

На правах рукописи

ВАГИН Дмитрий Вениаминович

**ОСОБЕННОСТИ КОЛЛЕКТИВНОЙ  
САМООРГАНИЗАЦИИ МАГНИТНЫХ МОМЕНТОВ В  
ПЛАЗМЕ И МАГНИТНЫХ СРЕДАХ**

Специальность 01.04.02 — теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2008

Работа выполнена на физическом факультете Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор П. А. Поляков

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор А. Е. Храмов  
доктор физико-математических наук,  
профессор Л. С. Кузьменков

Ведущая организация: Институт радиотехники и электроники РАН  
(Фрязинский филиал)

Защита состоится «20» ноября 2008 г. в 15<sup>30</sup> час. на заседании Диссертационного Совета Д 501.002.10 при Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова по адресу: 119991, ГСП-1, г. Москва, Воробьевы горы, МГУ, физический факультет, ауд. СФА.

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

Автореферат разослан «16» октября 2008 г.

Ученый секретарь  
Диссертационного Совета Д 501.002.10  
д. ф.-м. н.

Ю.В. Грац

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы** диссертации обусловлена как фундаментальными проблемами теории спиновой самоорганизации в магнитных структурах, так и наличием конкретных приложений в исследуемой области, например, анализ нелинейной динамики намагниченных частиц, задачи выявления закономерностей возникновения и развития коллективных спиновых структур в ферромагнитных материалах и на поверхности благородных металлов, определения условий существования стационарного спинового упорядочения и резонансного поведения анизотропной замагниченной плазменной среды. Среди прикладных задач можно выделить построение твердотельных запоминающих устройств на основе субмикронных магниторезистивных элементов, создание и улучшение носителей информации большого объема за счёт использования магнитных наноструктур, разработка миниатюрных датчиков магнитного поля, элементов радиофизических СВЧ-устройств (фильтры, вентили, спиновые транзисторы, резонаторы, поглотители), конструирование биочипов и управление магнитными микрогранулами в медицинских биосенсорах для обнаружения и распознавания одновременно многих биомолекулярных взаимодействий.

**Цель работы.** Построение теории, описывающей влияние объектов, обладающих собственным магнитным моментом на особенности самоорганизации в сложных электродинамических системах в рамках классического и квантового подходов.

**Научная новизна.** В диссертационной работе развита теория, учитывающая влияние геометрии образца на нелинейную динамику вектора намагниченности в нём в рамках односпинового приближения. Показано, что размагничивающие поля играют существенную роль в установлении конкретных динамических режимов в нелинейной системе. Обнаружен принципиально новый способ управления хаотической динамикой вектора намагниченности с помощью изменения конфигурации системы и формы самого образца, позволяющий добиться, в том числе, и полного подавления хаоса. Установлено также, что в зависимости от формы образца может возникать или полностью отсутствовать состояние «нелинейной динамической поляризованности» системы. На основе развитой теории произведён анализ работоспособности субмикронных магниторезистивных датчиков в СВЧ полях.

Получено точное аналитическое решение задачи определения магнитного поля однородно намагниченного прямоугольного параллелепипеда в отсутствие нефизических расходимостей на его рёбрах за счёт введения регуляризирующего параметра, определяющего размер неоднородности распределения намагниченности в образце.

Разработан метод, позволяющий без существенных вычислительных затрат проводить моделирование поведения структур на основе однослойных и двухслойных кольцевых датчиков магнитного поля.

Рассчитано поведение примесей меди и кобальта на поверхности благородного металла и установлено влияние расстояния между подложкой и адатомом на магнитный момент системы.

Получены дисперсионные кривые для анизотропной плазмы с учетом влияния собственного магнитного момента для волн, распространяющихся перпендикулярно и параллельно внешнему магнитному полю.

#### **Основные научные положения, выносимые на защиту:**

1. Новый способ управления нелинейной и хаотической динамикой вектора намагниченности за счёт изменения параметра формы и геометрии системы. Описание поведения системы при сжатии и растяжении магнитной частицы субмикронных размеров.
2. Аналитическое решение задачи нахождения магнитного поля однородно намагниченного прямоугольного параллелепипеда в отсутствие нефизических расходимостей на его рёбрах.
3. Изменение величины магнитного момента в системе адатом меди на поверхности благородного металла.
4. Трансформация дисперсионных ветвей, обусловленная влиянием тензорного  $g$ -фактора, в анизотропной магнитоактивной плазме.

**Научная и практическая значимость.** Результаты настоящей диссертации могут быть использованы в экспериментальных и теоретических исследованиях магнитных систем, микро и наноструктур, примесей на поверхности металлов, плотных плазменных сред, при создании запоминающих устройств и приборов СВЧ электроники на ферромагнитных элементах.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы, включающего 121 наименование. Общий объем текста — 129 машинописных страниц. Работа содержит 55 рисунков.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 27 печатных работ, в том числе 10 статей в журналах и сборниках и 17 тезисов докладов на конференциях, список которых приведен в конце автореферата.

**Апробация.** Результаты диссертации докладывались на XIX–XX Международных школах-семинарах «Новые магнитные материалы микроэлектроники» (Москва, 2004 г., 2006 г.), X Всероссийской школы-семинара "Физика и применение микроволн" (Звенигород, 2005 г.), Международных конференциях студентов и аспирантов по фундаментальным наукам «Ломоносов-2008» и «Ломоносов-2007» (Москва, 2008 г., 2007 г.), VII Международной школе «Хаотические автоколебания и образование структур» (Саратов,

2008 г.), XV, XIV и XIII Международной конференции по спиновой электронике и гировекторной электродинамике (Фирсановка, Московская обл., 2007 г., 2005-2006 г., 2004-2005 г.), XL Всероссийской конференции по проблемам математики, информатики, физики и химии (Москва, 2004 г.), Международной конференции МСС-04 «Трансформация волн, когерентные структуры и турбулентность» (Москва, 2004 г.), Moscow International Symposium on Magnetism (MISM-2005) (Москва, 2005 г.), Школе-семинаре «Волны 2006» (Москва, 2006 г.), а также на круглом столе IV Специализированной выставки нанотехнологий и материалов «NTMEX–2007» (Москва, 2007 г.).

### *Содержание работы*

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, формулируется основная цель работы, представлен обзор современного состояния исследований по теме диссертации. Приводится структура и краткое содержание глав диссертации.

В первой главе диссертации представлены разработанные методы аналитического расчёта магнитостатических задач в некоторых системах сложной формы. В первом параграфе получено точное аналитическое решение задачи определения магнитного поля однородно намагниченного параллелепипеда в отсутствие нефизических расходимостей на его гранях [5, 11, 23]. Наличие сингулярностей в данной задаче говорит о том, что модель однородно намагниченного параллелепипеда в отсутствие внешнего поля нефизична. Для устранения этого недостатка был введён регуляризирующий параметр  $\delta$ , который определяет размер неоднородности распределения намагниченности в образце. Выражения для регуляризированных компонент вектора индукции магнитного поля имеют следующий вид:

$$B_x(\xi, \eta, \zeta) = \frac{j}{c} \left\{ 2|z - \zeta| \cdot \arctg \frac{(y - \eta) + (z - \zeta) + R}{|z - \zeta|} + (x - \xi) \ln[(y - \eta) + R] + (y - \eta) \ln[(x - \xi) + R] \right\} \times \left( \left| \begin{smallmatrix} a-\delta, \delta, c \\ \delta, 0, 0 \end{smallmatrix} \right| - \left| \begin{smallmatrix} a-\delta, b, c \\ \delta, b-\delta, 0 \end{smallmatrix} \right| + \frac{1}{\sqrt{2}} \left| \begin{smallmatrix} \delta, \delta, c \\ 0, 0, 0 \end{smallmatrix} \right| + \frac{1}{\sqrt{2}} \left| \begin{smallmatrix} a, \delta, c \\ a-\delta, 0, 0 \end{smallmatrix} \right| - \frac{1}{\sqrt{2}} \left| \begin{smallmatrix} a, b, c \\ a-\delta, b-\delta, 0 \end{smallmatrix} \right| - \frac{1}{\sqrt{2}} \left| \begin{smallmatrix} \delta, b, c \\ 0, b-\delta, 0 \end{smallmatrix} \right| \right), \quad (1)$$

$$B_y(\xi, \eta, \zeta) = \frac{j}{c} \left\{ 2|z - \zeta| \cdot \arctg \frac{(x - \xi) + (z - \zeta) + R}{|z - \zeta|} + (x - \xi) \ln[(y - \eta) + R] + (y - \eta) \ln[(x - \xi) + R] \right\} \times \left( \left| \begin{smallmatrix} a, b-\delta, c \\ a-\delta, \delta, 0 \end{smallmatrix} \right| - \left| \begin{smallmatrix} \delta, b-b, c \\ 0, \delta, 0 \end{smallmatrix} \right| - \frac{1}{\sqrt{2}} \left| \begin{smallmatrix} \delta, \delta, c \\ 0, 0, 0 \end{smallmatrix} \right| + \frac{1}{\sqrt{2}} \left| \begin{smallmatrix} a, \delta, c \\ a-\delta, 0, 0 \end{smallmatrix} \right| + \frac{1}{\sqrt{2}} \left| \begin{smallmatrix} a, b, c \\ a-\delta, b-\delta, 0 \end{smallmatrix} \right| - \frac{1}{\sqrt{2}} \left| \begin{smallmatrix} \delta, b, c \\ 0, b-\delta, 0 \end{smallmatrix} \right| \right), \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
B_z(\xi, \eta, \zeta) = & \frac{j}{c} \left\{ 2|x - \xi| \cdot \arctg \frac{(y - \eta) + (z - \zeta) + R}{|x - \xi|} + (z - \zeta) \ln[(y - \eta) + R] + \right. \\
& + (y - \eta) \ln[(z - \zeta) + R] \left. \right\} \times \\
& \times \left( \left| \frac{a - \delta, \delta, c}{\delta, 0, 0} - \frac{a - \delta, b, c}{\delta, b - \delta, 0} + \frac{1}{\sqrt{2}} \left| \frac{\delta, \delta, c}{0, 0, 0} + \frac{1}{\sqrt{2}} \left| \frac{a, \delta, c}{a - \delta, 0, 0} - \frac{1}{\sqrt{2}} \left| \frac{a, b, c}{a - \delta, b - \delta, 0} - \frac{1}{\sqrt{2}} \left| \frac{\delta, b, c}{0, b - \delta, 0} \right. \right. \right. \right) + \\
& + \frac{j}{c} \left\{ 2|y - \eta| \cdot \arctg \frac{(x - \xi) + (z - \zeta) + R}{|y - \eta|} + (x - \xi) \ln[(z - \zeta) + R] + \right. \\
& + (z - \zeta) \ln[(x - \xi) + R] \left. \right\} \times \\
& \times \left( \left| \frac{a, b - \delta, c}{a - \delta, \delta, 0} - \frac{\delta, b - b, c}{0, \delta, 0} - \frac{1}{\sqrt{2}} \left| \frac{\delta, \delta, c}{0, 0, 0} + \frac{1}{\sqrt{2}} \left| \frac{a, \delta, c}{a - \delta, 0, 0} + \frac{1}{\sqrt{2}} \left| \frac{a, b, c}{a - \delta, b - \delta, 0} - \frac{1}{\sqrt{2}} \left| \frac{\delta, b, c}{0, b - \delta, 0} \right. \right. \right. \right)
\end{aligned} \tag{3}$$

где  $R = \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + (z - \zeta)^2}$ ,  $a, b, c$  – размеры образца, а в круглых скобках записаны подстановки для  $x, y, z$ .

Во втором и третьем параграфах первой главы построена аналитическая модель для расчёта распределения намагниченности в магниторезистивном однослойном и двухслойном нанозаэлементе кольцевой формы [4, 6, 7, 15, 16, 19, 27]. Непосредственное численное моделирование на основе решения уравнения Ландау — Лифшица требует больших вычислительных затрат, поэтому в данной диссертации была предпринята попытка упрощения теоретической модели, используя свойства геометрии системы, и сведения задачи к одномерной. Предложенный алгоритм позволяет без существенных вычислительных затрат проводить моделирование поведения сложных структур на основе упомянутых элементов.

Во второй главе обсуждается способ учёта влияния формы частиц на динамику магнитных моментов в них [1, 2, 14, 20]. Развитая теория актуальна прежде всего для субмикронных и нано частиц, состоящих из десятков атомов, когда величины проекций спина являются достаточно большими, и эффекты квантового туннелирования несущественны. В рамках подхода Ландау-Лифшица-Гильберта рассмотрена однородно намагниченная частица произвольной формы при наличии в ней одноосной кристаллографической анизотропии во внешнем магнитном поле, которое имеет как переменную, так и постоянную составляющие. Выберем декартову систему координат так, чтобы её оси были направлены вдоль главных осей тензора размагничивающих коэффициентов образца. Пусть ось легкого намагничивания (ОЛН) кристаллографической анизотропии лежит в плоскости ( $zOy$ ) и составляет угол  $\psi$  с координатной осью  $Oz$ . Пусть  $M$  - намагниченность образца,  $K$  - константа анизотропии,  $H_z$  - переменная составляющая

внешнего поля,  $H_y$  - постоянная составляющая внешнего поля,  $\alpha$  - постоянная затухания Гильберта,  $N_i$  - соответствующие размагничивающие факторы. Динамика такой системы в сферических координатах описывается следующей системой нелинейных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{d\Theta}{d\tau} = & p_y \cos \varphi - \alpha p_z \sin \tau \sin \Theta - p_m (N_y - N_x) \sin \Theta \sin(2\varphi) + \\ & + \alpha p_K (\sin \psi \cos \Theta \sin \varphi - \sin \Theta \cos \psi) \times \\ & \times (\sin \psi \sin \Theta \sin \varphi + \cos \Theta \cos \psi) + \\ & + p_K \sin \psi \cos \varphi (\sin \psi \sin \Theta \sin \varphi + \cos \Theta \cos \psi) + \alpha p_y \cos \Theta \sin \varphi \\ & - p_m \alpha \sin \Theta \cos \Theta \left( 3(N_y + N_x) - 2 + (N_x - N_y) \cos(2\varphi) \right) , \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi}{d\tau} = & \frac{1}{\sin \Theta} (p_z \sin \tau \sin \Theta - p_y \sin \varphi \cos \Theta + \\ & + \alpha p_K \sin \psi \cos \varphi (\sin \psi \sin \Theta \sin \varphi + \cos \Theta \cos \psi) - \\ & - p_K (\sin \psi \cos \Theta \sin \varphi - \sin \Theta \cos \psi) \times \\ & \times (\sin \psi \sin \Theta \sin \varphi + \cos \Theta \cos \psi) + \alpha p_y \cos \varphi - \\ & - p_m (\alpha (N_y - N_x) \sin \Theta \sin(2\varphi) + \\ & + p_m \sin \Theta \cos \Theta \{ 3(N_y + N_x) - 2 + (N_x - N_y) \cos(2\varphi) \}) , \end{aligned} \quad (5)$$

где управляющие параметры определены следующим образом:

$$\begin{aligned} p_y = & \frac{1}{1 + \alpha^2} \frac{\gamma H_y}{\omega}, \quad p_z = \frac{1}{1 + \alpha^2} \frac{\gamma H_z}{\omega}, \quad p_K = \frac{1}{1 + \alpha^2} \frac{2\gamma K}{\omega M}, \\ p_m = & \frac{1}{1 + \alpha^2} \frac{2\pi \gamma M}{\omega}, \quad \tau = \omega t. \end{aligned} \quad (6)$$

Анализ поведения намагниченности в образце, определяемого системой (4)-(5), производился численно. Выяснилось, что для исследования всего многообразия динамики такой нелинейной системы на фазовой плоскости (в частности поведения фазовых траекторий вблизи аттракторов, формирования хаотического режима) недостаточно простого применения только одних алгоритмов из теории частных производных. Была разработана методика, позволяющая анализировать стабильность аттракторов и различать квазипериодическое движение и хаотические режимы. Для распознавания хаотической динамики использовалась проверка спектральных свойств системы.

Зависимость режимов установившейся динамики вектора намагниченности от значений управляющих параметров (6) носит нетривиальный характер, поэтому для комплексного исследования поведения такой системы были построены серии бифуркционных диаграмм, на

основании которых можно однозначно определить возможные типы динамического упорядочения в ней. На основе анализа полученных бифуркационных диаграмм было установлено, что размагничивающие поля играют существенную роль в установлении конкретных динамических режимов в рассматриваемых системах. Обнаружен принципиально новый способ управления хаотической динамикой вектора намагниченности с помощью изменения конфигурации системы и формы самого образца, позволяющий добиться, в том числе, и полного подавления хаоса. Показано также, что в зависимости от формы образца может возникать или не возникать состояние «нелинейной динамической поляризованности» системы.

В четвёртом параграфе второй главы на основе развитой выше теории произведён анализ работоспособности субмикронных магниторезистивных датчиков в СВЧ полях [3, 6]. Рассмотрены частотные характеристики однослойных АМР FeNiCo полосок с различными параметрами при малом (по сравнению с полем анизотропии) внешнем переменном поле. В предельных случаях получено полное согласие результатов численного моделирования на основе разработанного алгоритма с результатами аналитической линейной теории. Полученные характеристики представляют собой пики, при этом существует сильная зависимость частотной характеристики и постоянного оптимального установочного магнитного поля от толщины и ширины ферромагнитной плёнки. Это объясняется увеличением магнитных размагничивающих полей на краях полоски и уменьшением чувствительности полоски с ростом её толщины и ширины. Проведены также исследования характеристик элементов с наклонной осью кристаллографической анизотропии. Путём решения вариационной задачи оптимизации установлено, что существует оптимальный угол направления ОЛН ( $65^0$ ), соответствующий максимальному сигналу магниторезистивной полоски.

Третья глава диссертации рассмотрен метод анализа поведения примесных диамагнитных и магнитных систем на основе аналитических подходов и численных расчётов в программном комплексе VASP [12, 13, 21, 26]. Во втором параграфе исследуется парамагнитная система: атом Cu в положении fcc на подложке Au(111). Поверхность золота моделировалась пятью слоями (3x3) по 9 атомов в каждом. Для интегрирования по зоне Брюэллена использовалась Monkhorst-Pack сетка k-точек размера 6x6x1 с размытием Мезфессела-Пакстона в 0.2 эВ. Расчёт электронной структуры с учётом спиновой поляризации производился на основе PAW метода, включённого в код VASP. Этот метод учитывает Дарвиновские и релятивистские спин-орбитальные поправки квантовой теории. Для аппроксимации потенциала корреляционного обменного взаимодействия использовалось GGA приближение. Процедура релаксации затрагивала три ближних к



адатому слоя золота, в то время как в двух остальных слоях сохранялась геометрия чистого образца. Силы, действующие на атомы, вычислялись исходя из теоремы Геллмана-Фейнмана как частные производные от свободной энергии по координатам атома. Самосогласованная процедура вычислений прерывалась, когда разность в двух последовательных итерациях была менее 0.05 эВ между модулями сил и 0.001 эВ между значениями энергии.

Прежде чем перейти непосредственно к расчёту электронной структуры в системе адатомом Cu на поверхности Au(111), были произведены релаксационные вычисления структуры чистой поверхности золота. Полученное равновесное значение постоянной решётки 4.065 Å хорошо согласуется с известными экспериментальными данными 4.08 Å.

Было обнаружено, что магнитный момент системы исчезает при приближении адатома меди к поверхности благородного металла, что соответствует экспериментальным данным. Исследование спектра электронной плотности показало, это происходит из-за того, что при малом расстоянии между адатомом и подложкой происходит гибридизация 4s оболочки Cu и 4d оболочки Au. В результате формируется гибридная энергетическая зона, и электроны с 4d орбитали могут переходить на 4s орбиталь Cu, тем самым заполняя её. Вследствие этого происходит исчезновение магнитного момента у адатома меди. При удалении меди от поверхности магнитный момент системы постепенно увеличивается и выходит на насыщение, совпадая по величине с магнитным моментом изолированного атома Cu.

В третьем параграфе третьей главы исследуется одномерная магнитная система адатомом Co на поверхности Au(111). Распределение электронной плотности в данной системе было получено посредством расчётов на программном комплексе VASP и компьютерным моделированием уравнений, описывающих двухуровневую систему в металле на основе гамильтониана Андерсона (7):

$$H = \sum_{k,s} E_k a_{k,s}^+ a_{k,s} + \sum_s E_d b_s^+ b_s + \sum_{k,s} V_{kd} (a_{k,s}^+ b_s + b_s^+ a_{k,s}) + U n_{d\uparrow} n_{d\downarrow}, \quad (7)$$

здесь  $a_{k,s}$  - оператор уничтожения свободного электрона,  $b_s$  - оператор уничтожения электрона на d уровне примеси,  $n_d = b_s^+ b_s$ ,  $U$  - потенциал кулоновского отталкивания между электронами d уровня примеси,  $V_{kd}$  - потенциал гибридизации d уровня примеси,  $E_k, E_d$  - законы дисперсии свободных электронов и электронов примеси. Суммирование идёт по всем спиновым s состояниям.

Прямое решение такой задачи в рамках теории возмущений приводит к ошибочным результатам, противоречащим эксперименту, поскольку кулоновское взаимодействие в таких системах сравнимо с кинетической энергией электронов. Гамильтониан (7) можно переписать в терминах операторов двух квазичастиц и электронов проводимости, т.е. представить процесс перехода электронов между d уровнем примеси и свободным

состоянием как акт рождения псевдофермиона и уничтожения псевдобозона на этом энергетическом уровне (подразумевая под последним незанятое состояние на  $d$  уровне примеси со спином 0):

$$H = \sum_{k,s} E_k c_{k,s}^+ c_{k,s} + \sum_s E_d f_s^+ f_s + \sum_s V_{kd} (c_{0,s}^+ b_s^+ f_s + \text{э.с.}), \quad (8)$$

где  $f_{k,s}^+$  - оператор рождения псевдофермиона,  $b_s^+$  - оператор рождения псевдобозона,  $c_s^+$  - оператор рождения электрона проводимости. Суммирование идёт по всем спиновым  $s$  состояниям.

Такому гамильтониану соответствует сложная система нелинейных интегральных уравнений относительно спектральных функций квазичастиц и электронов проводимости. Данная система интегральных уравнений решалась численно методом последовательных итераций. Выяснилось, что интегралы, входящие в эту систему, трудно поддаются расчёту вследствие сингулярной пороговой структуры спектральных функций с заранее неизвестным пороговым значением энергии. Чтобы эффективно производить численное моделирование необходимо совпадение начала отсчёта энергии квазичастиц с этим пороговым значением. Поскольку, построенный гамильтониан является  $U(1)$  инвариантным относительно преобразования по энергии операторов псевдочастиц, сделаем замену:  $f \rightarrow \exp(i\lambda t)f$ ,  $b \rightarrow \exp(i\lambda t)b$ . Это приведёт к сдвигу по энергии:  $\omega \rightarrow \omega + \lambda$ . Таким образом, на каждом шаге итерации необходимо будет подбирать  $\lambda$  таким образом, чтобы выполнялись правила суммирования квантовой теории.

Численная модель строилась на базе языка программирования C++. Вместо интегралов в системе считались соответствующие суммы Дарбу. Одним из основных моментов здесь является выбор сетки для численных расчётов. Равномерная сетка не подходит по нескольким причинам: во-первых, она в сотни раз увеличивает время счёта, т.к. не отражает особенностей поведения подынтегральных функций, во-вторых, вследствие этого приводит к неправильным результатам и разрушению процесса сходимости итераций. Пусть энергия Ферми рассматриваемой системы совпадает 0 оси энергии. Из физических соображений диапазон энергии разбивается на следующие интервалы:  $[-\infty, -\varpi)$ ,  $[-\varpi, 0 = \varepsilon_F)$ ,  $[0, \varpi)$ ,  $[\varpi, \infty)$ , где  $T_K \ll \varpi < |E_d|$  ( $T_K$  - температура Кондо). Почти вся информация о поведении спектральных функций находится во 2-ом и 3-ем интервале, вследствие их быстрого убывания на бесконечности, поэтому разумным представляется сделать сетку на этих интервалах более густой. Чтобы не строить неравномерную сетку непосредственно, можно соответствующим образом выбрать замены

переменных на каждом интервале энергии. Кратко сформулируем алгоритм работы программы:

- построение равномерной сетки (200 точек)
- выбор пробных спектральных функций, удовлетворяющих нормировке
- выбор замены переменных:  $\omega' = E_d + q \cdot \tan(\omega)$  на первом и последнем интервалах,  $\omega' = qq \cdot \exp(\omega)$  на внутренних интервалах
- определение параметров  $q$  и  $qq$  путём сшивания функций
- решение интегральных уравнений для мнимых частей собственных энергетических функций квазичастиц
- через соотношения Крамерса-Кронига получение действительных частей собственных энергетических функций квазичастиц
- получение значения параметра сдвига энергии через решение уравнения нормировки
- повторение итерации (с пункта 5), пока разница между спектральными функциями, полученными в результате двух последовательных итераций, не будет меньше определённого числа

Глава IV посвящена анализу влияния анизотропии на поведение плазменных систем, находящихся в однородном магнитном поле, с учётом собственного магнитного момента в гидродинамическом приближении [8-10, 17, 18, 22, 24, 25]. В настоящей диссертационной работе приводится исследование распространения волн перпендикулярно и параллельно внешнему магнитному полю в плазменной среде с тензорным  $g$ -фактором, которое показывает, что наличие анизотропии приводит к смещению ветвей плазменных мод, а сильная анизотропия – к пропаданию одной из них.

### **Выводы**

В заключение сформулируем основные результаты, полученные в диссертации:

1. Найден способ управления нелинейной динамикой вектора намагниченности за счёт изменения параметра формы и геометрии системы. Исходя из развитой теории, рассчитаны бифуркационные диаграммы, и описано поведение системы при сжатии и растяжении магнитной частицы субмикронных размеров.
2. На основе развитой теории движения вектора намагниченности в образце с учётом его формы показана возможность формирования пологой частотной характеристики в заданном диапазоне частот для магниторезистивных FeNiCo наноструктур в СВЧ магнитном поле малой амплитуды.

3. Получено точное аналитическое решение задачи нахождения магнитного поля однородно намагниченного прямоугольного параллелепипеда.
4. Построена аналитическая модель для анализа распределения намагниченности в магниторезистивном однослойном и двухслойном датчике кольцевой формы, на основании которой найдены оптимальные параметры для достижения максимальной восприимчивости нано элемента.
5. Описано поведение магнитного момента в системе адатом Си на поверхности благородного металла Au(111). Установлено влияние расстояния от адатома до поверхности на величину магнитного момента, и указаны причины такой зависимости.
6. Построен эффективный численный алгоритм, позволяющий на основе самосогласованной системы уравнений проводить вычисления электронной плотности состояний в двухуровневой системе в металле, описываемой гамильтонианом Андерсона. Результаты расчёта по предложенному алгоритму для магнитной системы адатом Со на поверхности Au(111) совпадают с результатами аналогичного расчёта на программном пакете VASP и экспериментальными данными.
7. Показано, что учёт тензорного  $g$ -фактора при распространении волн в анизотропной магнитоактивной плазме в гидродинамическом приближении приводит к сближению дисперсионных ветвей, а в случае большой величины анизотропии, к исчезновению одной из них. Данный эффект установлен как в случае распространения волн перпендикулярно магнитному полю, так и параллельно.

**Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. Вагин Д.В., Поляков О.П. Особенности нелинейной динамики однородно намагниченной малой частицы с учётом её формы // Нелинейный мир. — 2007. — Т.5. №10–11. — С. 369–374.
2. Vagin D.V., Polyakov O.P. Effect of sample shape on nonlinear magnetization dynamics under an external magnetic field // J. Magn. Magn. Mater. — 2008. — doi:10.1016/j.jmmm.2008.07.021.

3. Вагин Д.В., Касаткин С.И., Поляков О.П. Частотные характеристики однослойных анизотропных чувствительных наноэлементов // Автоматика и телемеханика. — 2008. — №10. — С. 168-175.
4. Вагин Д.В., Касаткин С.И., Поляков П.А. Теоретические исследования работоспособности кольцевых анизотропных магниторезистивных микроэлементов // Микроэлектроника. — 2007. — Т. 36, № 2. — С. 104–110.
5. Акимов М. Л., Вагин Д. В., Ким Н. Е., Поляков П. А., Русаков А. Е., Усманов Н. Н. Сложная доменная структура в магнитной плёнке с наклонной анизотропией // Известия РАН. Серия Физическая. — 2007. — Т. 71, №11. — С. 1599–1601.
6. Вагин Д.В., Касаткин С.И., Васильева Н.П., Муравьёв А.М., Плотникова Н.В. Магниторезистивные наноэлементы и приборы на их основе // Датчики и Системы. — 2008. — №4. — С. 6–9.
7. Вагин Д.В., Поляков П.А., Касаткин С.И. Анализ работоспособности датчика магнитного поля кольцевой формы // Датчики и Системы. — 2005. — №11. — С. 24–29.
8. Вагин Д. В., Ким Н. Е., Поляков П. А., Русаков А. Е. Особенности распространения электромагнитных волн в горячей магнитоактивной плазме с учетом спина электронов // Известия РАН. Серия Физическая. — 2006. — Т. 70, № 3. — С. 443–447.
9. Вагин Д. В., Ким Н. Е., Поляков П. А., Русаков А. Е. Особенности распространения электромагнитных волн в релятивистской плазме с учетом собственного магнитного момента электронов // Труды ИЭИ. — 2006. — Вып. 5 — С. 161-169.
10. Вагин Д. В., Ким Н. Е., Поляков О. П., Поляков П. А., Русаков А. Е. Циклотронные моды в релятивистской плазме с нерелятивистским поперечным разбросом температур // Труды ИЭИ. — 2004. — Вып. 4. — С. 496–502.
11. Вагин Д. В., Герасименко Т. Н., Поляков О.П., Поляков П. А., Русаков А. Е., Русакова Н. Е. Расчет магнитного поля одноосевого домена // Сборник статей по материалам Международной конференции «Радиолокация и связь» (9–11 ноября 2007 г., Фирсановка, Московская обл.). — М.: Изд-во МЭИ, 2007. — С. 131–133.
12. Вагин Д. В., Поляков О.П. К вопросу об управлении намагниченности в низкоразмерных системах. // Сборник статей по материалам Международной конференции «Радиолокация и связь» (9-11 ноября 2007 г., Фирсановка, Московская обл.). — М.: изд-во МЭИ, 2007. — С. 125-127.

13. *Вагин Д. В., Поляков О.П.* Метод расчета влияния обменного взаимодействия в двухуровневой системе в металле на основе модели Андерсона. // Сборник статей по материалам Международной конференции «Радиолокация и связь» (9-11 ноября 2007 г., Фирсановка, Московская обл.). — М.: изд-во МЭИ, 2007. — С. 148-150.
14. *Вагин Д. В., Поляков О.П.* Влияние формы образца на особенности нелинейной динамики вектора намагниченности во внешнем магнитном поле. // Сборник статей по материалам Международной конференции «Радиолокация и связь» (9-11 ноября 2007 г., Фирсановка, Московская обл.). — М.: изд-во МЭИ, 2007. — С. 134-147.
15. *Вагин Д.В., Поляков П.А., Касаткин С.И.* Анализ работоспособности магниторезистивного чувствительного элемента кольцевой формы // Proceedings XIII International Conference on Spin–Electronics and Gyrovectoelectrodynamics. Moscow. — Publisher UNC–1 MPEI (TU). 2004–2005. — p. 112-126.
16. *Вагин Д.В., Поляков П.А., Касаткин С.И.* Метод расчёта распределения намагниченности в тонкоплёночном двухслойном кольцевом датчике магнитного поля и характеристик его работоспособности // Сборник трудов XX международной школы-семинара Новые Магнитные Материалы Микроэлектроники 12 июня – 16 июня 2006 г., Москва. — М.: Физический факультет МГУ. 2006. с. 1009-1011.
17. *Вагин Д. В., Поляков П. А., Русаков А. Е., Русакова Н. Е.* Влияние собственного магнитного момента электрона на распространение электромагнитных волн в релятивистской плазме // Сборник статей по материалам Международной конференции «Радиолокация и связь» (9–11 ноября 2007 г., Фирсановка, Московская обл.). — М.: изд-во МЭИ, 2007. — С. 128–130.
18. *Вагин Д. В., Ким Н. Е., Поляков П. А., Русаков А. Е.* Особенности распространения электромагнитных волн в горячей магнитоактивной плазме с учетом спина электронов // Труды X Всероссийской школы–семинара "Физика и применение микроволн" (23–28 мая 2005 г., Звенигород, Московская обл.). Часть 3. — М.: Физический факультет МГУ. 2005. — С. 35–37.
19. *Vagin D.V., Polyakov P.A., Kasatkin S.I.* Ring-shaped anisotropic magnetoresistance-based mesoscopic sensor and its characteristics // MISM 2005. Books of abstracts. p.228-229.

20. Вагин Д. В., Поляков О.П. Хаотическая динамика однородно намагниченной малой частицы с учетом ее формы. // Материалы VII Международной школы «Хаотические автоколебания и образование структур» 9–14 октября 2007г. — Саратов.: Изд-во Саратов. ун-та, 2007. — С. 38.
21. Вагин Д.В., Поляков О.П. О возможности расчёта обменного интеграла из первых принципов // НМММ 2004. Сборник трудов. — М.: Физический факультет МГУ Сборник трудов, 2004. — С. 810–812.
22. Вагин Д. В., Русакова Н. Е. Исследование коллективных спиновых эффертов в средах с тензорным  $g$ -фактором // Материалы докладов XV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов». — М.: изд-во МГУ; СП МЫСЛЬ, 2008. — С. 23–24.
23. Вагин Д.В., Герасименко Т.Н. Точное аналитическое решение задачи магнитостатики в случае однородно намагниченного параллелепипеда // Международная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных по фундаментальным наукам «Ломоносов–2007». Секция «Физика». Сборник тезисов. — М.: Физический факультет МГУ, 2007. — С. 245–246.
24. Вагин Д. В., Русакова Н. Е. Исследование коллективных спиновых эффертов в средах с тензорным  $g$ -фактором // Материалы докладов XV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов». — М.: Изд-во МГУ; СП МЫСЛЬ, 2008. — С. 23–24.
25. Вагин Д. В., Поляков П. А., Русаков А. Е., Русакова Н. Е. Влияние собственного магнитного момента электрона на распространение электромагнитных волн в релятивистской плазме // Сборник статей по материалам Международной конференции «Радиолокация и связь» (9–11 ноября 2007 г., Фирсановка, Московская обл.). — М.: изд-во МЭИ, 2007. — С. 128–130.
26. Вагин Д.В., Поляков П.А. Об обменном интеграле в гамильтониане Гайзенберга / XL Всероссийская конференция по проблемам математики, информатики, физики и химии (секция физика). Тезисы докладов секции физики. — М.: Издательство РУДН. 2004. с. 52-55.
27. Поляков П. А., Вагин Д. В., Касаткин С. И., Поляков О. П., Русаков А. Е. Магнитная локация как одно из перспективных направлений элементов наноэлектроники (спинтроники) // Доклад на круглом столе IV Специализированной выставки нанотехнологий и материалов «NTMEX–2007». — (05–07 декабря 2007 г.) — 2 с.