позволяет с высокой точностью (7-8 порядка точности) моделировать динамику намагниченности и упругого смещения, а также обрабатывать полученные данные, обладает гибкостью и универсальностью. Программное обеспечение имеет большое количество настраиваемых параметров, позволяющих существенно упростить моделирование свойств тонких пленок, а при необходимости, задавать любые параметры образца.

Достоверность результатов

Достоверность полученных результатов моделирования обеспечивается использованием зарекомендовавших себя методов, корректностью математической постановки задачи, непротиворечивостью результатов исследования основным физическим законам и явлениям, возможностью их физической интерпретации, а также путем их сравнения с результатами, полученными другими авторами, которые хорошо коррелируют с значениями, полученными в данной диссертации [14-17].

Личный вклад соискателя

Личный вклад автора состоит в участии в формулировке цели и задач исследования, в выборе методов решения задач и разработке программного обеспечения для расчета динамики намагниченности и упругих смещений, в подготовке публикаций по результатам работы и апробации результатов на научных конференциях. Основываясь на результатах

расчетов, полученных лично либо с его непосредственным участием, автор провел анализ связи структуры магнитных пленок и материальных параметров с их магнитной, упругой и магнитоупругой динамикой в постоянных и переменных магнитных полях, сравнил полученные результаты с результатами, полученными другими авторами.

Апробация работы

Основные результаты диссертации обсуждались на семинарах кафедры «Радиофизики и электроники» ФГБОУ ВО «Сыктывкарский государственный университет имени Питирима Сорокина» и представлялись на конференциях: XIII Всероссийской школе-семинаре по проблемам физики конденсированного состояния вещества (Екатеринбург, 2013); Moscow International Symposium on Magnetism (Москва, 2014); Международной зимней школе физиков-теоретиков «Коуровка-XXXV» (Екатеринбург, 2014); Spin Waves 2015 International Symposium (Санкт-Петербург, 2015); 20th International Conference on Magnetism (Барселона, 2015); Международной конференции, посвящённой 80-летию члена-корреспондента РАН И. К. Камилова «Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах» (Челябинск, 2015); VI Euro-Asian Symposium «Trends in Magnetism» (Красноярск, 2016); ежегодных «Февральских чтениях» (Сыктывкар, 2015-2017); Moscow International Symposium on Magnetism 2017 (Москва, 2017).

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 19 работ, из них 5 статей в рецензируемых изданиях рекомендованных ВАК, 13 тезисов докладов, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Список публикаций представлен в конце автореферата. Копия свидетельства прилагается в конце диссертации.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Полный объем текста составляет 128 страниц, включая 54 рисунка. Список цитированной литературы содержит 77 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследуемой проблемы, сформулирована цель, задачи диссертационной работы и выносимые на защиту положения, обозначены полученные в диссертации новые результаты, а также приведен список конференций, на которых они обсуждались, раскрыты научная и практическая значимость работы, представлено краткое содержание и описана структура диссертации. Во введении

приведено обоснование дальнейших перспектив подобных исследований в рамках создания новых типов устройств хранения данных и наномангнитной элементной базы для вычислительных устройств на мультиферроидной логике.

В первой главе приведен литературный обзор по экспериментальным и теоретическим исследованиям динамики намагниченности и упругих смещений в ферромагнетиках последних лет. Представлены основные положения феноменологической теории магнитоупругих взаимодействий. Также в этой главе приведены наиболее эффективные методы возбуждения магнитной, упругой и магнитоупругой динамики в ферритовых пленках.

Вторая глава посвящена динамике намагниченности и упругих смещений в однослойных пленках подмагниченных постоянным магнитным полем при возбуждении переменным магнитным полем. Также в главе представлена используемая при численном моделировании однослойных пленок магнетиков система уравнений, основанная на методе разложения по собственным функциям [A16], и геометрия задачи (рис. 1).

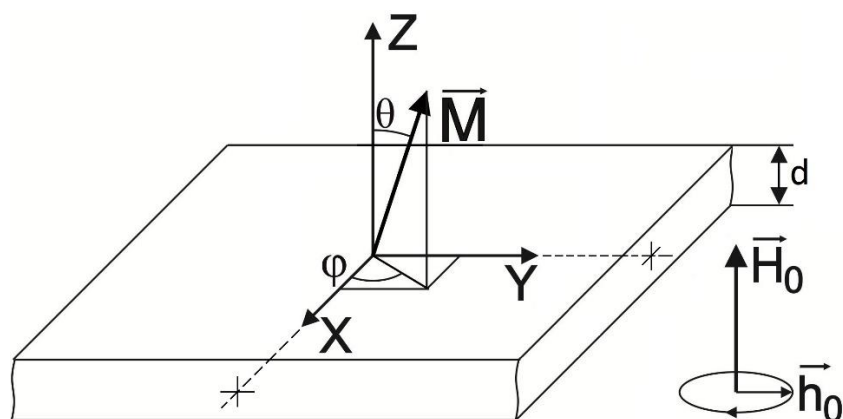


Рис.1. Геометрия задачи для однослойной пленки.

В разделе 2.1 описывается магнитная, упругая и магнитоупругая динамика в однослойной пленке ферромагнетика в переменном поле с учетом диссипации. Для описания процессов, связанных с движением вектора намагниченности и колебаний упругого смещения используется уравнение Ландау-Лифшица-Гильберта, уравнение компоненты вектора упругих смещений, дополненное граничными условиями, и компоненты эффективных полей.

В разделе 2.2 приводится теоретическое рассмотрение процессов возникновения прецессии первого и второго порядков.

Далее в разделе 2.3 рассматривается прецессия вектора намагниченности в изотропной однослойной магнитной пленке, в отсутствие магнитоупругой связи. В разделе приведены основные типы прецессии вектора намагниченности в изотропных пленках

магнетиков: **режим А** – малоамплитудная прецессия (рис. 2а), **режим В** – прецессия положения равновесия без охвата центра (рис. 2б), **режим С** – прецессия положения равновесия с охватом центра (рис. 2с), **режим D** – затухающая прецессия положения равновесия (рис. 2d). Все режимы сменяют друг друга с ростом амплитуды переменного поля с частотой $\omega_0 = 9 \cdot 10^{10} \text{ c}^{-1}$.

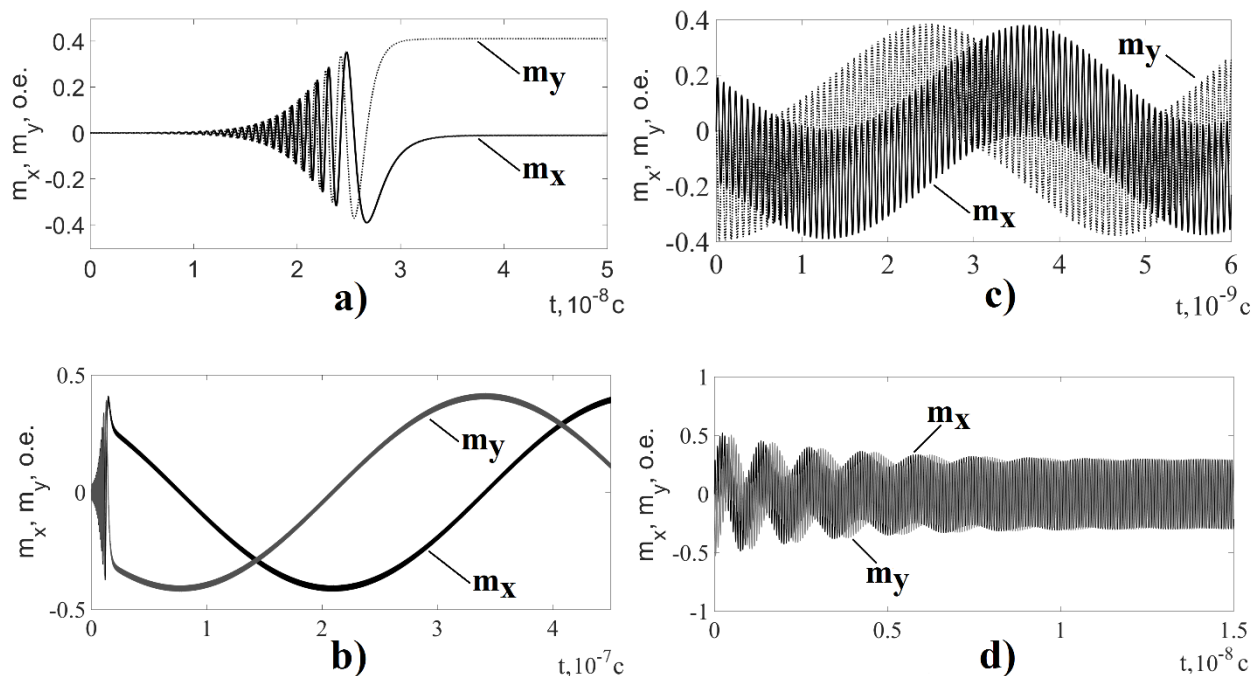


Рис. 2. Виды прецессии вектора намагниченности: **режим А** ($h_{0x} = h_{0y} = 1 \text{ Э}$), **режим В** ($h_{0x} = h_{0y} = 75 \text{ Э}$), **режим С** ($h_{0x} = h_{0y} = 10^3 \text{ Э}$), **режим D** ($h_{0x} = h_{0y} = 1.5 \cdot 10^3 \text{ Э}$).

На рис. 3. представлена амплитудно-частотная характеристика колебаний компоненты намагниченности m_x в изотропной однослойной пленке в отсутствие магнитоупругой связи в зависимости от амплитуды переменного магнитного поля.

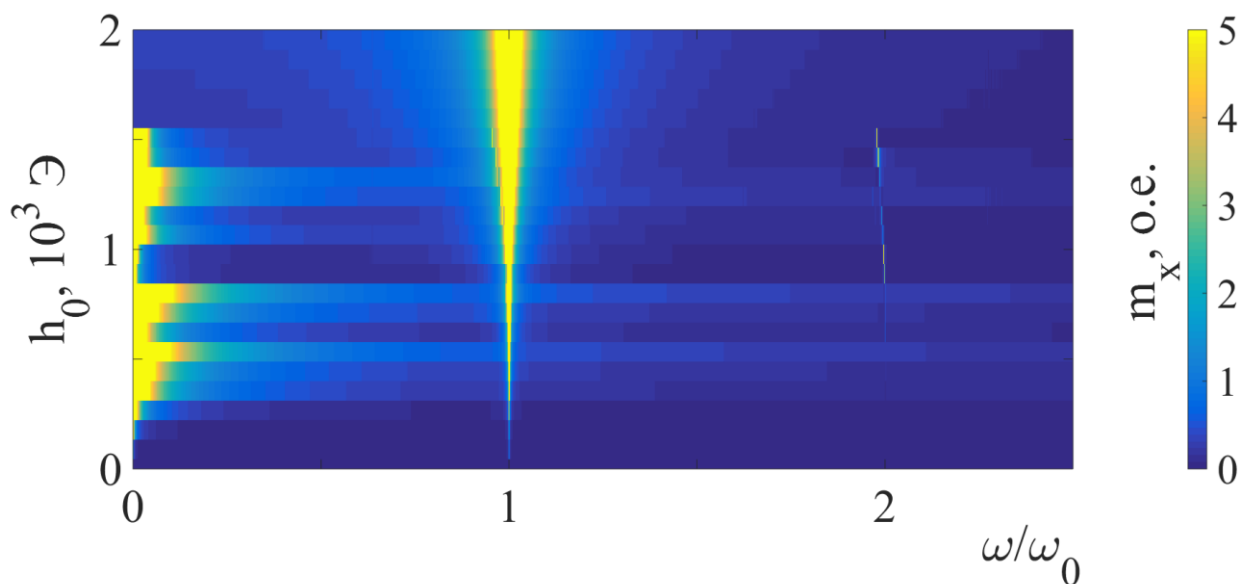


Рис. 3. Амплитудно-частотная зависимость колебаний компоненты намагниченности m_x изотропной однослойной пленки от напряженности переменного поля. $\omega_0 = 9 \cdot 10^{10} \text{ c}^{-1}$.

Данный график является результатом численного эксперимента, т.к. получение высокочастотных переменных магнитных полей такой напряженности в настоящее время технически неосуществимо. Из рисунка видно, что с увеличением амплитуды переменного поля, область неустойчивости спектра на частотах близких к частоте возбуждения увеличивается. Прецессия положения равновесия наблюдается в ограниченном диапазоне амплитуд переменного поля $(0.2 \leq \mathbf{h}_0 \leq 1.55) \cdot 10^3$ Э, причем при амплитуде переменного поля $\mathbf{h}_0 \approx 10^3$ Э амплитуда прецессии положения равновесия имеет минимум.

В разделе 2.4 рассматривается прецессия вектора намагниченности в анизотропной однослойной пленке, в отсутствие магнитоупругой связи, при анизотропии вида [001], [111] и [011]. Выявлено, что при малом эффективном магнитном поле, сравнимом с полем размагничивания, прецессии положения равновесия не происходит, а вектор намагниченности осциллирует в одной из потенциальных ям. Количество и положение потенциальных ям поля анизотропии относительно декартовой системы координат $Oxuz$ определяется зависимостью распределения энергии анизотропии в кубической решетке (рис. 4).

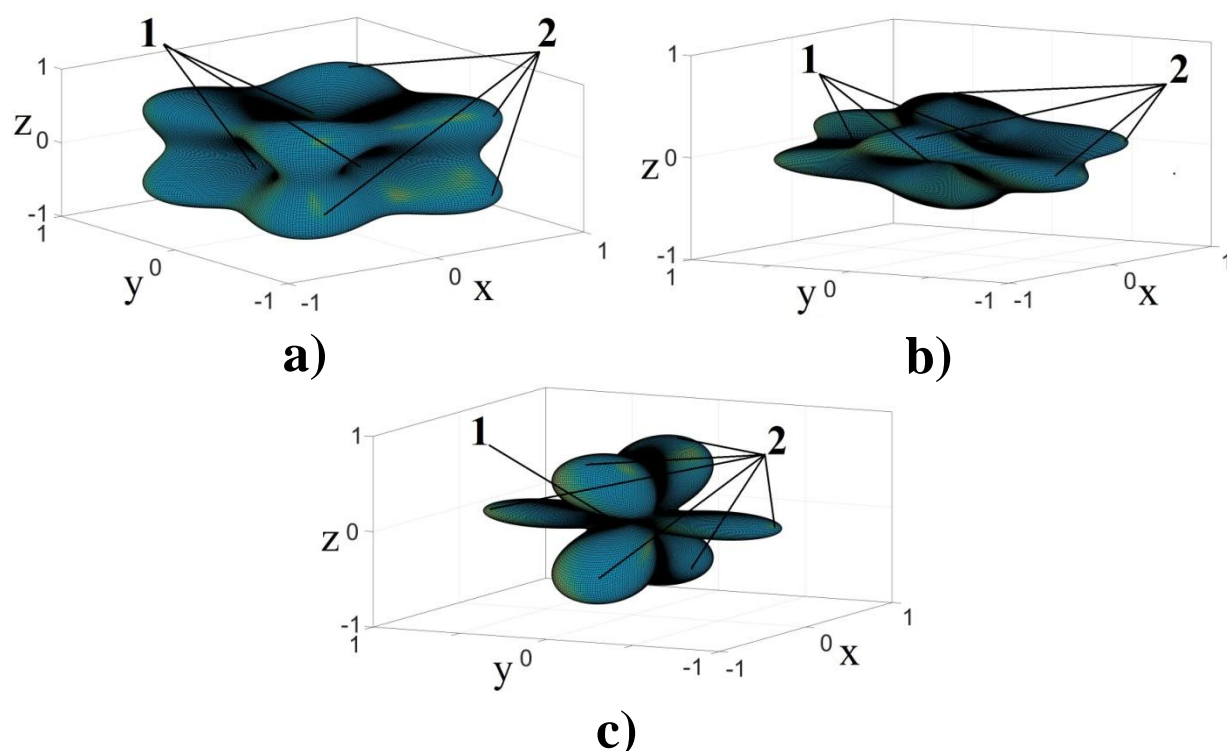


Рис. 4. Зависимость энергии кристаллографической анизотропии вида [001] - (а), [111] - (б) и [011] - (с) от направления в кубической решетке. (1) – потенциальная яма, (2) – потенциальный барьер.

Таким образом при осцилляциях вектора намагниченности вокруг оси Oz при анизотропии вида [001] - он будет проходить через 4 потенциальных барьера, при анизотропии вида [111] - через 3, а при анизотропии вида [011] - через 2. Это приводит к тому, что на прецессионных портретах возникает соответствующее число сгущений.

При анизотропии вида [001] и [111] между **режимом А** и **режимом В** возникает промежуточный режим колебаний - **режим А'**, который состоит из колебаний **режима В** и сменяющих их колебаний **режима А**.

При анизотропии вида [011] с ростом амплитуды переменного поля **режим А** имеет плавный переход в **режим С**, минуя **режим В**, при этом положение равновесия, с ростом амплитуды переменного поля, ориентируется вдоль положительного направления оси Oz.

Также в данном разделе представлены амплитудно-частотные характеристики колебаний вектора намагниченности при различных видах анизотропии. Из рисунка 5 видно, что наличие анизотропии вносит существенные изменения в характер осцилляций вектора намагниченности.

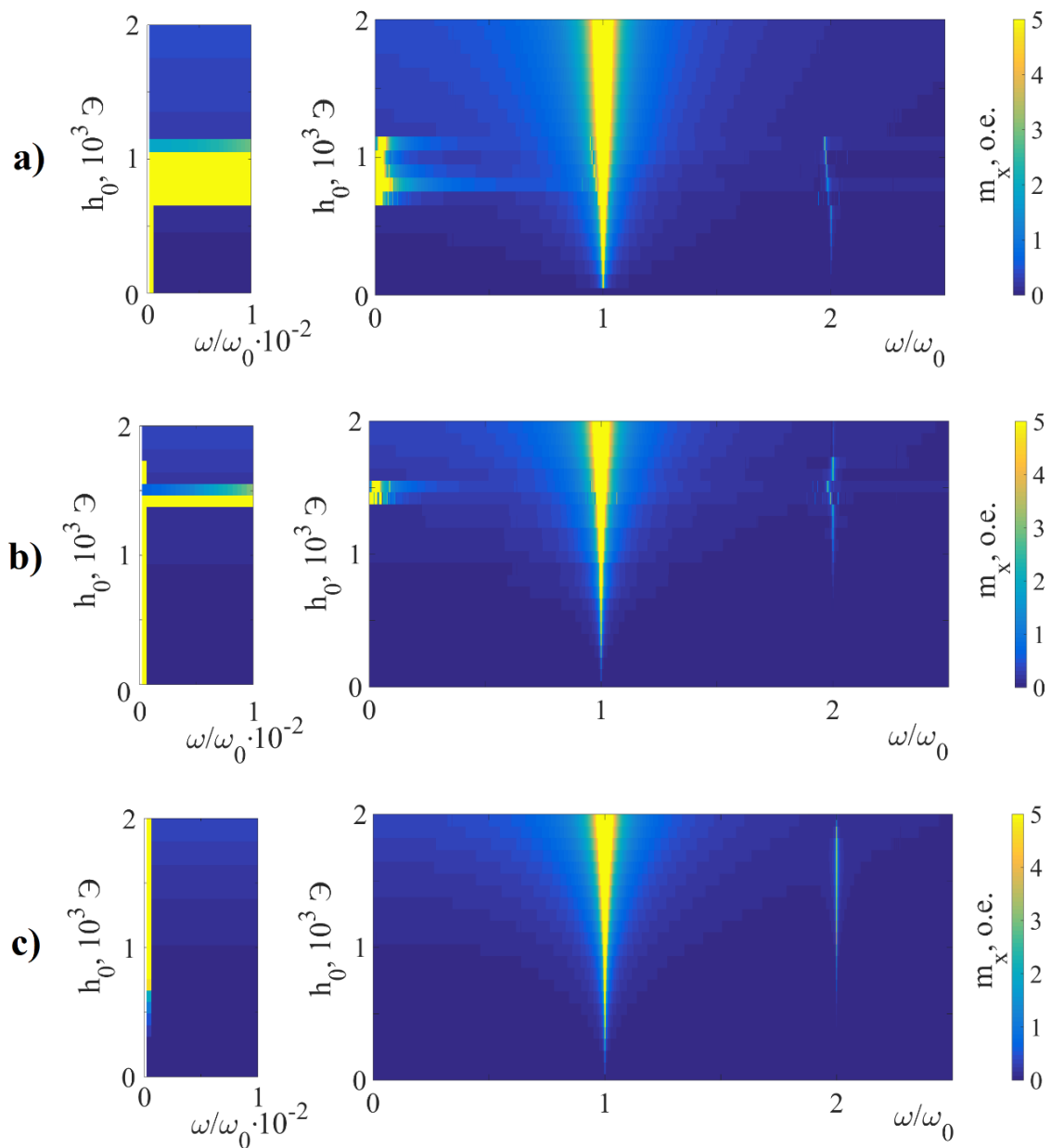


Рис. 5. Амплитудно-частотная зависимость колебаний компоненты намагниченности m_x анизотропной однослойной пленки от напряженности переменного поля при анизотропии вида [001] - (а), [111] - (б) и [011] - (с). $\omega_0 = 9 \cdot 10^{10} \text{ c}^{-1}$.

В отсутствие анизотропии прецессия положения равновесия происходит в широком диапазоне низких частот при амплитудах переменного поля $(0.2 \leq \mathbf{h}_0 \leq 1.5) \cdot 10^3$ Э. Амплитуды колебаний прецессии положения равновесия сравнимы по величине с амплитудами колебаний на частоте возбуждения. В анизотропной пленке в случае анизотропии вида [001] диапазон амплитуд переменного поля уменьшается до $(0.6 \leq \mathbf{h}_0 \leq 1.2) \cdot 10^3$ Э, а в случае анизотропии вида [111] до $(1.4 \leq \mathbf{h}_0 \leq 1.6) \cdot 10^3$ Э. При анизотропии вида [011] устойчивая прецессия положения равновесия вектора намагниченности возможна только в узком диапазоне низких частот при значениях амплитуды переменного магнитного поля в диапазоне $(0.6 \leq \mathbf{h}_0 \leq 2.1) \cdot 10^3$ Э.

В разделе 2.5 представлена магнитоупругая динамика в изотропных однослойных и анизотропных магнитных пленках. Обнаружено, что анизотропия вносит существенные изменения в зависимость режимов прецессии от амплитуды переменного поля при наличии магнитоупругой связи в пленке. При анизотропии вида [001] и [111] магнитоупругая связь приводит к образованию режима смешанных колебаний вектора намагниченности между **режимом А'** и **режимом С**. Промежуточные режимы представляют собой колебания чередующиеся колебания характерные для **режима В** и **режима С**, наложенные на траекторию движения прецессии положения равновесия в виде последовательности прямоугольных импульсов со сдвигом фазы между колебаниями компонент намагниченности $\frac{\pi}{2}$.

Выявлено, что наличие магнитоупругой связи в изотропной однослойной магнитной пленке расширяет диапазон амплитуд переменного магнитного поля при котором вектор намагниченности осциллирует в **режиме А** до $0 \leq h_0 \leq 850$ Э. В отсутствие магнитоупругой связи диапазон амплитуд переменного поля при прецессии вектора намагниченности в **режиме А** уменьшается до $0 \leq h_0 \leq 20$ Э.

В третьей главе приведены результаты исследования динамики компонент вектора намагниченности и упругих смещений в трехслойных пленках, подмагниченных постоянным магнитным полем, ориентированным по нормали к пленке в положительном направлении к оси Oz , при возбуждении переменным магнитным полем (рис. 6.). В главе также представлена используемая при численном моделировании взаимодействия магнитной и упругой подсистем многослойных магнитных пленок система уравнений, основанная на методе прямых.

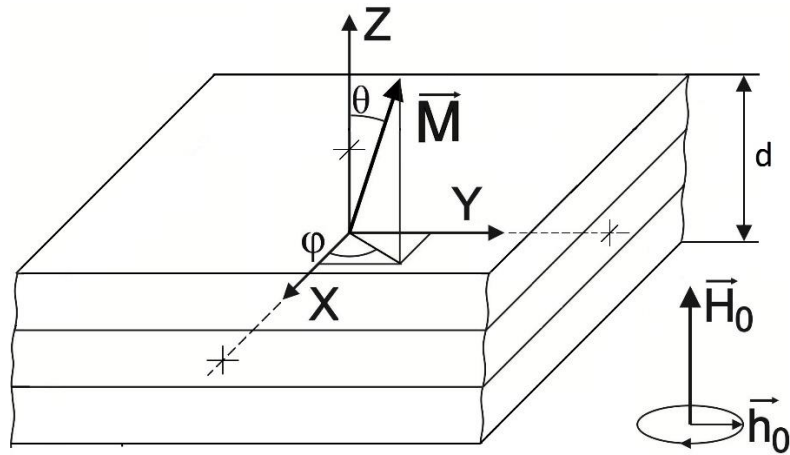


Рис. 6. Геометрия задачи для трехслойной пленки.

На основе численного моделирования прецессии вектора намагниченности и колебаний упругого смещения в трехслойной изотропной пленке ферромагнетика было определено распределение амплитуды колебаний упругого смещения в объеме образца и обнаружена ее зависимость от частоты переменного поля и геометрических параметров образца. В главе приведены зависимости режимов колебаний вектора намагниченности и упругих смещений в слоях трехслойной пленки от распределения намагниченности насыщения этих слоев в объеме пленки. Выявлено, что амплитуды колебаний вектора намагниченности и характер релаксации для соответствующих слоев будут отличаться друг от друга в соответствии с материальными параметрами. Однако, в случае, когда пленка имеет трехслойную структуру с намагниченностью насыщения меньшей внутри пленки, чем на внешних слоях, колебания упругого смещения осциллируют с частотой переменного поля. При этом пленка испытывает статическую деформацию сдвига. В случае структуры, когда намагниченность насыщения внутри образца больше чем на внешних слоях колебания упругого смещения будут осциллировать вокруг нулевой линии, без статической деформации.

В четвертой главе рассмотрены возможности практического применения тонких пленок магнетиков.

В разделе 4.1 рассмотрена модель магнитострикционного делителя частоты на основе возбуждения магнитоупругой динамики в тонких магнитных пленках и управления частотой упругих колебаний за счет подбора толщины пленки таким образом, чтобы частота акустического резонанса находилась в определенном соотношении с частотой переменного магнитного поля. Определены зависимости амплитуд колебаний упругого смещения на частоте возбуждения и частоте деления от соотношения частот переменного поля $\omega_0 = 9 \cdot 10^{10} \text{ c}^{-1}$ и частоты акустического резонанса ω_{ar} (рис. 7). Из рисунка видно, что возбуждение колебаний на частоте акустического резонанса эффективно при

кратностях менее 1.5 и более 3.8. Изменение амплитуды колебаний упругого смещения на частоте возбуждения с увеличением кратности вызвано изменением распределения моды колебаний в объеме образца.

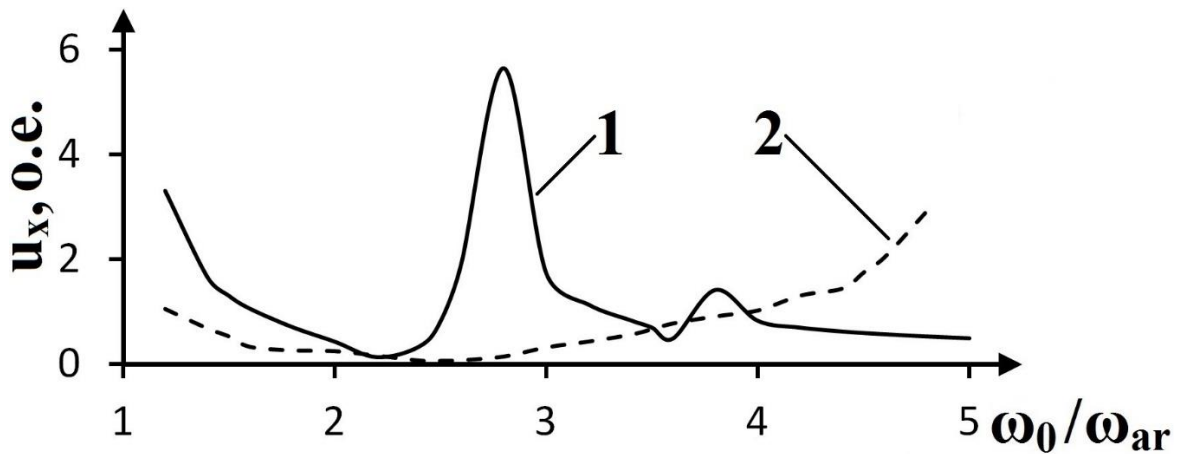


Рис. 7. Зависимость амплитуд упругих колебаний на частоте переменного поля (1) и частоте собственного акустического резонанса (2) от частоты акустического резонанса.

В разделе 4.2 представлена возможность реализации умножителя частоты при управления частотой упругих колебаний за счет подбора толщины пленки. Определены зависимости амплитуд колебаний упругого смещения на частоте возбуждения и частоте умножения от соотношения частот переменного поля $\omega_0 = 9 \cdot 10^{10} \text{ c}^{-1}$ и частоты акустического резонанса ω_{ar} (рис. 8). Из рисунка видно, что с увеличением кратности умножения амплитуды колебаний на частоте переменного поля и частоте акустического резонанса экспоненциально убывают. Убывание амплитуды связано с тем, что пространственная конфигурация моды на частоте переменного поля входит в образец частично, и с ростом кратности часть моды, входящая в образец, уменьшается.

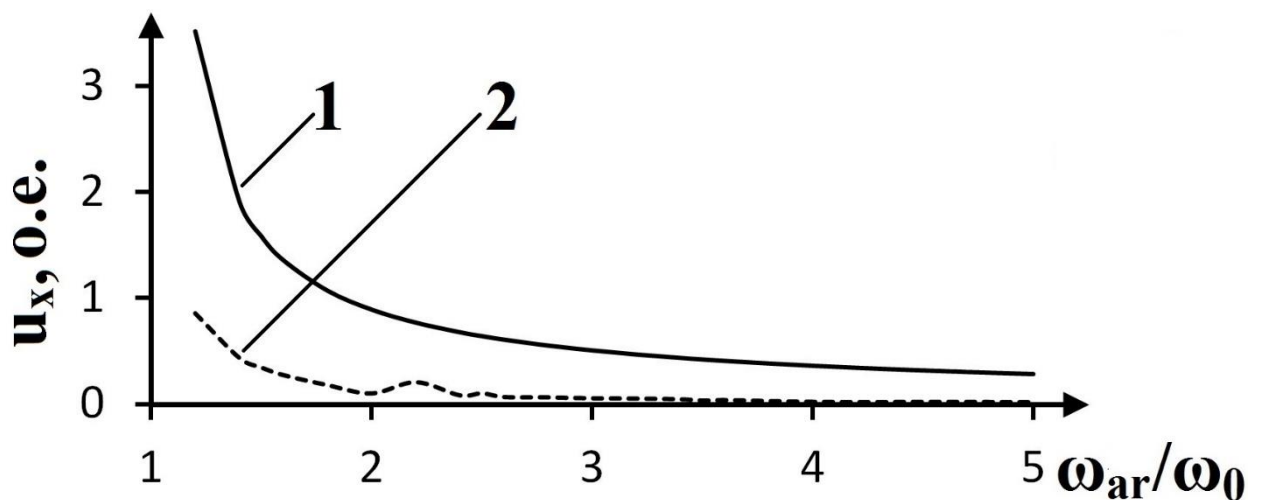


Рис. 8. Зависимость амплитуд упругих колебаний на частоте переменного поля (1) и частоте собственного акустического резонанса (2) от частоты акустического резонанса.

В разделе 4.3 рассматривается возбуждение гиперзвука при перемагничивании тонкой магнитной пленки постоянным магнитным полем. Пусть в начальный момент времени постоянное поле и вектор намагниченности направлены в отрицательном направлении оси Oz . Затем направление постоянного магнитного поля мгновенно меняем на противоположное, ориентируя его в положительном направлении оси Oz . При такой взаимной ориентации постоянного поля и вектора намагниченности малейшая флуктуация приводит к тому, что вектор намагниченности выходит из равновесия и стремится ориентироваться по полю, т.е. в положительном направлении оси Oz . Благодаря гиротропным свойствам среды вектор намагниченности совершает круговые движения, которые в свою очередь благодаря магнитострикции вызывают колебания упругого смещения. Траектория движения вершины вектора намагниченности представлена на рисунке 9.

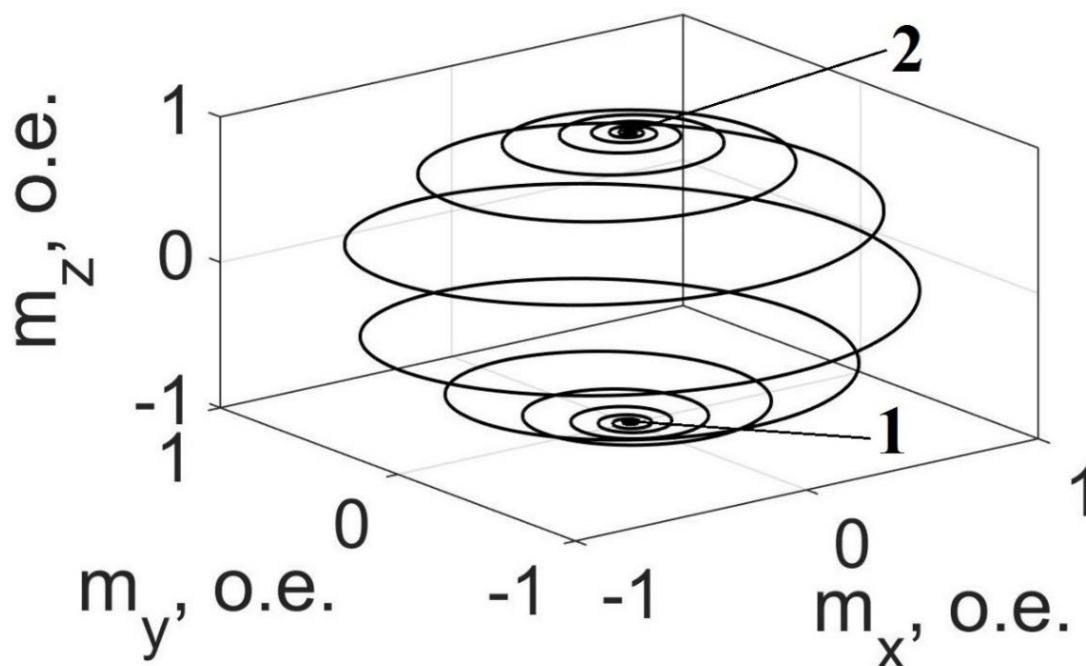


Рис. 9. Развитие колебаний вектора намагниченности при перемагничивании. (1) – начальная точка при $t = 0$ с, (2) – конечная точка при $t \geq 5 \cdot 10^{-9}$ с.

Определены амплитудно-частотные характеристики колебаний вектора намагниченности и упругих смещений в стадии 1 (до прохождения вектором намагниченности плоскости Oxy) и стадии 2 (после прохождения плоскости Oxy) переориентации вектора намагниченности, представленные на рисунке 10.

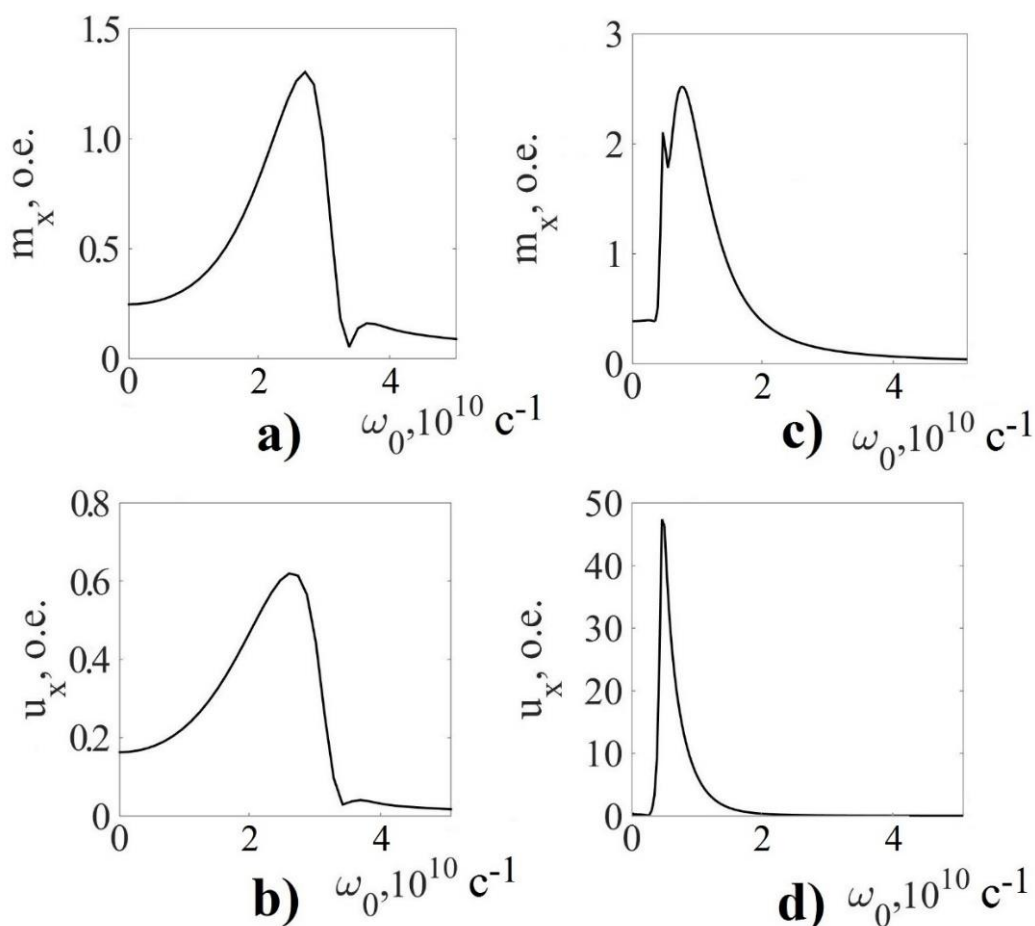


Рис. 10. Спектры колебаний компонент намагниченности \mathbf{m}_x (а, с) и упругих смещений \mathbf{u}_x (b, d) в стадии 1 (а, b) и стадии 2 (с, d).

На рисунках 10а и 10b видно, что при движении вектора намагниченности в нижней полусфере, колебания вектора намагниченности и упругих смещений происходят на одинаковых частотах. При этом спектры этих колебаний имеют непрерывный характер, что означает нестационарность происходящих процессов, заключающуюся в изменении частоты колебаний с приближением вектора намагниченности к плоскости Oxy .

На рисунках 10с и 10d представлены спектры колебаний вектора намагниченности и упругих смещений при движении вектора намагниченности в верхней полусфере. На рисунках видны значительные отличия между ними. Оба спектра имеют четко выраженный пик на частоте $\omega = 5 \cdot 10^9 \text{ c}^{-1}$, и только на спектре колебаний вектора намагниченности справа от этого пика присутствует другой пик на частоте $\omega = 6.9 \cdot 10^9 \text{ c}^{-1}$. Отсутствие данной составляющей на спектре колебаний упругих смещений можно объяснить следующим: при прохождении через плоскость Oxy вектор намагниченности сохраняет фазу колебаний, а компонента упругих смещений, в связи с природой акустических колебаний в пленке, меняет фазу на противоположную, что и приводит к подавлению колебаний на данных частотах.

Рисунок 11 показывает зависимость времени достижения максимальной амплитуды колебаний вектора намагниченности и упругого смещения от параметра упругой диссипации при перемагничивании образца постоянным магнитным полем.

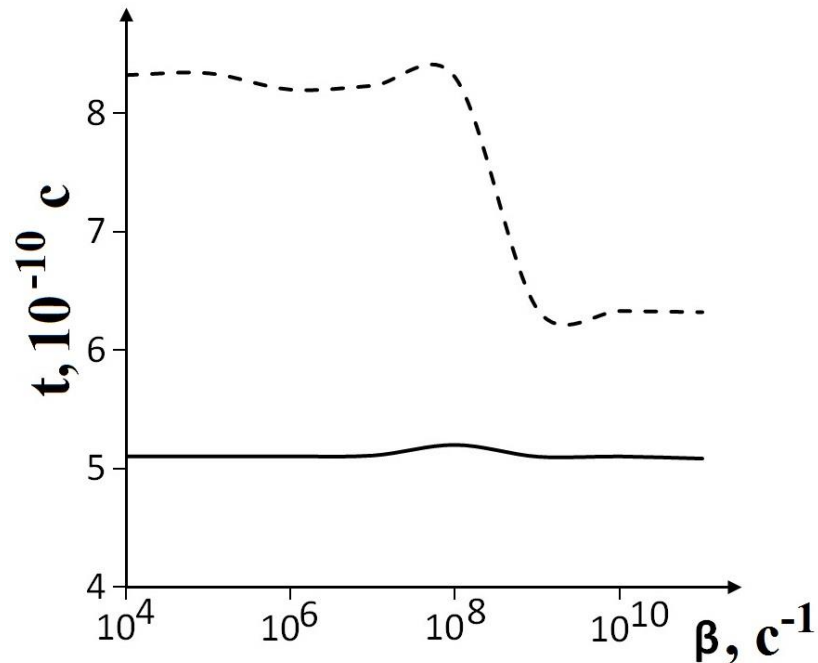


Рис. 11. Время развития максимальной амплитуды колебаний: колебаний компоненты намагниченности m_x – сплошная линия, колебаний компоненты упругих смещений u_x на втором этапе перемагничивания – пунктирная линия.

Из рисунка видно, что параметр упругой диссипации не оказывает влияния на время достижения колебаниями вектора намагниченности максимальных амплитуд. Однако характерные времена колебаний упругого смещения испытывают значительные изменения. В случае малых значений параметра упругой диссипации затухание колебаний в упругой подсистеме определяется потерями на магнитной подсистеме, а в случае больших значений упругие колебания становятся аperiodическими и следуют за магнитными колебаниями. В диапазоне значений упругой диссипации $10^7 \leq \beta \leq 10^9 \text{с}^{-1}$ развитие колебаний упругого смещения определяется только упругими потерями, что и вызывает значительные изменения времени достижения максимальных амплитуд колебаний упругого смещения.

На рисунке 12 определены зависимости времени достижения максимальной амплитуды и величины амплитуд колебаний упругого смещения от величины намагниченности насыщения пленки.

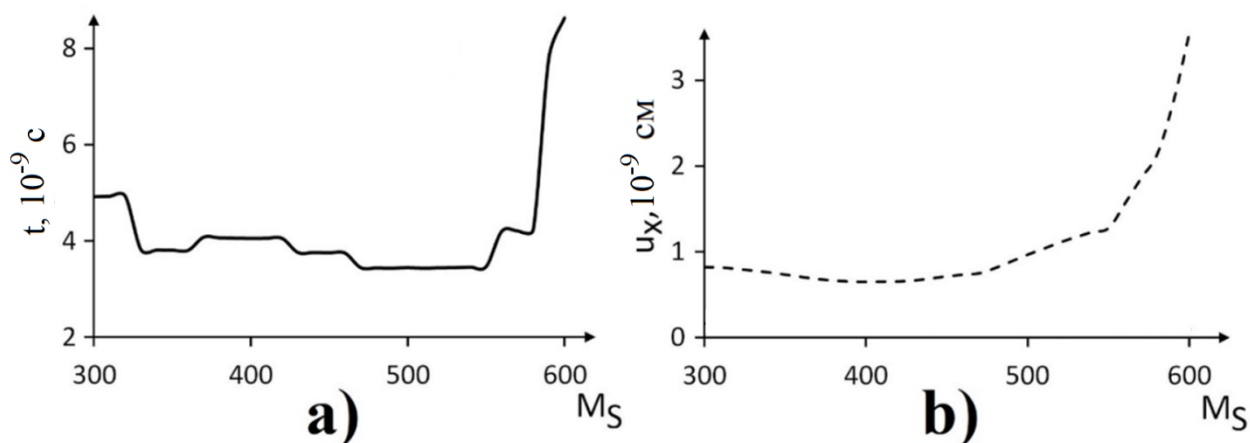


Рис. 12. Зависимость времени развития максимальной амплитуды колебаний упругого смещения на стадии 2 перемагничивания (а) и зависимость величины максимальной амплитуды (б) от величины намагниченности насыщения.

При значениях намагниченности насыщения $340 \text{ Гс} \leq M_S \leq 550 \text{ Гс}$ время достижения максимальной амплитуды минимально, что обусловлено близостью частоты ФМР и акустического резонанса. Наибольшее влияние на время достижения максимальной амплитуды колебаниями упругого смещения на втором этапе перемагничивания, при движении вектора намагниченности в верхней полусфере, оказывает изменение величины намагниченности насыщения. В области значений намагниченности насыщения равной $340 \text{ Гс} \leq M_S \leq 550 \text{ Гс}$ время достижения максимальной амплитуды минимальное, что обусловлено близостью частоты ФМР к частоте акустического резонанса (рис. 12а). Рост амплитуды колебаний упругого смещения с увеличением намагниченности насыщения связан с увеличением угла отклонения вектора намагниченности от оси Oz , а, следовательно, с увеличением амплитуды его колебаний (рис. 12б).

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе:

1. Предложены феноменологические модели расчета динамики магнитной и упругой подсистем для однослойных и многослойных магнитных пленок, основанные на уравнении Ландау-Лифшица-Гильберта и уравнении компонент вектора механических смещений в безобменном приближении с учетом магнитокристаллической анизотропии.
2. Установлено, что изменение напряженности переменного поля приводит к смене режимов прецессии намагниченности. Были выявлены четыре режима прецессии намагниченности в однослойной изотропной пленке: режим А - малоамплитудная прецессия, режим В - прецессия положения равновесия без охвата центра, режим С - прецессия положения равновесия с охватом центра, режим D - затухающая прецессия положения равновесия. Выявлено, что кристаллографическая анизотропия магнитной

пленки вносит существенные изменения в характер прецессии вектора намагниченности в режиме В. Колебания компонент вектора намагниченности состоят из импульсов близких к прямоугольной форме с периодическими пульсациями. При этом спектры колебаний намагниченности сопровождаются множеством сателлитных составляющих.

3. На основе численного моделирования прецессии вектора намагниченности в трехслойной изотропной тонкой пленке выявлено, что распределение амплитуды колебаний упругого смещения в объеме образца зависит от частоты переменного поля и геометрической формы образца. Определена зависимость характера колебаний упругого смещения в трехслойной тонкой магнитной пленке от распределения намагниченности насыщения этих слоев в объеме пленки, а именно возникновение статической деформации образца в случае, когда намагниченность насыщения на внешних слоях образца больше, чем намагниченность насыщения внутреннего слоя.
4. На основе подбора соотношения частоты переменного поля и собственной частоты акустического резонанса тонкой пленки выявлена возможность реализации магнитострикционного деления и умножения частоты. Определены особенности деления и умножения частот при использовании магнитной пленки в качестве магнитострикционного преобразователя, а также соотношение амплитуд колебаний упругого смещения на частоте переменного поля и частоте акустического резонанса пленки в зависимости от распределения моды упругой волны в объеме образца.
5. Установлено, что в диапазоне значений параметра упругой диссипации $10^7 \leq \beta \leq 10^9 \text{ с}^{-1}$ происходят значительные изменения характерных времен развития колебаний компонент и упругих смещений. Это связано с тем, что в указанном диапазоне развитие колебаний упругого смещения определяется только упругими потерями, а вне его значений – потерями в магнитной подсистеме. Определено влияние значений намагниченности насыщения тонкой магнитной пленки на характеристики колебаний упругого смещения. Выявлено, что в области значений намагниченности насыщения $340 \text{ Гс} \leq M_S \leq 550 \text{ Гс}$ отмечается минимальное время достижения максимальной амплитуды колебаниями упругого смещения, что обусловлено близостью значений частот ферромагнитного и акустического резонансов. Рост амплитуды колебаний упругого смещения с увеличением намагниченности насыщения связан с увеличением угла отклонения вектора намагниченности от оси Oz.

Список статей по теме диссертации в изданиях рекомендованных ВАК

- A1. Kirushev, M. S. Second order precession in the plate with cubic anisotropy and magnetoelastic properties / M. S. Kirushev, V. S. Vlasov, D. A. Pleshev, F. F. Asadullin, L. N. Kotov, V. G. Shavrov, V. I. Shcheglov // *Solid State Phenomena*. – 2015. – Vol. 233-234. – P. 73-78.
- A2. Pleshev, D. A. Investigation of nonlinear dynamics of magnetoelastic oscillations in normal magnetized ferrite plate / D. A. Pleshev, V. S. Vlasov, L. N. Kotov, F. F. Asadullin, S. M. Poleshikov, V. G. Shavrov, V. I. Shcheglov // *Solid State Phenomena*. – 2015. – Vol. 233-234. – P. 471-475.
- A3. Vlasov, V. S. Hypersound excitation in the ferrite plate by impulse magnetization reversal / V. S. Vlasov, D. A. Pleshev, L. N. Kotov, V. G. Shavrov, V. I. Shcheglov, F. F. Asadullin, S. M. Poleshikov // *Solid State Phenomena*. – 2015. – Vol. 233-234. – P. 480-484.
- A4. Плешев, Д. А. Магнитоупругая нелинейная динамика в ферритовой пластине / Д. А. Плешев, В. С. Власов, Ф. Ф. Асадуллин, Л. Н. Котов // *Вестник Челябинского государственного университета. Физика*. – 2015. – № 22(377). – С. 58-67.
- A5. Pleshev, D. A. Nonlinear Magnetoelastic Dynamics of the Ferrite Plate / D. A. Pleshev, V. S. Vlasov, L. N. Kotov, F. F. Asadullin, S. M. Poleshikov, V. G. Shavrov, V. I. Shcheglov // *Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics*. – 2017. – № 10 (1). – P. 36-39.

Список статей и тезисов докладов конференций

- A6. Программа расчета динамики намагниченности и упругих смещений в планарных структурах : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2017613426 РФ/ Д. А. Плешев, Ф. Ф. Асадуллин, С.М. Полешиков, В. С. Власов, Л. Н. Котов. – № 2016662170 ; заявл. 10.11.2016 ; опубл. 17.03.2017. – 1 с.
- A7. Плешев, Д. А. Исследование нелинейной прецессии намагниченности в перпендикулярно намагниченной пластине в условиях ориентационного перехода / Д. А. Плешев, В. С. Власов, М. С. Кирушев, Л. Н. Котов, В. Г. Шавров, В. И. Щеглов // XII Всероссийская молодежная школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (Верхняя Пышма, 14-20 нояб. 2011 г.) : сб. тезисов докл. – Екатеринбург : ИФМУрОРАН, 2012. – С. 16.
- A8. Vlasov, V. S. Investigation of regimes of nonlinear magnetoelastic oscillations in the ferrite layer / V. S. Vlasov, M. S. Kirushev, D. A. Pleshev, L. N. Kotov, V. G. Shavrov,

- V. I. Shcheglov, E. V. Vaezer // Spin Waves 2013 International Symposium (St. Petersburg, June 9-15, 2013). – Saint Petersburg : Ioffe Physical-Technical Institute, 2013. – P. 170.
- A9. Плешев, Д. А. Ударное возбуждение гиперзвуковых колебаний при перемагничивании ферритовой пластины / В. С. Власов, Д. А. Плешев, Ф. Ф. Асадуллин, В. Г. Шавров, В. И. Щеглов // КОУРОВКА-XXXV : Междунар. зимняя школа физиков-теоретиков (Екатеринбург, 23 фев. – 1 марта 2014 г.). – Екатеринбург : ИФМ УрО РАН, 2014. – С. 89.
- A10. Kirushev, M. S. Second order precession in the plate with cubic anisotropy and magnetoelastic properties / M. S. Kirushev, V. S. Vlasov, D. A. Pleshev, F. F. Asadullin, L. N. Kotov, V. G. Shavrov, V. I. Shcheglov // Moscow International Symposium on Magnetism (Moscow, 29 June – 3 July 2014). – Moscow : Faculty of Physics M.V. Lomonosov MSU, 2014. – P. 571.
- A11. Pleshev, D. A. Investigation of nonlinear dynamics of magnetoelastic oscillations in normal magnetized ferrite plate / D. A. Pleshev, V. S. Vlasov, L. N. Kotov, F. F. Asadullin, S. M. Poleshikov, V. G. Shavrov, V. I. Shcheglov // Moscow International Symposium on Magnetism (Moscow, 29 June – 3 July 2014). – Moscow : Faculty of Physics M.V. Lomonosov MSU, 2014. – P. 864.
- A12. Vlasov, V. S. Hypersound excitation in the ferrite plate by impulse magnetization reversal / V. S. Vlasov, D. A. Pleshev, L. N. Kotov, V. G. Shavrov, V. I. Shcheglov, F. F. Asadullin, S. M. Poleshikov // Moscow International Symposium on Magnetism (Moscow, 29 June – 3 July 2014). – Moscow : Faculty of Physics M.V. Lomonosov MSU, 2014. – P. 870.
- A13. Pleshev, D. A. Modeling of rf nonlinear dynamics of magnetoelastic oscillations in a ferrite layer / D. A. Pleshev, F. F. Asadullin, S. M. Poleshikov, V. S. Vlasov, L. N. Kotov, V. G. Shavrov, V. I. Shcheglov // Spin Waves 2015 : International Symposium (Saint Petersburg, June 7-13 2015). – Saint Petersburg : Ioffe Physical-Technical Institute, 2015. – P. 123.
- A14. Vlasov, V. S. Modeling of rf nonlinear dynamics of magnetoelastic oscillations in a ferrite layers / V. S. Vlasov, D. A. Pleshev, F. F. Asadullin, S. M. Poleshikov, L. N. Kotov, V. G. Shavrov, V. I. Shcheglov // 20th international conference on magnetism. – Barcelona, 2015. – P. 872.
- A15. Асадуллин Ф. Ф. Магнитоупругая нелинейная динамика в ферритовой пластине / Ф. Ф. Асадуллин, В. С. Власов, Д. А. Плешев, Л. Н. Котов // Фазовые переходы,

- критические и нелинейные явления в конденсированных средах : матер. междунар. конф. (Челябинск, 24-28 авг. 2015 г.). – Челябинск : ЧелГУ, 2015. – С. 120.
- A16. Плешев Д. А. Возбуждение хаотических колебаний в нелинейных магнитоупругих системах / Д. А. Плешев, В. С. Власов, Ф. Ф. Асадуллин, Л. Н. Котов // Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах : матер. междунар. конф. (Челябинск, 24-28 авг. 2015 г.). – Челябинск : ЧелГУ, 2015. – С. 133.
- A17. Pleshev, D. A. Nonlinear magnetoelastic dynamics of the ferrite plate / D. A. Pleshev, F. F. Asadullin, S. M. Poleshikov, V. S. Vlasov, L. N. Kotov, V. G. Shavrov, V. I. Shcheglov // Trends in MAGnetism : VI Euro-Asian Symposium (Krasnoyarsk, 5-19 August 2016). – Krasnoyarsk : Kirensky Institute of Physics, 2016. – P. 262.
- A18. Pleshev, D. A. Conditions for division and multiplication of frequencies in ferrite / D. A. Pleshev, V. S. Vlasov, F. F. Asadullin, L. N. Kotov, S. M. Poleshikov, V. G. Shavrov, V. I. Shcheglov // Moscow International Symposium on Magnetism (Moscow, 1-5 July, 2017). – Moscow : Faculty of Physics M.V. Lomonosov MSU, 2017. – P. 1064.
- A19. Asadullin, F. F. Hypersound excitation of magnetization and elastic displacement in case of magnetization reversal / D. A. Pleshev, V. S. Vlasov, F. F. Asadullin, L. N. Kotov, S. M. Poleshikov, V. G. Shavrov, V. I. Shcheglov // Moscow International Symposium on Magnetism (Moscow, 1-5 July, 2017). – Moscow : Faculty of Physics M.V. Lomonosov MSU, 2017. – P. 1065.

Список цитируемой литературы

1. Нелинейные явления в нано- и микрогетерогенных системах [Текст] / С. А. Гриднев [и др.]. – Москва : Бинوم. Лаборатория знаний, 2012. – 352 с.
2. Guimaraes, A. P. Principles of Nanomagnetism [Text] / A. P. Guimaraes. – Berlin : Springer, 2009. – 233 p.
3. Magnetic nanostructures in modern technology. Spintronics, magnetic MEMS and recording [Text] / eds.: B. Azzaroni [et al.]. – Dordrecht : Springer, 2008. – 345 p.
4. Sellmyer, D. J. Advanced magnetic nanostructures [Text] / D. J. Sellmyer, R. Skomski. – Berlin : Springer, 2006. – 514 p.
5. Aktas, B. Magnetic nanostructures [Text] / B. Aktas, L. Tagirov, F. Mikailov. – Berlin : Springer, 2007. – 216 p.

6. Средства измерений параметров магнитного поля [Текст] / Ю. В. Афанасьев [и др.]. – Ленинград : Энергия. Ленингр. отд-ние, 1979. – 320 с.
7. Nanostructured magnetic materials and their applications [Text] / Shi D. [et al.]. – Berlin ; New York : Springer, 2002. – 289 p.
8. Sbiaa, R. Materials with perpendicular magnetic anisotropy for magnetic random access memory [Text] / R. Sbiaa, H. Meng, S. N. Piramanayagam // *Physica Status Solidi*. – 2011. – Vol. 5, № 12. – P. 413–419.
9. Salehi Fashami, M. Multiferroic nanomagnetic logic: hybrid spintronics-straintronic paradigm for ultra-low energy computing [Text] : dis. ... / M. Salehi Fashami ; Virginia Commonwealth University Richmond. – Virginia, 2014. – 176 p.
10. Ле-Кроу, Р. Магнитоупругие взаимодействия в ферромагнитных диэлектриках [Текст] / Р. Ле-Кроу, Р. Комсток // *Физическая акустика*. Т.3, ч. Б. Динамика решетки. – Москва : Мир, 1968. – С. 156-243.
11. Влияние перпендикулярного магнитного поля и поляризованного тока на динамику связанных магнитных вихрей в тонкой наностолбчатой проводящей трехслойной структуре [Текст] / А. Е. Екомасов [и др.] // *Физика металлов и металловедение*. – 2017. – Т. 118, №4. – С. 345-351.
12. Optical and photocurrent spectroscopy with picosecond strain pulses [Text] / A.V. Akimov [et al.] // *Journal of Luminescence*. – 2011. – Vol. 131, № 3. – P. 404–408.
13. Hybrid structures of magnetic semiconductors and plasmonic crystals: a novel concept for magneto-optical devices [invited] [Text] / I. A. Akimov [et al.] // *Journal of the Optical Society of America b: optical physics*. – 2012. – Vol. B 29, №2. – P. A103-A118.
14. R.L. Comstock, R.C. LeCraw, Generation of microwave elastic vibrations in a disk by ferromagnetic resonance, *J. Appl. Phys.*, 34 (1963), 3022.
15. M. Ye, H. Dötsch. Magnetoelastic instabilities in the ferrimagnetic resonance of magnetic garnet films, *Phys. Rev. B*, 44 (1991), 9458.
16. A.M. Shutyř, D.I. Sementsov. Nonlinear effects of magnetization precession near ferromagnetic resonance, *Physics of the Solid State*. 42 (2000) 1306-1309.
17. Beznosikov D.S. Excitation of magnetoelastic oscillations in YIG films by domain structure / Beznosikov D.S., Osipov S.V., Kotov L.N., Vlasov V.S., Lutsev L.V. // *Moscow International Symposium on Magnetism (Moscow, 1-5 July, 2017)*. – Moscow : Faculty of Physics M.V. Lomonosov MSU, 2017. – P. 208.