

На правах рукописи



Важенина Ирина Георгиевна

**Развитие метода спин-волновой спектроскопии для исследования магнитных неоднородностей нанокристаллических, мультислойных и градиентных пленок Fe-Ni, Co-Ni и Co-P**

Специальность 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата  
физико-математических наук

Красноярск – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физике им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук (ИФ СО РАН)

Научный руководитель

доктор физико-математических наук, профессор  
Рауф Садыкович Исхаков

Официальные оппоненты:

Захаров Юрий Владимирович,  
доктор физико-математических наук, профессор  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования «Сибирский  
государственный технологический университет», заведующий  
кафедрой «Физика»

Ринкевич Анатолий Брониславович  
доктор физико-математических наук  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт  
физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения  
Российской академии наук, заместитель директора Института по  
научной работе

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Московский государственный университет  
имени М.В. Ломоносова»

Защита состоится \_\_\_\_ \_\_\_\_\_ 20\_\_ в \_\_ часов \_\_ минут на заседании диссертационного  
совета Д 003.055.01 по защите диссертаций в Федеральном государственном бюджетном  
учреждении науки Институте физике им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской  
академии наук (ИФ СО РАН)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки Института физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения  
Российской академии наук (ИФ СО РАН) и на сайте <http://kirensky.ru>

Автореферат разослан « » \_\_\_\_\_ 20\_\_

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 003.055.01  
доктор физико-математических наук, профессор  
Втюрин Александр Николаевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Одной из важнейших областей исследований физики твердого тела является изучение функциональных зависимостей волновых и колебательных процессов в магнитных материалах. Это объясняется новым этапом развития синтеза наноматериалов и их внедрения в технологии действующих производственных линий электронных устройств, биомедицине и т.п. Значительное число исследований направлено на поиск материалов с уникальными, ранее нереализуемыми, свойствами в таких областях как электроника, спинтроника, магнитоэлектроника, а также в интегрированных областях исследований (биомедицина, биофизика).

На сегодняшний день, большие перспективы в реализации новых материалов и устройств связываются с техникой и методами, использующими преимущества высокочастотных волн.

Исследованию высокочастотных свойств неоднородных магнитных материалов, в которых могут распространяться спиновые волны, как в предыдущие десятилетия [1-4, 5, 6], так и на сегодняшний день [7-15], отводится значительная роль. Интересной представляется задача о создании магнитных материалов с управляемыми свойствами, примером удачной реализации данной задачи может являться работа [16]. Управление магнитными свойствами может происходить путем создания пространственных модуляций спиновых параметров системы (параметр обмена  $\alpha$  либо намагниченности  $M$ ). Неоднородности в распределении магнитных параметров могут создаваться как искусственно (мультислойные системы), так и быть вызванными различного рода дефектами.

Уникальным свойством спиновых волн при взаимодействии с неоднородностями является отображения характера этого взаимодействия на дисперсионной кривой. На сегодняшний день установлена однозначная взаимосвязь между флуктуациями каждого параметра спиновой системы и качественно различными видами модификаций закона дисперсии [5, 6, 17-20]. Как один из интересных результатов в данном направлении можно выделить чувствительность зависимости величины обменной жесткости  $\eta = \alpha \cdot M$  от длины волны, большей или меньшей характерного размера магнитной неоднородности. Этот эффект стал основой метода корреляционной спин-волновой спектроскопии (СВС) [17, 18]. При соблюдении условия попадания размера магнитной неоднородности в диапазон длин волн, возбуждаемых в СВЧ диапазоне, СВС может быть использован в качестве неразрушающего метода в изучении магнитной микроструктуры наноструктурированных магнетиков.

Экспериментальное определение константы обменного взаимодействия  $A = \frac{\alpha M^2}{2} = \frac{\eta M}{2}$

– основной фундаментальной характеристики магнитных материалов – основано на определении температуры Кюри ферромагнетика методом измерения высокотемпературной кривой намагничивания  $M(T)$ . Однако, в неравновесных и метастабильных нанокристаллических и аморфных материалах структурные превращения начинаются при более низких температурах ( $T_{\text{пр}} < T_C$ ), поэтому здесь используемые методы определения величина  $A$  должны быть ограничены областью низких либо комнатных температур. Используемые экспериментальные методы основаны на прямой (или косвенной) регистрации закона дисперсии спиновых волн. К ним относится метод регистрации рассеяния нейтронов ( $k \sim (100 \div 1000) \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}$ ) либо фотонов ( $k \sim 1 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}$ ) на спиновых волнах, измерение низкотемпературной намагниченности и выделение зависимости  $M(T) = M_S (1 - BT^{3/2})$  (закон Блоха 3/2, в котором  $A \sim B^{-2/3}$ ), прямая регистрация пиков высокочастотной восприимчивости в тонких пленках (метод спин-волнового резонанса). Последний позволяет восстановить закон дисперсии спиновых волн в волновом диапазоне  $(1 \div 20) \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}$  и непосредственно измерять намагниченность и спин-волновую жесткость  $\eta = 2A/M_S$  и, соответственно, вычислять величину

А. Однако измеряемая величина  $\eta$  в неоднородных магнитных системах является эффективной характеристикой. Действительно, неоднородные магнитные системы характеризуются флуктуациями магнитных параметров. При условии описания этих флуктуаций стационарными случайными функциями, основными стохастическими характеристиками являются величины среднего  $\langle \eta \rangle$ , дисперсии  $\Delta \eta$  и корреляционного радиуса  $r_c$ .

Основное внимание в экспериментальных работах ранее уделялось определению корреляционного радиуса и типу флуктуирующего параметра:  $\alpha$  или  $M$ , тогда как определению среднего значения  $\langle \eta \rangle$  и дисперсии  $\Delta \eta$  обменной жесткости не уделялось должного внимания.

Таким образом, **актуальность темы данной работы** обусловлена необходимостью получения новых знаний и представлений о распространении спиновых волн в изотропных и анизотропных магнитных структурах, с целью искусственного синтеза систем с заданными магнитными свойствами среды. Поэтому основными задачами данной диссертационной работы является исследование спектра спиновых волн в изотропных нанокристаллических системах, установление вида спектра в мультислойных системах с определенным размером магнитной неоднородности, а также вида спектра в сформированных анизотропных структурах с распределением магнитных спиновых параметров, описываемых случайной функцией со стационарными приращениями.

### **Цель работы**

Развитие метода спин-волновой спектроскопии путем измерения обменных колебаний в нанокристаллических пленках (на примере пленок Fe-Ni, изотропных в статистическом смысле), в мультислойных пленках (на примере Fe-Ni/Pd, анизотропных в статистическом смысле) и в слоистых пленках Co-P и Co-Ni (представляющих собой примеры реализаций случайных функций со стационарными первыми и вторыми приращениями).

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

1. Исследование причин возникновения экспериментально наблюдаемых отклонений от квадратичной зависимости дисперсионного соотношения обменных спиновых волн.
2. Синтез образцов наноструктурных материалов в виде тонких магнитных пленок Fe-Ni сплава с различными размерами магнитных неоднородностей.
3. Синтез структур с определенным видом распределения магнитного параметра по толщине пленки, и изучение связи между сформированным профилем и регистрируемой зависимостью резонансных полей от номера моды.
4. Использование метода корреляционной спин-волновой спектроскопии для регистрации спектра обменных спиновых волн и разработка методики вычисления основных стохастических характеристик.
5. Развитие метода спин-волновой спектроскопии для слоистых пленок, представляющих собой примеры реализаций случайных функций со стационарными первыми и вторыми приращениями.

Объектом исследования являются спиновые волны, распространяющиеся в изотропных и анизотропных средах, описываемых случайными стационарными полями и случайными полями со стационарными приращениями.

Предмет исследования - влияние различного типа неоднородностей в распределении магнитных параметров системы на процессы распространения спиновых волн в ферромагнитных пленках.

### **Методы исследования**

Решение поставленных задач осуществлялось с использованием современных сертифицированных методов исследования и оборудования с применением аналитических и численных методов, отвечающих требованиям современной теоретической физики.

Исследование структурных свойств образцов (с записью и расшифровкой) проводилось на рентгеновском аппарате ДРОН-4 с использованием картотеки ICPDS-ASTM и программой DRON на ЭВМ. При исследовании материалов в пленочном состоянии применяется накопитель сигналов, информация с которого регистрируется в виде файла на ЭВМ. Магнитные параметры измерялись на стандартном ЭПА-2М спектрометре.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Результаты экспериментальных исследований методами ФМР и СВР, а также методом корреляционной спин-волновой спектроскопии изотропных нанокристаллических Fe-Ni пленок.

2. Атомная и фазовая структура исследованных изотропных нанокристаллических однослойных Fe-Ni пленок.

3. Результаты экспериментальных исследований методами ФМР, СВР и методом корреляционной спин-волновой спектроскопии мультислойных нанокристаллических пленок сплавов Fe-Ni/Pd и сплавов Co-P, описываемых случайными анизотропными стационарными полями.

4. Применимость метода спин-волновой спектроскопии для регистрации модификаций в слоистых пленках дисперсионного соотношения вида  $H_n \sim n$  и  $H_n \sim n^{2/3}$ , обусловленных распределением магнитных параметров по толщине пленки, как случайных функций со стационарными приращениями.

### **Достоверность научных результатов**

Представленные в работе экспериментальные исследования были проведены с использованием современных и апробированных методик на высокоточных приборах и установках. Результаты, представленные в диссертации, не противоречат экспериментальным и теоретическим данным других исследователей, опубликованным в открытой печати.

**Научная новизна** данной диссертационной работы заключается в следующем:

1. Исследовано влияние случайно распределенных магнитных неоднородностей на процессы распространения обменных спиновых волн в ферромагнитных Fe-Ni пленках с учетом технологии синтеза. Проведен анализ зависимостей значений магнитных параметров от композиционного состава, и продемонстрированы возможности синтеза структур с заданными размерами магнитных неоднородностей с учетом корреляций между значениями критических волновых векторов и размерами самих неоднородностей.

2. Разработана технология синтеза методом химического осаждения Co-Ni и Co-P пленок с определенным видом распределения магнитного параметра.

3. Впервые в ферромагнитной пленке искусственно создан заданный профиль магнитного потенциала путем манипулирования магнитными параметрами по толщине образца, что определило модификации дисперсионного соотношения вида:  $H_n \sim n$  и  $H_n \sim n^{2/3}$ .

4. Развита метод спин-волновой спектроскопии для регистрации спектров СВР в средах с распределением магнитных параметров, описываемых случайной функцией со стационарными первыми и вторыми приращениями.

### **Личный вклад автора**

Непосредственно автором в представленной работе методом химического осаждения получены образцы для исследований: нанокристаллические Fe-Ni пленки, мультислойные пленки Fe-Ni сплава, Fe-Ni/Pd и градиентные пленки Co-Ni и Co-P сплавов; выполнена их паспортизация. Автором в лаборатории физики магнитных пленок Института физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения РАН проведены измерения магнитных параметров, проведен анализ всех полученных данных измерений магнитных и структурных параметров и выполнены все теоретические расчеты. Задачи экспериментальных исследований по диссертационной работе сформулированы научным руководителем. Обсуждение и интерпретация полного набора экспериментальных данных проводились совместно с научным руководителем и соавторами публикаций.

### **Научно-практическая значимость работы**

Практическое значение полученных результатов состоит в том, они позволяют расширить представления о свойствах ферромагнитных пленочных структур. Основной областью применения полученных результатов является спинтроника и технологии производства устройств записи и считывания с магнитных носителей информации, где они могут быть использованы при проектировании магнитных кристаллов с заранее заданными свойствами. Фундаментальное научное значение имеет углубление понимания в распределении

намагниченности по толщине образца и способах манипулирования видом этого распределения путем варьирования спиновых магнитных параметров системы.

Экспериментально реализована ферромагнитная система со случайным распределением магнитного параметра, которое соответствует стационарным первому и второму приращению случайной функции.

Разработана экспериментальная методика исследования магнитных параметров в неоднородных магнитных системах в виде тонких магнитных пленок Co-Ni и Co-P сплавов, которой были определены: величина градиента намагниченности и обмена, константа обменного взаимодействия.

Положения метода спин-волновой спектроскопии развиты и актуализированы для регистрации модификаций дисперсионного соотношения вида:  $H_n \sim n$  и  $H_n \sim n^{2/3}$ .

**Диссертация соответствует специальности 01.04.01** - Приборы и методы экспериментальной физики - область науки и техники, включающая экспериментальные и теоретические исследования, направленные на разработку новых принципов и методов физических измерений, а также на создание новых приборов и устройств для изучения физических явлений и процессов. Область, которой посвящены исследования, - изучение физических явлений и процессов, которые могут быть использованы для создания принципиально новых приборов и методов экспериментальной физики

#### **Апробация работы и публикации**

Результаты работы докладывались на следующих конференциях: Всероссийская Байкальская конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по наноструктурным материалам, 16-22 августа 2009 г., Иркутск; V Ставеровские чтения «Ультрадисперсные порошки, наноструктуры, материалы: получения, свойства, применения», 15-16 октября 2009 г., Красноярск; IV Байкальская международная конференция «Магнитные материалы. Новые технологии», 21-25 сентября 2010 г., Иркутск; XXII Международная конференция «Новое в Магнетизме и Магнитных Материалах», 17-21 сентября 2012 г., Астрахань; V Байкальская международная конференция «Магнитные материалы. Новые технологии», 21-25 сентября 2012 г., Иркутск; XVI международный симпозиум «Упорядочение в минералах и сплавах» (ОМА-16), 12-17 сентября 2013 г., Туапсе; Moscow International Symposium on Magnetism, 29 июня - 3 июля 2014 г., Москва; II Всероссийская конференция «Нелинейные и резонансные явления в конденсированных средах», 27-30 октября 2014 г., Уфа.

По материалам диссертации опубликовано 12 научных работ: 2 статьи в периодических изданиях по списку ВАК (Известия РАН. Серия физическая), 1 статья в зарубежном журнале (Solid State Phenomena) и 9 работ в сборниках тезисов (трудов) международных и всероссийских научных конференций и симпозиумов.

В рамках диссертационной работы были выполнены следующие проекты:

1. «Магнитные, магнитооптические, магниторезистивные свойства тонких пленок наногранулярных магнетиков и планарных магнитных нанокompозитов» в рамках аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы», заказчик Федеральное агентство по образованию. Сибирский федеральный университет. По проекту № 3498, 2009-2011.

2. «Многослойные обменно-связанные пленочные структуры и наночастицы. Структура, магнитные свойства, приложения» государственное задание Министерства образования и науки РФ № 2.4396.2011, 2012-2013.

#### **Структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка цитируемой литературы; включает 131 страниц текста, 69 рисунков, 8 таблиц. Библиографический список содержит 154 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** кратко обоснована актуальность выбранной тематики, сформулированы цели исследования и указаны задачи, решение которых необходимо для выполнения работы, показаны научная новизна и практическая значимость проведенных исследований, а также приведены основные результаты, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлен обзор литературы по исследованию колебательных и волновых процессов в магнитных материалах. Рассмотрены основы теоретического описания и условия экспериментального наблюдения спин-волнового резонанса, а также наблюдаемые модификации дисперсионного соотношения для различного класса материалов (ферромагнитные сплавы, магнитные полупроводники, наногранулированные магнитные композиты). Представлено описание основных положений метода спин-волновой спектроскопии, который позволяет осуществлять как регистрацию магнитных неоднородностей, так и выполнять оценки характера изменений в магнитной структуре. Анализ литературных данных демонстрирует существующие противоречия в причинах, вызывающих модификации дисперсионного соотношения, и, как следствие, актуализирует проблему синтеза структур с заданными характеристиками.

**Во второй главе** рассмотрены используемые в работе экспериментальные методы измерений структурных и магнитных параметров пленок ферромагнитных сплавов: рентгеноструктурный анализ, ферромагнитный и спин-волновой резонанс, корреляционная спин-волновая спектроскопия. Описаны применяемые технологии синтеза образцов: термическое напыление и химическое осаждение. Приводится достаточно подробное описание функциональных блоков установки для исследования ферромагнитного и спин-волнового резонанса. Представлены аналитические выражения для определения исследуемых магнитных динамических параметров рассматриваемых структур.

Исследуемые в работе образцы можно разделить на три группы: нанокристаллические однослойные пленки, мультислойные пленки, магнитные параметры которых описываются случайными стационарными функциями, и слоистые пленки, магнитные параметры которых могут быть представлены случайными функциями со стационарными первыми и вторыми приращениями.

Однослойные пленки сплавов Fe-Ni изготавливались методами термического испарения и химического осаждения. Напыление пленок осуществлялось на диэлектрические (стекло) подложки. Во избежание взаимодействия испаряемого материала с тиглем, уменьшения окисления, фракционирования объема пленок, улучшения однородности пленок, скорости напыления составляли  $\geq 0,5$  нм/сек. Для напыления при определенных температурах подложки используется нагреватель подложек, который может нагревать их до  $500^{\circ}\text{C}$ .

Для получения пленок FeNi сплавов, в качестве распыляемых материалов использовались металлы и сплавы: Fe, Fe<sub>19</sub>Ni<sub>81</sub>, Fe<sub>31</sub>Ni<sub>69</sub>, Fe<sub>34</sub>Ni<sub>66</sub>, Fe<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub>, Fe<sub>70</sub>Ni<sub>30</sub>, Fe<sub>78</sub>Ni<sub>22</sub>, Fe<sub>88</sub>Ni<sub>12</sub>, Ni. Толщины полученных пленок и их химический состав определялись методом рентгенофлуоресцентного анализа. Толщины пленок менялись от 180 до 260 нм. Различия толщин пленок, полученных за одно напыление, не превышало 10%.

Метод химического осаждения основан на реакции выделения чистых металлов (Co, Ni, Fe и др.) из растворов соответствующих солей с помощью различных восстановителей (в работе применялся гипофосфит натрия). Скорость осаждения покрытий из каждого металла определялась заранее весовым методом с точностью  $\sim 10\%$ . Соответственно, по скорости осаждения индивидуальных слоев определялась как толщина пленочного образца, так и период модуляции мультислойной структуры.

Методом химического осаждения были получены однослойные нанокристаллические пленки Fe-Ni сплавов в концентрационном диапазоне от 35 до 85 ат. % Ni, толщина образцов варьировалась от 150 до 360 нм. Содержание фосфора в растворе не превышало 10 ат. %.

Метод химического осаждения был использован также для получения мультислойных пленок Fe-Ni-P/Pd. Синтезированы 2 серии образцов с различной концентрацией Ni в Fe-Ni

сплаве (80 ат. % и 68 ат. %), при постоянном содержании фосфора (2 ат. % P). Варьируемым параметром для каждой серии являлась толщина ферромагнитного слоя, толщина же немагнитного слоя Pd удерживалась постоянной  $\sim 1$  нм. Общая толщина Fe-Ni-P/Pd пленок не превышала 200 нм. В первой серии образцов (68 ат. % Ni в Fe-Ni сплаве) было получено три пленки с количеством слоев: 40, 50 и 50. Индивидуальная толщина Fe-Ni слоя – 6, 6 и 3 нм, соответственно. Во второй серии образцов (80 ат. % Ni в Fe-Ni сплаве) получены 2 пленки с количеством слоев: 28 и 20. Индивидуальная толщина Fe-Ni слоя – 8,5 и 11,9 нм, соответственно.

Синтез образцов, реализующих магнитные параметры как случайные функции со стационарными приращениями, осуществлялся созданием слоистых  $[\text{Co}_x\text{Ni}_y]_N$  и  $[\text{Co}_x\text{P}_y]_N$  пленок, в которых толщины индивидуальных слоев были одинаковы. Изменению подвергалась концентрация состава отдельного слоя. Исследуемые образцы слоистых  $[\text{Co}_x\text{Ni}_y]_N$  и  $[\text{Co}_x\text{P}_y]_N$  пленок были получены методом химического осаждения. Интегральная толщина пленок – от 200 до 250 нм.

**В третьей главе** содержатся результаты исследований структурных и магнитных характеристик нанокристаллических Fe-Ni пленок, полученных методами термического напыления и химического осаждения.

Исследуемые пленки были измерены методами ферромагнитного (ФМР) и спин-волнового (СВР) резонанса. Анализ ФМР и СВР спектров позволил определить такие магнитные параметры как: величина резонансного поля  $H_{res}$ , ширина линии кривой поглощения  $\Delta H$ , эффективная намагниченность  $M_{eff}$ , константа обменного взаимодействия  $A$  и обменная жесткость  $\eta^{eff}$ . Методом корреляционной спин-волновой спектроскопии были установлены доминирующие магнитные параметры, флуктуации которых приводят к модификациям дисперсионного отношения, размер выявленных магнитных неоднородностей, а также такие статистические характеристики магнитных параметров исследуемых пленочных образцов как: относительное среднеквадратичное отклонение флуктуирующего магнитного параметра, среднее значение  $\langle \eta \rangle$  и дисперсия  $\Delta \eta$  обменной жесткости.

Типичные кривые поглощения ФМР и спектры СВР представлены на рисунках 1 и 2.

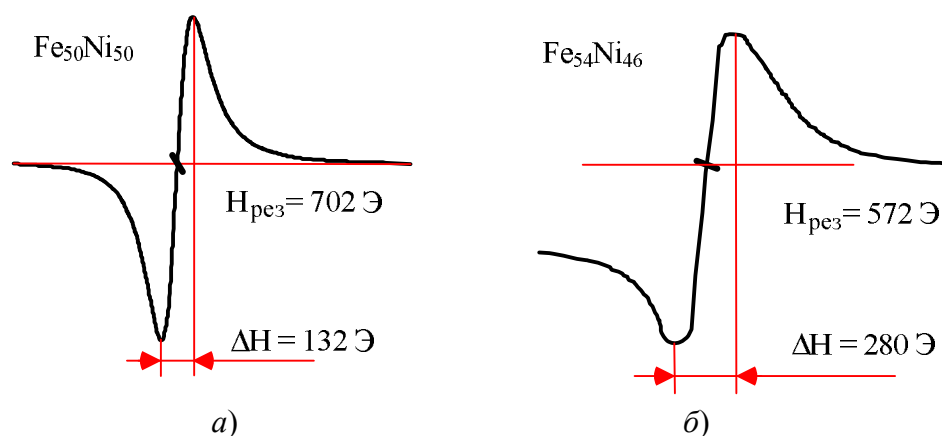


Рисунок 1 – Резонансные кривые поглощения Fe-Ni в параллельной геометрии ( $\vec{H} \perp \vec{n}$ ) эксперимента: а) пленки, полученные методом термического испарения; б) пленки, полученные методом химического осаждения



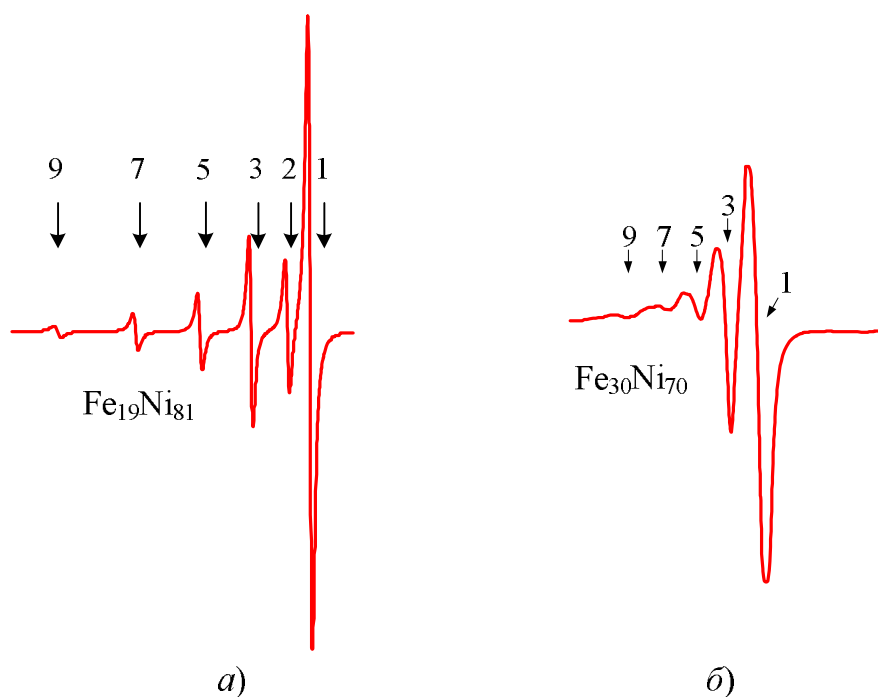


Рисунок 2 – Резонансные кривые поглощения Fe-Ni (в полевой развертке) в перпендикулярной геометрии ( $\vec{H} \parallel \vec{n}$ ) эксперимента: *a*) пленки, полученные методом термического испарения; *б*) пленки, полученные методом химического осаждения

Основные результаты измерений динамических магнитных параметров можно продемонстрировать концентрационной зависимостью обменной константы (рисунок 3). Для образцов, синтезированных различными методами, ход кривых  $A(x)$  идентичен. В инвариантной области концентраций (35-45 ат. % Ni) наблюдаются точки минимумов, сдвинутые друг относительно друга на 15 ат. % Ni. Между максимальными значениями кривых  $A(x)$  также наблюдается сдвиг примерно на 10-15 ат. % Ni.

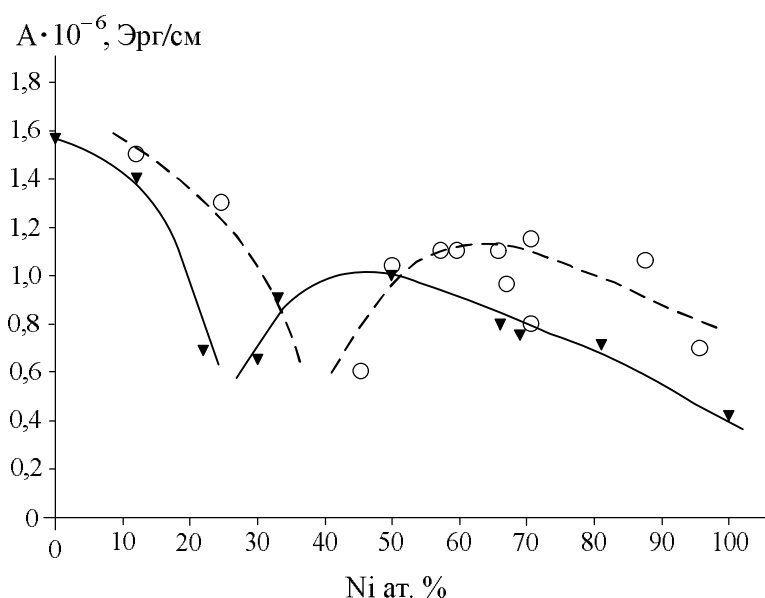


Рисунок 3 - Концентрационная зависимость константы обменного взаимодействия от содержания Ni; ▼ – для пленок, полученных методом термического испарения, ○ – для пленок, полученных методом химического осаждения

Особенности зависимости  $A(x)$  в инварной области можно объяснить в рамках квазихимической модели сплава. Так как обменная константа  $A$  пропорциональна обменному интегралу  $J$

$$A \sim \frac{J}{a}, \quad (1)$$

где  $a$  - постоянная магнитной решетки, то в рамках этой модели эффективный обмен  $J^{eff}$  можно описывать вкладами парциальных составляющих пар Fe-Fe, Ni-Ni и Fe-Ni

$$J^{eff} = (1-x)^2 J_{FeFe} + x^2 J_{NiNi} + 2x(1-x) J_{FeNi}. \quad (2)$$

Как известно, ГЦК Fe имеет отрицательное значение обменного интеграла, что и обуславливает функциональную зависимость в диапазоне 28-45 ат. % Ni для пленок, изготовленных методом термического испарения, и от 42 до 58 ат. % Ni для пленок, изготовленных методом химического осаждения. Второй склон кривой  $A(x)$  обусловлен отрицательным значением  $J_{NiNi}$  в ОЦК фазе.

Влияние технологии изготовления сказывается и на типе доминирующего на наномасштабах магнитного параметра, определенного методом корреляционной спин-волновой спектроскопии. Так, на примере образцов с одинаковым составом  $Fe_{50}Ni_{50}$ , можно видеть существенные различия в типе модификаций зависимостей резонансных полей от квадрата номера моды (рисунок 4). Так, в пленках  $Fe_{50}Ni_{50}$ , полученных термическим напылением, доминируют флуктуации параметра обмена, тогда как в пленках  $Fe_{50}Ni_{50}$ , изготовленных химическим осаждением, доминируют флуктуации намагниченности. Рассматриваемые образцы характеризовались и различными размерами магнитных неоднородностей: 27 нм и 14 нм.

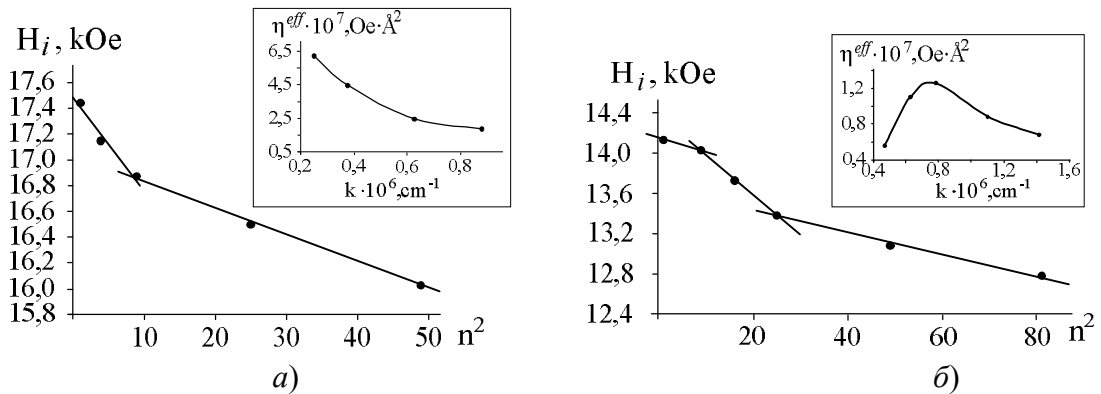


Рисунок 4 - Зависимости  $H_i(n^2)$  и  $\eta^{eff}(k)$  (на вставках) для Fe-Ni пленок: а) полученных методом термического испарения; б) синтезированных методом химического осаждения

В рамках теории корреляционной спин-волновой спектроскопии по зависимостям  $H_n(n^2)$  и  $\eta^{eff}(k)$  были рассчитаны значения относительного среднеквадратичного отклонения  $\gamma_i$  флуктуирующего магнитного параметра, а также среднее значение  $\langle \eta \rangle$  и дисперсия  $\Delta \eta$  обменной жесткости. Эффективное значение обменной жесткости может быть представлено через статистические характеристики

$$\eta^{eff} = \langle \eta \rangle \cdot \left[ 1 - J_i(k) \cdot \left( \frac{\Delta \eta}{\langle \eta \rangle} \right)^2 \right], \quad (3)$$

где  $\left( \frac{\Delta \eta}{\langle \eta \rangle} \right) = \gamma_i$ ;

$J_i(k)$  - функция, оценивающая степень влияния размера магнитной неоднородности на обменную спиновую волну [5].

Используя выражение (3) и зависимости  $H_n(n^2)$  и  $\eta^{eff}(k)$ , пример которых представлен на рисунке 4, были вычислены статистические характеристики магнитных параметров системы (таблица 1).

Таблица 1

Метод синтеза Fe <sub>50</sub> Ni <sub>50</sub> сплава	Флуктуирующий параметр	$\gamma_i$	$\Delta\eta \cdot 10^7, Oe \cdot A^2$	$\langle\eta\rangle \cdot 10^7, Oe \cdot A^2$	$\eta^{eff} \cdot 10^7, Oe \cdot A^2$
Химическое осаждение	Намагниченность, М	0,56	0,64	1,13	0,68
Термическое испарение	Обмен, $\alpha$	0,73	5,58	7,59	2,47

Представленные результаты величин и концентрационных зависимостей магнитных параметров демонстрируют чувствительность к технологии синтеза. Для объяснения выявленных расхождений были выполнены измерения с помощью рентгеноструктурного анализа. Отображением полученных данных структурных измерений могут служить концентрационные зависимости постоянной решетки, представленные на рисунке 5.

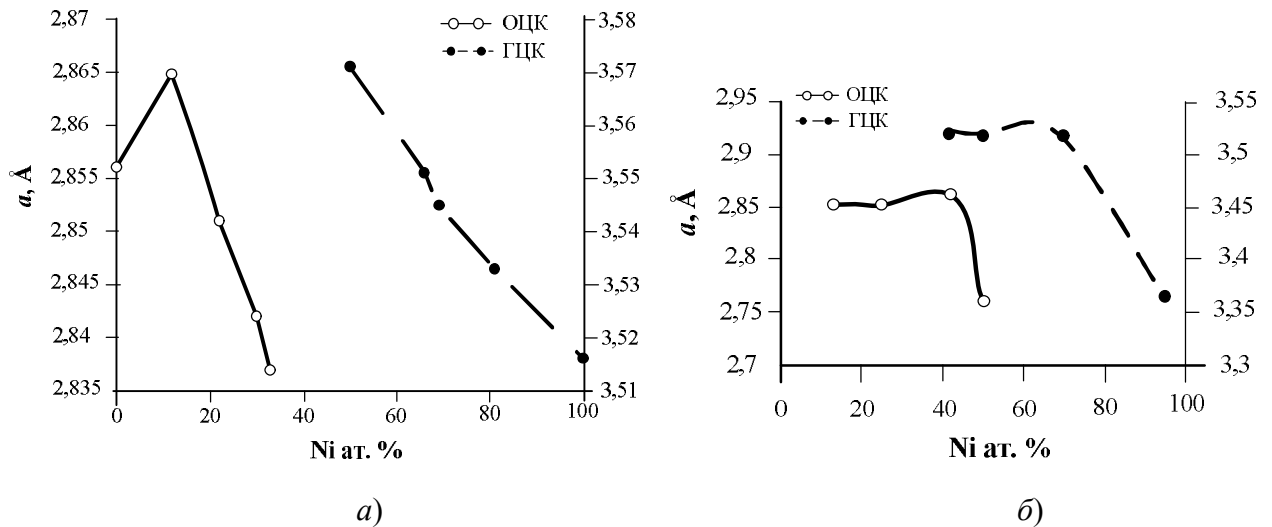


Рисунок 5 – Концентрационные зависимости величины постоянной решетки: а) для пленок Fe-Ni, полученных методом термического испарения; б) для пленок Fe-Ni, полученных методом химического осаждения

Качественное сопоставление этих рентгенограмм показывает, что различие в технологии получения пленок сказывается на внутренней наноструктуре сплава. Пленки, полученные методом термического испарения, характеризуются наличием только одной кристаллической фазы, в которой реализуется сплав при определенных концентрациях состава. В интервале концентраций  $0,5 < x < 1$  пленкам Fe<sub>1-x</sub>Ni<sub>x</sub> присуща ГЦК структура. С прохождением эквиатомного состава, сплавы с концентрациями от 0 до 0,3 частей Ni описываются только ОЦК структурой. Образцы пленок Fe<sub>1-x</sub>Ni<sub>x</sub> сплава, синтезируемые методом химического осаждения, демонстрируют области концентраций в которых реализуется двухфазность (ОЦК+ГЦК). Композиционный состав выявленной области двухфазности (38-42 ат. % Ni) хорошо коррелирует с инвариными концентрациями, для которых наблюдались минимальные значения обменной константы (смотри рисунок 3).

В целом, по итогам проведенных измерений, следует что, синтезированные однослойные Fe<sub>1-x</sub>Ni<sub>x</sub> пленки представляют собой структуры с изотропными неоднородностями магнитных параметров, влияние которых проявляется в модификациях дисперсионного отношения. При

этом проведенные исследования позволяют говорить о постоянстве по толщине образца стохастических характеристик доминирующего магнитного параметра.

В четвертой главе содержатся экспериментальные результаты исследований спектров СВР и вычисляемых из них магнитных параметров мультислойных Fe-Ni-P/Pd пленок и мультислойных пленок Co-P сплава. Образцы были изготовлены методом химического осаждения.

Формирование Fe-Ni-P/Pd пленок производилось с учетом двух требований. Первое, максимальный волновой вектор спиновой волны, определяемый из спектра СВР, во много раз меньше значения критического волнового вектора  $k_b$  квазиузлы Бриллюэна магнетонного кристалла, определяемого выражением:

$$k_b = \frac{\pi}{(d_1 + d_2)}. \quad (4)$$

Исходя из этого требования, подбирались такие параметры мультислойной пленки как количество бислоев  $N$  и их толщина ( $d_1$  и  $d_2$ ). Подбор данных параметров позволил моделировать однородную относительно распространения спиновой волны мультислойную структуру.

Второе условие касалось выбора состава сплавов с нулевым ( $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$ ) или весьма малым значением (минус  $18 \cdot 10^{-6}$  для  $\text{Fe}_{32}\text{Ni}_{68}$  сплава) константы магнитострикации.

Синтезируемые образцы измерялись методами ФМР и СВР. Регистрируемые кривые СВР, позволили определить собственные значения резонансных полей. Зависимости их величин от квадрата номера моды, представленные на рисунке 6, хорошо согласуются с киттелевским соотношением ( $H_n \sim n^2$ ).

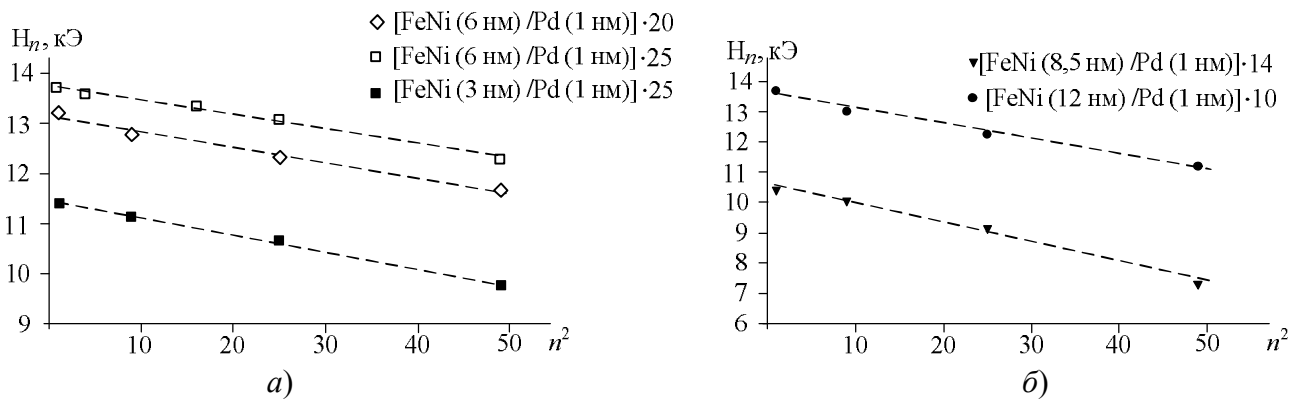


Рисунок 6 – Зависимость величины резонансного поля от квадрата номера моды для серии мультислойных пленок а)  $\left[ \text{Fe}_{32}\text{Ni}_{68}(x)/\text{Pd}(10 \text{ \AA}) \right] \cdot N$ ; б)  $\left[ \text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}(x)/\text{Pd}(10 \text{ \AA}) \right] \cdot N$

Анализ зависимостей  $H_n(n^2)$  позволил определить величину эффективной обменной константы  $A_{\text{eff}}$ , значения которой представлены в таблице 2. Сравнение с реперными однослойными образцами показывает уменьшение в величине  $A_{\text{eff}}$ , что может быть объяснено влиянием интерфейса. В рамках модели эффективной слоистой среды рассчитаны величины парциального обмена для индивидуальных слоев поляризованного палладия. Вычисленные значения величины обменной константы использовались для расчета статистических параметров системы: среднего  $\langle A \rangle$  и дисперсии  $\Delta A$  обменной константы.

Таблица 2 – Значения величины обменной константы

	Количество слоев	$A_{\text{eff}} \cdot 10^{-6}$ эрг/см	$A_{\text{Pd}} \cdot 10^{-6}$ эрг/см	$DA \cdot 10^{-6}$ эрг/см	$\langle A \rangle \cdot 10^{-6}$ эрг/см
Монослой $\text{Fe}_{35,4}\text{Ni}_{65,6}$	1	0,96			
$\text{Fe}_{32}\text{Ni}_{68}$ (60 Å)/Pd (10 Å)	40	0,404	0,0902	0,601	0,836
$\text{Fe}_{32}\text{Ni}_{68}$ (60 Å)/Pd (10 Å)	50	0,656	0,226	0,413	0,855
$\text{Fe}_{32}\text{Ni}_{68}$ (30 Å)/Pd (10 Å)	50	0,158	0,045	0,648	0,731
Монослой $\text{Fe}_{21,2}\text{Ni}_{78,8}$	1	0,76			
$\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$ (85 Å)/Pd (10 Å)	28	0,342	0,06	0,487	0,686
$\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$ (119 Å)/Pd (10 Å)	20	0,610	0,182	0,274	0,715

Сплавы, использованные при изготовлении мультислойных Co-P пленок, характеризовались следующими параметрами: ГЦК-Co состав  $\text{Co}_{93}\text{P}_7$  и аморфной структурой  $\text{Co}_{90}\text{P}_{10}$  сплав. Изменением содержания фосфора в индивидуальных смежных слоях в синтезируемых структурах удалось достичь ступенчатого профиля такого магнитного параметра спиновой системы как константа обменного взаимодействия  $A(x)$ :  $A(7 \text{ ат.}\% \text{ P}) > A(10 \text{ ат.}\% \text{ P})$  (см. рисунок 7).

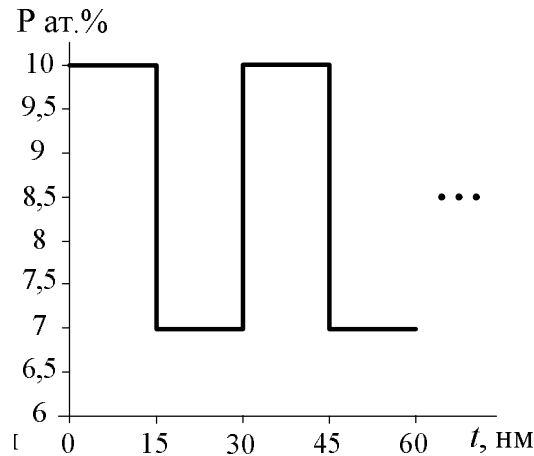


Рисунок 7 – Ступенчатый профиль при манипуляции содержания фосфора

Сформированная периодическая модуляция обмена в мультислойных структурах  $(\text{Co}_{90}\text{P}_{10}/\text{Co}_{93}\text{P}_7)_N$  позволила наблюдать методом спин-волнового резонанса модификацию спектра обменных спиновых волн, обусловленную образованием первой зоны Бриллюэна. Исходя из условия, определяющего значения критического волнового вектора  $k_b$  зоны Бриллюэна, - выражение (4), общее количество пар слоев составило 7, а толщина индивидуального слоя – 15 нм. Формирование пленки согласно данным условиям позволило методом СВР наблюдать в спектре обменных спиновых волн наличие дублета на 7 моде (рисунок 8), идентификация наблюдаемых пиков производилась с учетом их интенсивностей. На рисунке 8 также представлен спектр СВР Co-P пленки, полученной путем отжига в течение 1 часа при температуре  $300^\circ\text{C}$ , приводящего к кристаллизации аморфных слоев.

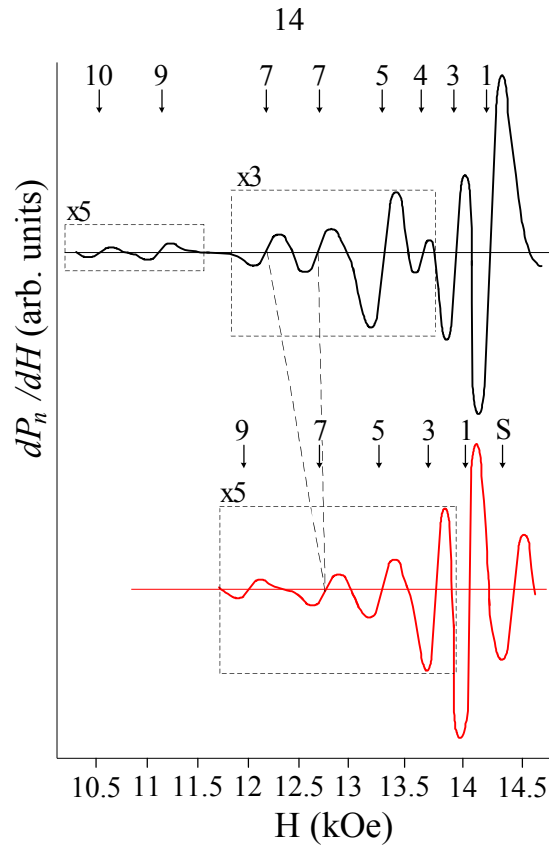


Рисунок 8 - Спектр СВР  $[\text{Co}^{\text{AM}}(150 \text{ \AA})/\text{Co}^{\text{KP}}(150 \text{ \AA})]_7$

Представленная на рисунке 8 идентификация номеров спин-волновых мод позволила определить величины эффективной спин-волновой жесткости  $\eta$ , зависимости которых до (черная сплошная линия) и после (красная пунктирная) отжига от номера моды демонстрирует рисунок 9б.

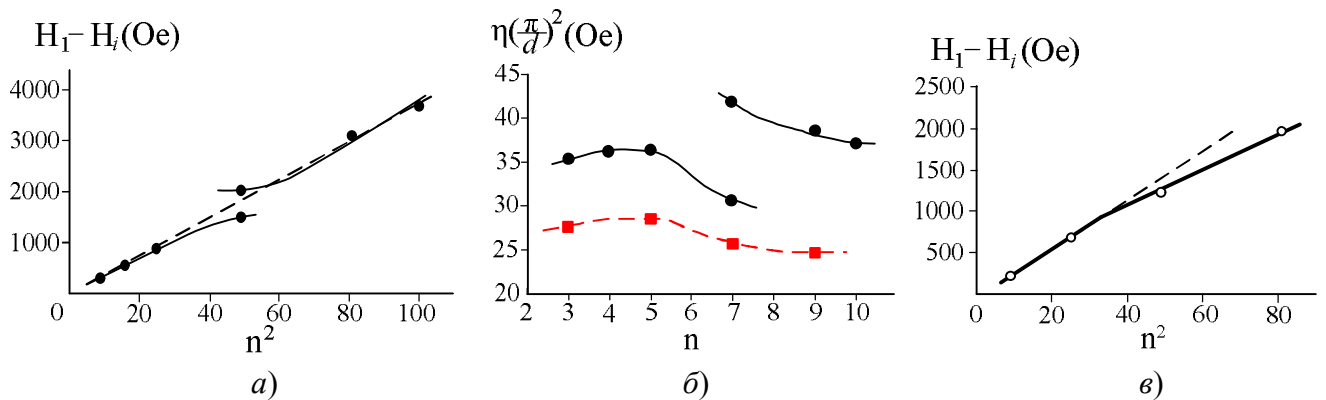


Рисунок 9 - а) Зависимость положения резонансного поля  $H_i$  от квадрата номера моды  $n^2$ ; б) Зависимость величины спин-волновой жесткости  $\eta(\pi/d)^2$  от номера спин-волновой моды  $n$  мультислойной пленки  $[\text{Co}^{\text{AM}}(150 \text{ \AA})/\text{Co}^{\text{KP}}(150 \text{ \AA})]_7$ :  $\bullet$  – сразу после получения;  $\blacksquare$  - после отжига в течение 1 часа при  $T = 300^\circ\text{C}$ ; в) Зависимость положения резонансного поля  $H_i$  от квадрата номера моды  $n^2$  для отожденных образцов

Модификации законов дисперсии, которые демонстрируются на рисунках 9а и 9в через зависимость резонансных полей от квадрата номера моды, определяются различными факторами. Образование наблюдаемого дублета на 7 моде обусловлено формированием квазисоны Бриллюэна сверхрешетки для обменных спиновых волн в синтезируемой периодической структур. Проведенный отжиг данного магнитного кристалла привел к

формированию макроскопически однородной пленки Co-P сплава, с флуктуациями на наномасштабе. Таким образом, одномерная периодическая модуляция магнитного параметра заменяется на его изотропные флуктуации. Методом корреляционной спин-волновой спектроскопии был определен вид спектра (см. рисунок 9в) и установлено, что представленная на рисунке 9б зависимость  $\eta(\pi/d)^2$  обусловлена неоднородностями обменного параметра, а масштаб этой неоднородности (корреляционный радиус  $r_c$ ) составляет примерно 10 нм.

**В пятой главе** излагаются результаты реализации анизотропных сред, описываемых случайными полями со стационарными первыми и вторыми приращениями, в виде слоистых пленок Co-Ni и Co-P сплавов. Пленки  $[\text{Co}_x\text{Ni}_y]_N$  и  $[\text{Co}_x\text{P}_y]_N$  сплавов измерялись методами ферромагнитного и спин-волнового резонансов, а также для них были развиты положения метода спин-волновой спектроскопии.

Идея создания таких структур была развита из аналогии между уравнением движения намагниченности и уравнением Шрёдингера для элементарной частицы, высказанной Шлюманном [22, 23]. Оба уравнения представляют собой дифференциальные уравнения второй степени, и, вследствие одинакового вида, возможно сопоставление между определенными коэффициентами при волновой функции и намагниченности. Следуя рассматриваемой аналогии, реализация положений резонансных полей согласно киттелевскому соотношению ( $H_n \sim n^2$ ) соответствует нахождению частицы в потенциальной яме с бесконечными прямоугольными стенками ( $E_n \sim n^2$ ). В данных случаях, решением дифференциальных уравнений будут являться дискретные гармонические функции. Иные виды решений волнового уравнения возможны при ином виде потенциала (параболическая функция, либо линейная зависимость), что демонстрируется рисунком 10. Эквивалентом прямоугольной потенциальной ямы является тонкая пленка со стационарными флуктуациями магнитных параметров по толщине образца.

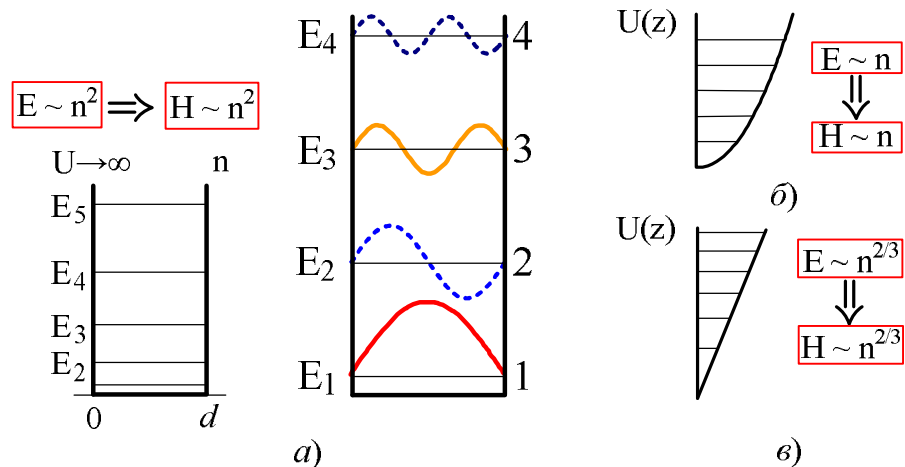


Рисунок 10 – Различные формы потенциальной ямы с соответствующими им энергетическими уровнями

В предыдущих разделах работы (главы 3 и 4) были представлены реализации систем со случайными неоднородностями различных магнитных спиновых параметров, которые представляют собой случайные стационарные функции координат. Для исследованных систем были характерны малые отклонения магнитного параметра от своего среднего, что позволяло использовать метод малых возмущений для описания распространения волн намагниченности по толщине образца [21].

Иной класс задач возникает в квазистационарных системах с крупномасштабными неоднородностями, когда рассматриваются случайные процессы со стационарными приращениями. Мы ограничиваемся двумя классами данных задач. Первый, среднее значения приращения стационарно и в этом случае среднее значение самой случайной величины

описывается линейной зависимостью от координаты (первой приращение). Второй класс, относится к системам, в которых среднее значение описывается полиномом второй степени (второе приращение) [21]. Реализация подобных систем возможна на слоистых пленках, представляющие собой композиционно-модулированные структуры. Синтез подобных структур позволит произвести изменение по толщине пленки величины одного из спиновых параметров системы, в связи с чем, данные пленки были названы нами градиентными.

Экспериментальная регистрация спектров СВР для слоистых  $[\text{Co}_x\text{Ni}_y]_N$  и  $[\text{Co}_x\text{P}_y]_N$  пленок позволяет ставить вопрос о возможном развитии теории спин-волновой спектроскопии на системы, в которых флуктуации магнитных параметров рассматриваются как случайные функции со стационарными приращениями (первыми и вторыми).

Синтез исследуемых слоистых пленок проводился методом химического осаждения. Экспериментальные образцы представляют собой многослойные структуры с примерно одинаковой толщиной отдельных индивидуальных слоев, в которых варьировались либо содержание фосфора ( $[\text{Co}_x\text{P}_y]_N$  пленки), либо содержание никеля ( $[\text{Co}_x\text{Ni}_y]_N$  пленки). Типичная структура изготавливаемых образцов представлена на рисунке 11. Выбор концентрационного диапазона как P, так и Ni производился с учетом доминирования в композиционном материале только одного магнитного спинового параметра системы – обмена ( $\alpha$ ) или намагниченности ( $M_s$ ).

Таким образом, синтезированные образцы представляют собой ферромагнитные пленки, в которых от поверхности до середины пленки по заданной зависимости изменяется величина либо параметра обмена, либо намагниченность. Для исследования было синтезировано 7 пленочных образцов, отличающихся толщиной индивидуальных слоев и профилем распределения концентрации P (Ni) по толщине пленки (образцы 1,2,3 и 4 – на основе сплава Co-P, образцы 5, 6 и 7 – на основе сплава Co-Ni).

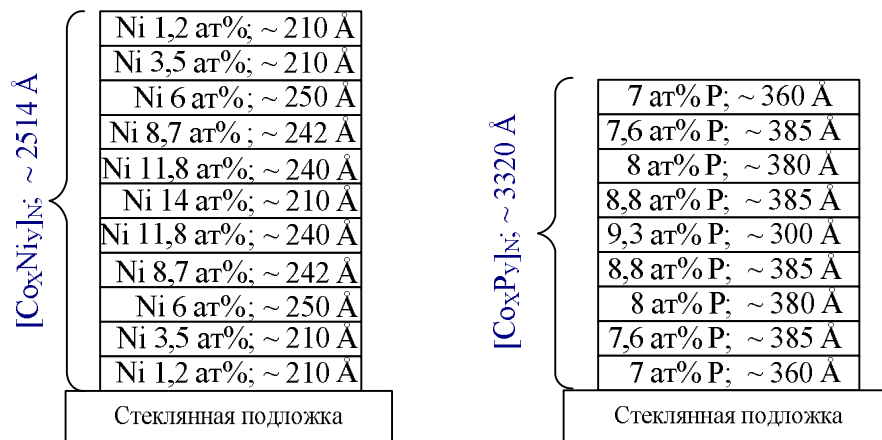


Рисунок 11 – Структура градиентных пленок  $[\text{Co}_x\text{Ni}_y]_N$  (образец 5) и  $[\text{Co}_x\text{P}_y]_N$  (образец 3)

В градиентных пленках  $[\text{Co}_x\text{Ni}_y]_N$  управляемым параметром являлась намагниченность, и реализовывался параболический профиль данного магнитного параметра по толщине образца. Учет этого обстоятельства позволяет использовать линейную зависимость распределения резонансных полей от номера моды, рассмотренную теоретически в работе [24]

$$\frac{\omega}{\gamma} - H_n = \left( n + \frac{1}{2} \right) \frac{4M_0}{d} \sqrt{4\pi \cdot \varepsilon \cdot \frac{2A}{M_{eff}} \cdot \frac{1}{M_{eff}}}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon$  - величина, характеризующая изменение магнитного параметра по толщине образца, определяется согласно выражению

$$\varepsilon = \frac{H_1 - H_{\text{послед}}}{4\pi \cdot M_{eff}}. \quad (6)$$



Зависимость величины резонансных полей в координатах  $[H_1 - H_n, n]$ , в соответствии с выражением (5), представлена на рисунке 12. Видно, что линейная зависимость  $H_n \sim n$  удовлетворительно описывает распределение экспериментальных точек, т.е. СВЧ-спектр данных пленок является эквидистантным.

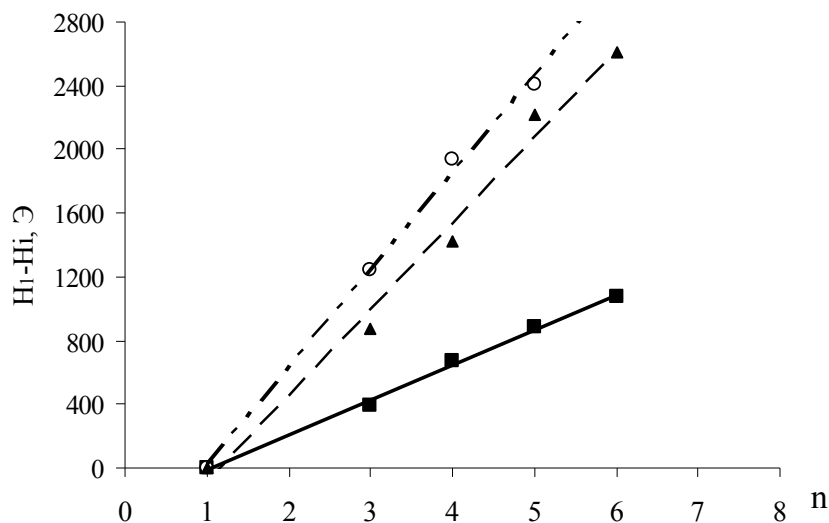


Рисунок 12 – Зависимость позиций спиновых мод от номера моды для  $[Co_xNi_y]_N$  пленок; ■, ○, ▲ - экспериментальные образцы 5, 6 и 7 соответственно

Линейная зависимость резонансных полей от номера моды свидетельствует о реализации в данных пленках параболического магнитного потенциала по толщине образца (второе приращение случайной функции), следовательно, решением волнового уравнения будут стоячие спиновые волны, описываемые не гармонической функцией, а функциями пропорциональными произведению экспоненты и полиномов Эрмита.

Экспериментальное подтверждение реализации параболического профиля распределения позволяет использовать выражение (5) при расчете обменной константы  $A$ . Значения данного параметра, а также эффективной намагниченности, ширины кривой поглощения, величина резонансного поля представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты анализа данных ФМР и СВР градиентных пленок  $[Co_xNi_y]_N$

Измеряемые параметры	Образец 5	Образец 6	Образец 7
Интегральная толщина образца, нм	251	176	209
Величина резонансного поля $H_{рез}^{//}$ , Э	898	1026	658
Ширина кривой резонансного поглощения $\Delta H$ , Э	288	170	213
Эффективная намагниченность $M_{eff}$ , Гс	966	460	1220
Константа обменного взаимодействия, $10^{-6}$ Эрг/см	0,86	0,42	0,5
Градиент магнитного поля по толщине образца $\varepsilon$	0,089	0,414	0,17

Иной профиль распределения спинового параметра (обмена) по толщине образца, в виде треугольника, был реализован на градиентных пленках  $[Co_xP_y]_N$  сплава. Регулирование параметра осуществлялось путем изменения концентрации фосфора в отдельных слоях (рисунок 13).

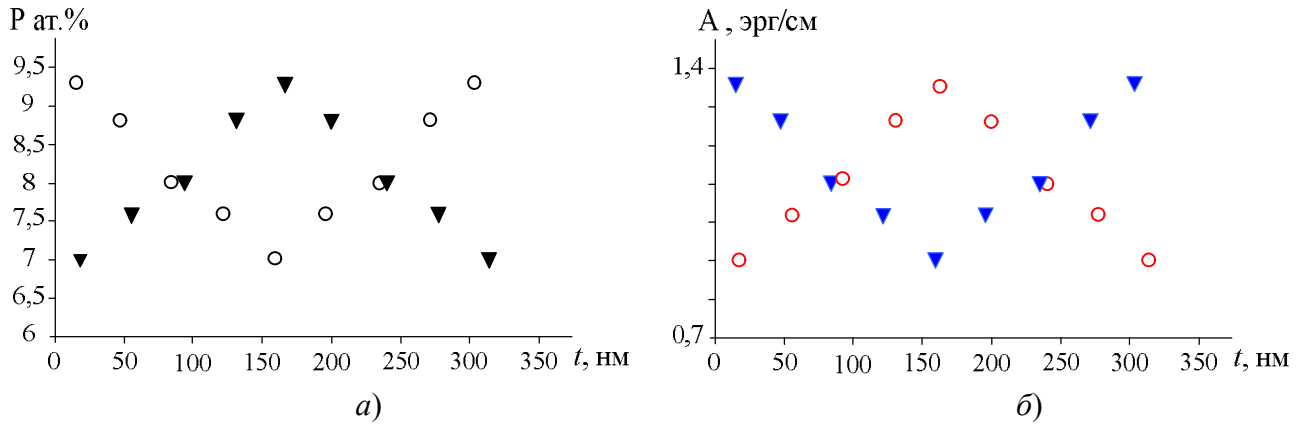


Рисунок 13 – Профиль распределение фосфора (константы обменного взаимодействия) по толщине образца (○ – образец 2, ▼ - образец 3)

На данных пленках планировалось получить линейное распределение магнитного потенциала по толщине пленки (первое приращение случайной функции). При реализации данного вида случайной функции распределение полевых координат резонансных полей должно удовлетворять выражению вида [25]

$$H_n = \frac{\omega}{\gamma} - \left(\frac{2A}{M}\right)^{1/3} \cdot \left[\frac{3\pi}{2} \left(n + \frac{1}{4}\right)\right]^{2/3} \cdot \left(\frac{H_{grad}}{d}\right)^{2/3}, \quad (7)$$

где  $H_{grad}$  - величина, характеризующая градиент магнитного поля по толщине образца.

Зависимость величины резонансных полей в координатах  $\left[H_1 - H_n, n^{2/3}\right]$  для исследуемых образцов в соответствии с выражением (7), представлена на рисунке 14.

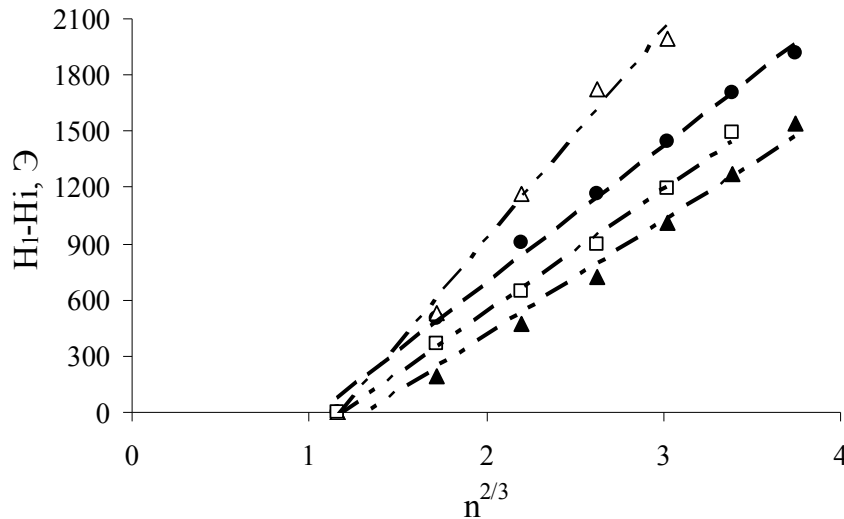


Рисунок 14 – Зависимость положения резонансных полей от номера моды в степени 2/3 для  $[\text{Co}_x\text{P}_y]_N$  пленки; ▲, □, ●, Δ - экспериментальные образцы 1, 2, 3 и 4 соответственно

Видно, что полевые координаты спин-волновых мод хорошо укладываются на зависимость вида  $(H_1 - H_n) \sim n^{2/3}$ . Последнее свидетельствует о реализации заданного (линейного) стационарного приращения случайного магнитного параметра по толщине образца путем управления величиной обменной константы.

Экспериментальные значения магнитных параметров для слоистых  $[\text{Co}_x\text{P}_y]_N$  пленок, определяемых методами ФМР и СВР, представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты анализа данных при исследовании ФМР и СВР слоистых пленок  $[\text{Co}_x\text{P}_y]_N$

Измеряемые параметры	Образец 1	Образец 2	Образец 3	Образец 4
Интегральная толщина образца, нм	250	319	332	352
Величина резонансного поля $H_{рез}^{//}$ , Э	663	472	460	456
Ширина кривой резонансного поглощения $\Delta H$ , Э	426	314	450	456
Эффективная намагниченность $M_{eff}$ , Гс	1267	1349	1302	1302
Константа обменного взаимодействия, $10^{-6}$ Эрг/см	0,52	1,23	1,2	2,6
Градиент магнитного поля по толщине образца $H_{grad}$ , Э/Å	0,618	0,469	0,57	0,565

Для слоистой  $[\text{Co}_x\text{P}_y]_N$  пленки была проведена термообработка, задачей которой было сформировать композиционно однородную пленку с изотропными флуктуациями магнитного параметра. Зависимость положений резонансных полей от квадрата номера моды (рисунок 15), подчиняющаяся на отдельных участках (до и после точки излома) киттельскому отношению, свидетельствует о реализации поставленной задачи. Вид модификации  $\eta(\pi/d)^2$  (смотри вставку рисунок 15) соответствует флуктуациям обмена.

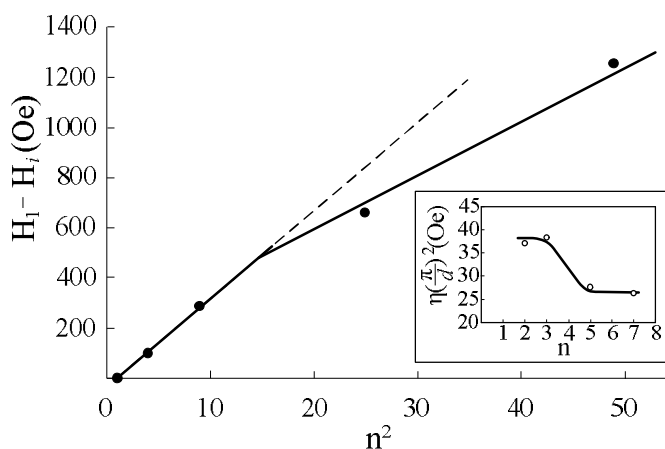


Рисунок 15 – Зависимость положения резонансных полей от квадрата номера моды для отожженной слоистой  $[\text{Co}_x\text{P}_y]_N$  пленки (экспериментальный образец 3); на вставке - зависимость величины спин-волновой жесткости  $\eta(\pi/d)^2$  от номера спин-волновой моды  $n$  для пленки после отжига в течение 30 минут при  $T = 250^\circ\text{C}$

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Для тонких пленок сплава Fe-Ni, изготовленных методами термического напыления и химического осаждения из растворов солей, методом спин-волнового резонанса измерены концентрационные зависимости константы обмена  $A$  во всей области концентраций компонент. Обнаружен характерный минимум зависимости  $A(x)$  в области инварных концентраций. Установлено, что инвариная концентрация  $X_C$  железо-никелевого сплава (координата минимума кривой  $A(x)$ ) для пленок Fe-Ni, синтезируемых разными технологиями, различается на 15 ат.% Ni.

2. Методом спин-волновой спектроскопии установлено, что главный флуктуирующий параметр спиновой системы пленок Fe-Ni меняется в зависимости от технологии синтеза пленок. Так, в пленках  $Fe_{50}Ni_{50}$ , полученных термическим напылением, доминируют флуктуации параметра обмена, тогда как в пленках  $Fe_{50}Ni_{50}$ , изготовленных химическим осаждением доминируют флуктуации намагниченности. Показано, что причиной такой смены может выступать гетерогенность химически осажденных пленок  $Fe_{50}Ni_{50}$  (ГЦК+ОЦК).

3. Методом СВР для мультислойных пленок Fe-Ni/Pd измерены величины эффективного обмена. В рамках модели эффективной слоистой среды рассчитаны величины парциального обмена для индивидуальных слоев ферромагнетика и поляризованного палладия ( $A_{FeNi} \sim (0,76 \div 0,96) \cdot 10^{-6}$  эрг/см;  $A_{Pd} \sim (0,45 \div 2,26) \cdot 10^{-7}$  эрг/см).

4. Методом корреляционной спин-волновой спектроскопии проведено исследование изотропных (нанокристаллических Fe-Ni пленок) и анизотропных (мультислойных пленок Fe-Ni/Pd) структур для определения таких стохастических параметров системы как среднее значение величины обменной жесткости ( $\langle \eta \rangle$ ) и её дисперсия ( $\Delta \eta$ ).

5. Разработана экспериментальная методика синтеза на основе Co-P и Co-Ni сплавов слоистых пленок, представляющих собой примеры реализации случайных функций со стационарными первыми и вторыми приращениями.

6. Развита основные положения метода спин-волновой спектроскопии для анализа этих слоистых пленок.

7. Установлено, что для слоистых пленок Co-P с линейным распределением параметра обмена по толщине пленки (первое приращение случайной функции), спектр стоячих обменных спиновых волн описывается зависимостью  $H_n(n) \sim n^{2/3}$ , где  $n$  – номер моды.

8. Исследован спектр стоячих обменных спиновых волн в слоистых пленках Co-Ni с искусственно сформированным параболическим распределением намагниченности по толщине пленки (второе приращение случайной функции). Показано, что резонансные поля обменных мод удовлетворяют зависимости  $H_n(n) \sim n$ .

**ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Iskhakov, R.S. Ferromagnetic and Spin-Wave Resonance in  $Fe_xNi_{1-x}$  ( $0 < x < 1$ ) Films/ R.S. Iskhakov, S.V. Stolyar, M.V. Chizhik, V.Yu. Yakovchuk, V.G. Pozdnyakov, I.G. Vazhenina //Solid State Phenomena. – 2011. – V. 168-169. – P. 93.
2. Исхаков, Р.С. Спин-волновой резонанс в градиентных  $[Co_xNi_y]_N$  и  $[Co_xP_y]_N$  пленках/ Р.С.Исхаков, Л.А.Чеканова, И.Г. Важенина //Известия РАН. Серия физическая. – 2013. - том 77. - № 10. - С. 1469.  
Iskhakov, R.S. Spin-Wave Resonance in  $[Co_xNi_{1-x}]_N$  and  $[Co_xP_{1-x}]_N$  Gradient Films/ R.S. Iskhakov, L.A. Chekanova, I.G. Vazhenina //Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics. – 2013. – V. 77.–No. 10. – P. 1265–1267.
3. Р.С.Исхаков, Л.А.Чеканова, С.В. Столяр, И.Г. Важенина. Спин-волновой резонанс в мультислойных пленках FeNiP/Pd//Известия РАН.Серия физическая.–2014.–том 78.–№4.–С.502-503.  
Iskhakov, R.S. Spin-Wave Resonance in Multilayer FeNiP/Pd Films/ R.S. Iskhakov, L.A. Chekanova, S.V. Stolyar, I.G. Vazhenina// Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics. – 2014. – V. 78. – No. 4. – PP 328–329.
4. Важенина, И.Г. Исследование методом ферромагнитного резонанса мультислойных градиентных пленок Fe/Ni /И.Г. Важенина//Сборник тезисов докладов Всероссийской Байкальской конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по наноструктурным материалам. – Иркутск: Издательство ГОУ ВПО «ИГУ». – 2009. – С. 59.
5. Важенина, И.Г. Исследование методом ферромагнитного резонанса мультислойных пленок Fe/Ni/ Л.А Чеканова, И.Г. Важенина// Труды научно-технической конференции с международным участием V Ставеровские чтения «Ультрадисперсные порошки, наноструктуры, материалы: получения, свойства, применения». – Красноярск: ИПК СФУ. – 2009. – С. 181.
6. Важенина, И.Г. Исследование методом ферромагнитного резонанса трехслойных пленок FeNi/Pd/FeNi /Р.С. Исхаков, Л.А. Чеканова, С.В. Столяр, И.Г. Важенина//Сборник тезисов докладов IV Байкальской международной конференции «Магнитные материалы. Новые технологии». – Иркутск: Изд-во Вост.-Сиб. Гос. Акад. образования. – 2010. – С.100.
7. Важенина, И.Г. Спин-волновой резонанс в градиентных  $[Co_xNi_y]_N$  и  $[Co_xP_y]_N$  пленках /Р.С. Исхаков, Л.А. Чеканова, И.Г. Важенина// Сборник трудов XXII Международной конференции «Новое в Магнетизме и Магнитных Материалах». – Астрахань: Издательский дом «Астраханский университет». – 2012. – С.299.
8. Важенина, И.Г. Моделирование слоистых  $[Co_xNi_y]_N$  И  $[Co_xP_y]_N$  пленок с заданным профилем магнитного потенциала/ Р.С. Исхаков, Л.А. Чеканова, И.Г. Важенина// Сборник трудов V Байкальской международной конференции «Магнитные материалы. Новые технологии». – Иркутск: Издательство ВСГАО.– 2012. – С.153 (Н-2).
9. Важенина, И.Г. Спин-волновой резонанс в градиентных  $[Co_xNi_y]_N$  пленках / Р.С. Исхаков, Л.А. Чеканова, И.Г. Важенина// Труды Шестнадцатого международного симпозиума "Упорядочение в минералах и сплавах» (ОМА-16). Том 1. – Туапсе: Издательство СКНЦ ВШ ЮФУ АПСН. – 2013. – С.57.
10. Важенина, И.Г. Спин-волновой резонанс в мультислойных FeNiP/Pd/ Р.С. Исхаков, Л.А.Чеканова, С.В.Столяр, И.Г. Важенина// Труды Шестнадцатого международного симпозиума "Упорядочение в минералах и сплавах» (ОМА-16). Том 1. – Туапсе: Издательство СКНЦ ВШ ЮФУ АПСН. – 2013. – С.61.
11. Vazhenina, I.G. Ferromagnetic and spin-wave resonance in  $Fe_xNi_{1-x}$  ( $0 < X < 1$ ) films /R.S. Iskhakov, S.V. Stolyar, V. Yu. Yakovchuk, L.A. Chekanova, I.G. Vazhenina// Book of Abstracts Moscow International Symposium on Magnetism. – Москва: Printhouse.LETO. – 2014. – С. 438.
12. Важенина, И.Г. Исследование методом спин-волновой спектроскопии градиентных  $[Co_xNi_y]_N$  и  $[Co_xP_y]_N$  пленок/ Сборник тезисов докладов и сообщений II Всероссийской конференции «Нелинейные и резонансные явления в конденсированных средах». – Уфа. – 2014. – С. 20.

## СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vayhinger, K. Propagating spin waves in ferromagnetic multilayers/K. Vayhinger // J. Magn. Magn. Mat. - 1986. - Vol.62. - P. 159.
2. Hillebrands, B. Spin-wave calculations for multilayerd structures/ B. Hillebrands // Phys. Rev. B. - 1990. - Vol. 41, № 1. - P. 530.
3. Camley, R.E. Magnetic multilayers: spin configurations, excitations and giant magnetoresistance/R.E. Camley // J. Phys.: Cond. Mat. - 1993. - Vol. 5. - P. 3727.
4. Barnas, J. Spin waves in superlattices: I General dispersion equation for exchange, magnetostatic and retarded modes/J. Barnas // Journal of Physics C: Solid State Physics. - 1988. - Vol. 21. - P. 1021.
5. Игнатченко, В.А. Изучение дисперсионного закона для спиновых волн в аморфных пленках методом СВР/В.А. Игнатченко, Р.С. Исхаков, Л.А. Чеканова, Н.С. Чистяков// ЖЭТФ. – 1978. – Т.75, №2. – С.653.
6. Maksymovics, L.J. Inhomogeneities of exchange interaction in thin amorphoun film – experimental results/L.J. Maksymovics, D. Temple, H. Zuberek//JMMM. – 1986. – Vol. 58. – P. 303.
7. Bihler, C. Spin-wave resonances and surface spin pinning in  $Ga_{1-x}Mn_xAs$  thin films/C. Bihler, W. Schoch, W. Limmer, S.T.B. Goennenwein, M.S. Brandt//Phys. Rev. B. – 2009. – Vol. 79. – P.045205.
8. Дмитриев, А.И. Влияние температурного режима ионной имплантации на перколяционный ферромагнетизм в тонких пленках  $Ge_{0.98}Mn_{0.02}$ /А.И. Дмитриев, О.В. Коплак, Р.Б. Моргунов//Физика твердого тела. – 2012. – Т. 54, вып. 7. – С. 1292.
9. Sasaki, Y. Spin wave resonances in GaMnAs/Y. Sasaki, X. Liu, T. Wojtowicz, J.K. Furdyna// Journal of Superconductivity: Incorporating Novel Magnetism. – 2003. – Vol. 16, No. 1. – P.143.
10. Liu, X. Angular dependence of spin-wave resonance and surface spin pinning in ferromagnetic (Ga,Mn)As films/X. Liu, Y. Y. Zhou, J. K. Furdyna// Phys Rev B. – 2007. – Vol.75. – P. 195220.
11. Butera, A. Ferromagnetic resonance in as-deposited and annealed Fe-SiO<sub>2</sub> heterogeneous thin films/ A. Butera//Phys Rev B. – 1999. – Vol. 60, № 17 – P. 12270.
12. Denisova, E. Magnetic properties of CoFeB-SiO<sub>2</sub> nanocomposite and  $[(Co_{40}Fe_{40}B_{20})_x(SiO_2)_{100-x}]_n$  multilayer films/ E. Denisova, R. Iskhakov, L. Chekanova, Y. Kalinin, A. Sitnikov//Solid State Phenomena. – 2012. – Vol. 190. – P. 466.
13. Исхаков, Р.С. Спин-волновой резонанс в мультислойных пленках (одномерных магнетонных кристаллах). Правила идентификации/Р.С. Исхаков, С.В. Столяр, М.В. Чижик, Л.А. Чеканова//Письма в ЖЭТФ. – 2011. – Т. 94, вып. 4. – С. 325.
14. Исхаков, Р.С. Спин-волновой резонанс в мультислойной структуре  $Co_{1-x}P_x/Co_{1-x}P_x$  как метод регистрации брегговских щелей в спектре спиновых волн/ Р.С. Исхаков, С.В. Столяр, Л.А. Чеканова, М.В. Чижик//ФТТ. – 2012. – Т. 54, вып. 4. – С. 704.
15. Исхаков, Р.С. Исследование пространственных флуктуаций намагниченности в метастабильных нанокристаллических пленках сплавов на основе Fe методом спин-волновой спектроскопии/ Р.С. Исхаков, С.В. Столяр, Л.А. Чеканова, В.С. Жигалов// ФТТ. – 2001. – Т. 43, вып. 6 – С. 1072.
16. Локк, Э.Г. Распространение поверхностных магнитостатических волн в композитной структуре феррит-решетка металлических полосок/ Э.Г. Локк// Радиотехника и электроника. – 2005. – Т. 50, № 1. – С. 74.
17. Игнатченко, В.А. Спиновые волны в случайно-ни-анизотропной среде/В.А. Игнатченко, Р.С. Исхаков// ЖЭТФ. – 1978. – Т.74, №4. – С.1386.
18. Игнатченко, В.А. Дисперсионное соотношение и спин-волновая спектроскопия аморфных ферромагнетиков/В.А. Игнатченко, Р.С. Исхаков// ЖЭТФ. – 1978. – Т.75, №4(10). – С.1438.

19. Игнатченко, В.А. Стохастическая магнитная структура и спиновые волны в аморфном ферромагнетике/В.А. Игнатченко, Р.С. Исхаков // Изв. АН СССР. Сер. физ. – 1980. – Т.44, №7. – С.1434.
20. Игнатченко, В.А. Спиновые волны в аморфных и мелкодисперсных ферромагнетиках с учетом диполь-дипольного взаимодействия/В.А. Игнатченко, Р.С. Исхаков // ЖЭТФ. – 1978. – Т.74, №4. – С.1386.
21. Рытов, С.М. Введение в статистическую радиофизику/ С.М. Рытов. – М.: Издательство «Наука», 1966. – 404 с.
22. Schlömann, E. Generation of spin waves in nonuniform magnetic fields. I. Conversion of electromagnetic power into spin-wave power and vice versa/E. Schlömann// J. Appl. Phys. – 1964. – Vol. 35, Number 1. – P. 159.
23. Schlömann, E. Generation of spin waves in nonuniform dc magnetic fields. II. Calculation of the coupling length/ E. Schlömann, R.I. Joseph // J. Appl. Phys. – 1964. – Vol. 35, Number 1. – P. 167.
24. Portis, A.M. Low-lying spin wave modes in ferromagnetic films/ A.M. Portis // App. Phys. Lett. –1968. – Vol. 2, Number 4. – P. 69.
25. Hoekstra, B. Spin-wave resonance spectra of inhomogeneous bubble garnet films/ B. Hoekstra, R. P. van Staple, J. M. Robertson // Journal of Applied Physics. – 1977. – Vol. 48, No.1. – P. 382.