

На правах рукописи

Исавнин Алексей Геннадьевич

**СТОХАСТИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС
В СИСТЕМЕ ОДНОДОМЕННЫХ МАГНИТНЫХ ЧАСТИЦ**

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени

доктора физико - математических наук

Ижевск - 2006

Работа выполнена в Камской государственной инженерно-экономической академии, г.Набережные Челны.

Научный консультант - доктор физико-математических наук, профессор **Садыков Эдгар Камилович.**

Официальные оппоненты : доктор физико-математических наук, профессор **Голенищев-Кутузов Вадим Алексеевич,**

доктор физико-математических наук, профессор **Ермаков Анатолий Егорович,**

доктор физико-математических наук, профессор **Марценюк Михаил Андреевич.**

Ведущая организация - ГОУВПО Ижевский государственный технический университет.

Защита состоится 30 июня 2006 г. в _____ на заседании диссертационного совета Д 212.275.03 при Удмуртском государственном университете по адресу : 426037 г. Ижевск, ул. Университетская, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Удмуртского государственного университета.

Автореферат разослан _____ 2006 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

к.ф.-м.н., доцент

П.Н.Крылов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Изучение свойств мелкодисперсных магнитных систем представляет собой важную и интересную область исследований физики конденсированного состояния. Физические и химические свойства мелких частиц могут значительно отличаться от соответствующих свойств массивных образцов. Малые магнитные частицы, обладающие специфическими, зачастую уникальными, особенностями, определяют характеристики таких материалов, как магнитные основы для записи и хранения информации, феррожидкости, кластерные структуры, пигменты красителей, высокоэффективные катализаторы из тонкодисперсных порошков или керамики с зернами нанометрового размера, применяемые в авиации радиопоглощающие керамические материалы, в матрице которых беспорядочно распределены мелкодисперсные металлические частицы, широко применяемые аэрозоли и т.д. Направления работ в этой области охватывают методы получения нанокристаллических структур (компактирование порошков, осаждение на подложку, кристаллизация аморфных сплавов, интенсивная пластическая деформация и другие), методы экспериментальных исследований их свойств, а также теоретические разработки, относящиеся к природе магнетизма малых и ультрамалых частиц. Важность изучения свойств подобных частиц определяется в том числе и тем, что особенности того или иного вещества, явления, процесса создаваемых природой, закладываются на уровне атомов и молекул, размеры которых сопоставимы с размерами нанообъектов. Именно с подобными структурами оперируют нанотехнологии, применяемые в самых различных областях, например для изготовления легких, прочных и термостойких деталей, например, лопаток газовых турбин турбореактивных двигателей самолетов. Суспензии металлических наночастиц (обычно железа и его сплавов) размером от 30 нм до 1-2 мкм используются как присадки к моторным маслам для восстановления изношенных деталей автомобильных и

других двигателей непосредственно в процессе работы. Наночастицы широко применяются в производстве современных микроэлектронных устройств, в электронике и компьютерной технике нанотехнологии в тысячи раз увеличат эффективность работы компьютеров. Наноструктурные материалы помогут и уже помогают при переработке и обезвреживании отходов, окисляя органические загрязнители, связывая атомы тяжелых металлов. Керамические наноматериалы широко применяются для изготовления деталей, работающих в условиях повышенных температур, неоднородных термических нагрузок и агрессивных сред. Сверхпластичность керамических наноматериалов позволяет получать из них применяемые в аэрокосмической технике изделия сложной конфигурации с высокой точностью размеров. Многие ценные лекарственные препараты нерастворимы в воде и часто с трудом проникают внутрь клеток при введении в кровь. Создается опасность закупорки капилляров и других мелких кровеносных сосудов. Но в связке с наночастицами они почти свободно движутся в кровотоке, намного повышая эффективность и скорость воздействия лекарственных препаратов на ткани человеческого организма. Живые организмы решают ряд своих «технических» задач с помощью молекулярных двигателей и других внутриклеточных функциональных «машин». Объединив такие биологические объекты с неорганическими устройствами, можно будет создать новые гибриды. Искусственные биологические ткани помогут компенсировать утраченные организмом функции, имплантанты с нанометровым защитным покрытием, препятствующим отторжению, практически будут интегрированы в организм. В США за пять лет с 1997 по 2002 год расходы Министерства обороны на нанотехнологии выросли в 5.6 раза, национального института здоровья - в 8.2 раза, Национального агентства аэронавтики и космонавтики (НАСА) - в 15.5 раза. А всего за то же время бюджетные ассигнования на эти цели увеличились со 116 миллионов долларов до 604.4, то есть в 5.2 раза.оборот мирового рынка нанопродукции в 2001 году составил около 45 миллиардов долларов. Согласно прогнозам, через 10-15 лет он достигнет порядка одного триллиона.

Основные эффекты, характерные для системы малых (размером 5-50 нм) магнитных частиц, являются следствием, прежде всего, того, что такая частица обычно образует единственный магнитный домен. При уменьшении размеров однодоменных частиц возрастает вероятность того, что тепловое движение в самой частице приведет к неустойчивости ее намагниченности; при этом магнитные моменты атомов остаются параллельными друг другу, а направление суммарного магнитного момента флуктуирует. Таким образом, частицы могут перемагничиваться даже в отсутствие внешнего магнитного поля, так как тепловая энергия становится сравнимой по величине с энергией анизотропии, удерживающей вектор магнитного момента частиц в направлении, соответствующем минимуму энергии. Это явление получило название суперпарамагнетизма.

Другой специфической чертой малых объектов является относительно большое удельное количество атомов, расположенных вблизи поверхности частицы (для частиц размером менее 10 нм доля таких атомов составляет примерно 10-15%), что также может оказывать существенное влияние на их физические свойства. В частности, атомы, расположенные у поверхности, будут давать значительный вклад в магнитную анизотропию малых частиц, тогда как для макроскопических объектов такое влияние пренебрежимо мало.

Существует еще одна интересная особенность, характерная для малых магнитных частиц, - возможность квантового туннелирования вектора магнитного момента частицы из метастабильных состояний, обусловленных магнитной анизотропией (Е.М.Чудновский, Л.Гюнтер, 1988 г.). Таким образом, спонтанное перемагничивание однодоменных частиц может происходить не только вследствие явления суперпарамагнетизма, т.е. при достаточно высоких температурах, но и при очень низких температурах, вследствие макроскопического квантового туннелирования.

Подобные особенности физических свойств малых магнитных частиц интересны сами по себе и, в частности, приводят к качественному изменению отклика таких магнитных систем на внешнее возмущение. Таким образом,

процессы перемагничивания и изучение поведения мелкодисперсных магнитных систем в переменных полях представляют собой одну из актуальных областей исследования магнитных материалов.

Сравнительно недавно появился ряд работ (Б.Макнамара, К.Визенфельд, П.Джанг и др., 1989 г.) по стохастическому резонансу - явлению, заключающемуся в прохождении через максимум отклика бистабильной (в общем случае - мультистабильной) системы на внешнее периодическое возмущение при монотонном увеличении интенсивности шума. Так как малая ферро (ферри-) частица с магнитной анизотропией типа "легкая ось" представляет собой пример бистабильного элемента, двум устойчивым состояниям которого соответствуют две противоположные ориентации ее магнитного момента вдоль оси легкого намагничивания, то справедливо предположение о возможности реализации стохастического резонанса в такой системе.

Концепция стохастического резонанса была впервые перенесена в область мелкодисперсного магнетизма в работах Э.К.Садыкова и др. в 1990 г., где были предложены также несколько возможных экспериментальных методик для наблюдения эффекта стохастического резонанса в системе суперпарамагнитных частиц. Существует еще множество интересных неисследованных вопросов, касающихся особенностей физических свойств малых магнитных частиц, возникающих при наличии внешних переменных полей и наиболее ярко проявляющихся при стохастическом резонансе. Кроме того, некоторые рассмотренные ранее темы и модели требуют дальнейшего изучения, развития и детализации.

Постановка задачи настоящей диссертации обусловлена указанными проблемами и состоит в систематическом теоретическом исследовании динамики намагниченности мелкодисперсных магнитных систем в условиях стохастического резонанса.

Цель работы

Теоретический анализ и моделирование поведения намагниченности системы суперпарамагнитных частиц с магнитной анизотропией типа «легкая ось», подверженных воздействию переменного поля. Обнаружение условий реализации явления стохастического резонанса в такой системе, определение оптимального диапазона изменения внутренних и внешних параметров, в котором достигается максимальный эффект стохастического резонанса.

Рассмотрение динамической восприимчивости в системе суперпарамагнитных частиц в условиях стохастического резонанса. Учет непрерывного изменения вектора магнитного момента. Исследование явления стохастического резонанса с точки зрения возможного механизма усиления переменного сверхтонкого поля мелкодисперсных магнетиков.

Анализ существующих и предложение возможных экспериментальных методик для наблюдения динамики намагниченности малых частиц в условиях стохастического резонанса. Разработка теории и методов расчета мёссбауэровских спектров для случая произвольных периодических и статистически периодических полей на ядрах одноосных модулированных суперпарамагнитных частиц.

Изучение подбарьерной (туннельной) динамики намагниченности малых магнитных частиц. Рассмотрение на ее основе явления стохастического резонанса в системе однодоменных частиц при слабой термической активации и при полной ее отсутствии. Определение параметров реальных магнитных систем, позволяющих наблюдать стохастический резонанс в квантовом режиме.

Исследование влияния дополнительных постоянных магнитных полей на динамическую восприимчивость суперпарамагнитных частиц в условиях стохастического резонанса.

Методы исследования, достоверность и обоснованность результатов

В работе использованы теоретические методы исследования. Решения задач математического моделирования физических явлений базируются на экспериментальных данных и известных теоретических положениях

классической и квантовой электродинамики. Достоверность полученных результатов подтверждается корректностью разработанных математических моделей, их адекватностью по известным критериям оценки изучаемых процессов, использованием известных положений фундаментальных наук, сходимостью полученных теоретических результатов с данными эксперимента и с результатами исследований других авторов.

Научная новизна

На основе приближения дискретных ориентаций получены аналитические выражения для основных характеристик явления стохастического резонанса в системе суперпарамагнитных частиц: динамической магнитной восприимчивости, отношения сигнал/шум. Изучено поведение данных характеристик при различных параметрах системы (температура, частота модуляции, размеры частиц). Определена оптимальная аналитическая модель для скорости релаксации магнитного момента суперпарамагнитных частиц в условиях радиочастотной модуляции.

Предложена модель, описывающая трансформацию внешнего радиочастотного поля в переменное поле на ядре с учетом полей анизотропии. Показано, что коэффициент усиления переменного сверхтонкого поля в системе суперпарамагнитных частиц имеет температурную зависимость типа стохастического резонанса.

Обнаружен эффект снижения уровня внутреннего теплового шума системы одноосных суперпарамагнитных частиц в температурном диапазоне, соответствующем стохастическому резонансу. Величина эффекта оценена с учетом распределения частиц по размерам.

Разработана модель непрерывного изменения вектора намагниченности малых легкоосных частиц на основе уравнения Фоккера-Планка с периодически зависящим от времени дрейфовым слагаемым. Данная модель позволяет получить более точные значения характеристик стохастического резонанса, что особенно важно при интерпретации данных эксперимента. Произведен прямой

учет феноменологического параметра затухания прецессии вектора намагниченности.

Динамическая восприимчивость вычислена численным методом (с использованием техники цепных матричных дробей) с выходом за рамки теории линейного отклика. На основе непрерывной модели получена немонотонная температурная зависимость фазового сдвига динамики вектора намагниченности. Произведено сравнение результатов непрерывной модели с результатами квазиadiaбатического приближения.

Теоретически обоснована возможность и эффективность экспериментального способа наблюдения эффекта стохастического резонанса в системе одноосных магнитных частиц на примере их ядерно-гамма-резонансных спектров. Получены рекуррентные соотношения для супероператора эволюции ядра как исходные уравнения для наблюдаемых величин и их формальные решения. На основе численных расчетов подтверждена немонотонная температурная зависимость (типа стохастического резонанса) интенсивностей сателлитных линий мессбауэровских спектров модулированных суперпарамагнитных частиц в режиме коллапса сверхтонкой структуры спектров. Проведены оценки оптимальных условий (параметров) эксперимента.

В рамках дискретной модели вычислены динамическая магнитная восприимчивость и отношение сигнал/шум системы однодоменных частиц при полном отсутствии термической активации, когда динамика системы определяется подбарьерными (туннельными) переходами вектора намагниченности. Показано, что стохастический резонанс в таком квантовом режиме возможен только при наличии дополнительного постоянного магнитного поля, приложенного перпендикулярно легкой оси однодоменной частицы.

Оценено влияние отличных от нуля конечных температур на эффекты квантового туннелирования намагниченности однодоменных частиц в условиях стохастического резонанса. Получена аналитическая модель описания

динамической (периодической) скорости туннелирования вектора магнитного момента, учитывающая особенности квантовой системы. Определена критическая температура, выше которой преобладает надбарьерный механизм перемагничивания.

Рассмотрено влияние дополнительного постоянного магнитного поля на динамику вектора магнитного момента одноосной суперпарамагнитной частицы в условиях стохастического резонанса. В приближении дискретных ориентаций аналитически получены выражения для динамической магнитной восприимчивости в случае постоянного магнитного поля, приложенного перпендикулярно и параллельно легкой оси частицы. Выполнены численные оценки, позволяющие учесть влияние произвольно направленного постоянного магнитного поля. Показано, что регулировать уровень шума в суперпарамагнитной системе можно и с помощью изменения напряженности внешнего постоянного магнитного поля, приложенного перпендикулярно легкой оси.

Вычислены величина выходного отношения сигнала к шуму и компоненты динамической восприимчивости по отношению к сканирующему пробному полю при наличии дополнительного постоянного магнитного поля, приложенного перпендикулярно легкой оси.

Все перечисленные результаты выносятся на защиту

Научная и практическая ценность

В общей постановке стохастический резонанс – фундаментальная проблема статистической физики, следствие совместного действия шума и регулярного сигнала на бистабильную систему. Применительно к малым магнитным частицам, его следует признать скорее проблемой, имеющей непосредственное отношение к магнетизму. Действительно, мы здесь имеем дело с исследованием условий максимального взаимовлияния шума и сигнала в магнитной системе.

При этом происходит качественное изменение характера ряда известных проявлений магнетизма. Например, по качественно новому механизму осуществляется перемагничивание таких материалов, следует также говорить об особом характере изменения сверхтонкого поля в них под влиянием внешнего переменного поля. Результаты, представленные в настоящей диссертации, позволяют определять диапазоны изменений значений внутренних и внешних параметров системы наночастиц, при которых можно максимально выделить регулярную составляющую отклика системы на слабый периодический сигнал из общей динамики вектора магнитного момента, имеющей изначально нерегулярную природу. Такой механизм может быть, в частности, использован для регулирования порога чувствительности детекторов, увеличения разрешающей способности различных сенсоров. Явление стохастического резонанса, будучи по существу фундаментальным свойством магнитных систем в определенных условиях, может в дальнейшем составить основу метода исследования большого класса магнитных материалов, результата их обработки, процессов деградации и т.д.

Апробация работы

Результаты исследований докладывались лично автором диссертации, обсуждались и получили положительную оценку на следующих конференциях и семинарах :

1. Итоговые научные конференции Казанского государственного университета, Казань 1994-1997 г.
2. XXVII Международный Амперовский конгресс, Казань 1994 г.
3. II Республиканская конференция молодых ученых и специалистов, Казань 1996 г.
4. Республиканская конференция «Проблемы энергетики», Казань 1997 г.
5. 7-ой Международный семинар по физике сегнетоэлектриков, Казань 1997 г.
6. Межвузовская научно-практическая конференция «Экономическая синергетика и инновационные процессы», Набережные Челны 1998 г.

7. Межвузовская научно-практическая конференция «Экономическая синергетика и антикризисное управление», Набережные Челны 1999 г.
8. Международная научно-техническая конференция «Технико-экономические проблемы промышленного производства», Набережные Челны 2000г.
9. Международная молодежная научная конференция «Молодежь - науке будущего», Набережные Челны 2000 г.
10. Международная научно-практическая конференция «Наука и практика. Диалоги нового века», Набережные Челны 2003 г.
11. Международная научно-практическая конференция «Научный потенциал мира – 2004», Днепрпетровск 2004 г, Украина.
12. Межвузовская научно-практическая конференция, посвященная 25-летию КамПИ, Набережные Челны 2005 г.
13. Итоговые научные конференции филиала Казанского государственного университета, Набережные Челны 2004-2005 г.
14. Научный семинар в Институте физики металлов УрО РАН, Екатеринбург 2005 г.

Результаты работы представлены также в виде опубликованных тезисов докладов на следующих международных конференциях :

1. 5-ое международное совещание по ядерно-спектроскопическим исследованиям сверхтонких взаимодействий (NSI-HFI-5), 22-24 сентября 1993 г., Дубна, Россия.
2. 6-ая объединенная международная конференция по магнетизму и магнитным материалам (МММ – INTERMAG), 20-23 июня 1994 г., Альбукерк, США.
3. Международная конференция INTERMAG-95, 18-21 апреля 1995 г., Сан-Антонио, США.
4. Международная конференция по приложениям эффекта Мёссбауэра (ICAME-95), 10-16 сентября 1995 г., Римини, Италия.

5. 10-ая международная конференция по сверхтонким взаимодействиям (HFI-10), 28 августа - 1 сентября 1995 г., Лёвен, Бельгия.
6. 40-ая ежегодная международная конференция по магнетизму и магнитным материалам (MMM), 6-9 ноября 1995 г., Филадельфия, США.
7. 41-ая ежегодная международная конференция по магнетизму и магнитным материалам (MMM), 12-15 ноября 1996 г., Атланта, США.
8. 8-ая объединенная международная конференция по магнетизму и магнитным материалам (MMM – INTERMAG), 7-11 января 2001 г., Сан-Антонио, США.
9. 46-ая ежегодная международная конференция по магнетизму и магнитным материалам (MMM), 12-16 ноября 2001 г., Сиэтл, США.
10. 47-ая ежегодная международная конференция по магнетизму и магнитным материалам (MMM), 12-15 ноября 2002 г., Тампа, США.
11. Международная научно-практическая конференция «Наука: теория и практика», 20 июля - 5 августа 2005 г., Днепропетровск, Украина.

Представленные в настоящей диссертации исследования поддержаны следующими грантами и премиями :

1. Стипендия Президента Российской Федерации для аспиранта.
2. Премия первой степени конкурса молодых ученых Казанского государственного университета за цикл работ «Стохастический резонанс в мелкодисперсных магнетиках».
3. Грант № 95-02-05762 Российского Фонда Фундаментальных Исследований.
4. Стипендия и звание «Соросовский аспирант» Международной Соросовской научно-образовательной программы (ISSEP).
5. Грант NNT000 Международного Научного Фонда (ISF).
6. Звание «Соросовский доцент» Международной Соросовской научно-образовательной программы (ISSEP).
7. Грант NNT300 Международного Научного Фонда (ISF).

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка цитируемой литературы из 180 наименований и приложения. Объем работы – 230 страниц, включая 50 рисунков.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается выбор темы, ее актуальность и значение, формулируются цель и задачи исследования.

В первой главе раскрывается смысл и физическая основа явления стохастического резонанса как общестатистической концепции. Дается обзор наиболее важных теоретических и экспериментальных исследований стохастического резонанса, проведенных ранее в различных областях. Здесь же приводится краткое ознакомление с теоретическими методиками и моделями, используемыми для описания динамики (дискретной или непрерывной) бистабильной системы в условиях стохастического резонанса. Отдельное внимание уделено работам по изучению эффекта стохастического резонанса в магнитных системах. Описаны возможные способы стохастического перемагничивания однодоменной частицы, основанные на эффектах суперпарамагнитной релаксации и макроскопического квантового туннелирования намагниченности. Приведены несколько аналитических выражений, полученных ранее различными авторами (В.Браун, 1963 г., Л.Бессэ и др., 1992 г., П.Крегг и др., 1994 г.), описывающие скорость выхода вектора магнитного момента в отсутствие внешней модуляции из метастабильных состояний, которая является ключевой величиной при использовании дискретной модели описания поведения намагниченности. Показана возможность использования имеющихся теоретических и экспериментальных результатов для приложения теории стохастического резонанса к области мелкодисперсного магнетизма, развития и корректировки уже существующих и

формирования новых моделей описания поведения магнитного момента модулированных внешним переменным полем однодоменных частиц.

Во второй главе исследуется механизм реализации стохастического резонанса в системе суперпарамагнитных частиц с магнитной анизотропией типа «легкая ось», определяемый надбарьерными переходами вектора магнитного момента в условиях термической активации системы. Модулированная внешним радиочастотным полем легкоосная однодоменная частица рассматривается как бистабильный элемент, двум устойчивым состояниям которого соответствуют две противоположные ориентации вектора магнитного момента вдоль легкой оси. Интенсивности переходов системы между стабильными состояниями зависят от степени термической активации и описываются крамерсовыми скоростями. Аналитически решается управляющее уравнение, связывающее скорости выхода системы из устойчивых состояний с вероятностями нахождения в этих состояниях. В рамках модели дискретных ориентаций получены выражения для автокорреляционной функции, спектральной плотности, отношения сигнала к шуму, динамической магнитной восприимчивости. Такие результаты справедливы лишь для малых амплитуд внешнего переменного поля, в квазиadiaбатическом пределе, когда частота внешней модуляции меньше скорости локальной релаксации магнитного момента частицы, и в пределе высокого потенциального барьера. Показано, что эти результаты полностью согласуются с теорией линейного отклика. Получены характерные для стохастического резонанса колоколообразные зависимости компонент магнитной восприимчивости и отношения сигнал/шум от интенсивности шума (температуры). Исследовано влияние изменения внутренних и внешних параметров системы на динамику ее намагниченности в условиях стохастического резонанса. Обнаружен эффект снижения уровня шума в системе суперпарамагнитных одноосных частиц, модулированных радиочастотным полем. Величина данного эффекта вычислена в рамках теории двух состояний с учетом разброса частиц по размерам. Рассматривается возможность использования явления стохастического резонанса в качестве

механизма усиления переменного сверхтонкого поля. Произведен анализ, касающийся выбора реальных образцов для наблюдения в них явления стохастического резонанса.

В третьей главе раскрыты недостатки квазиadiaбатического приближения и показана необходимость учета непрерывности динамики системы, в частности, для более точной интерпретации данных эксперимента. Представлена модель непрерывной диффузии вектора магнитного момента суперпарамагнитных частиц с магнитной анизотропией типа «легкая ось» в условиях внешней модуляции радиочастотным полем. Вычисляется непосредственно функция распределения для магнитного момента частицы на основе решения соответствующего уравнения Фоккера-Планка с периодически зависящим от времени дрейфовым слагаемым. Расчеты произведены численным методом с использованием техники непрерывных матричных дробей. Такой подход позволяет определять величину восприимчивости единым образом во всем температурном диапазоне. Кроме того, данный метод свободен от ограничений, накладываемых моделью дискретных ориентаций: требование высокого потенциального барьера, малости амплитуды внешнего сигнала и условие низкой частоты модуляции. Вычислены компоненты комплексной магнитной восприимчивости при различных частотах и амплитудах внешнего переменного поля, при различных значениях параметра затухания. Результаты непрерывной модели сопоставляются с результатами модели дискретных ориентаций по значениям магнитной восприимчивости и отношения сигнала к шуму, расхождение составляет приблизительно 10-15% по абсолютной величине магнитной восприимчивости. Использование непрерывной модели приводит также и к другому результату по сдвигу фаз между изменением вектора намагниченности на частоте модуляции и внешним переменным полем - получена немонотонная температурная зависимость фазового сдвига. Приближение дискретных ориентаций дает только монотонное его уменьшение, так что результаты двух различных моделей совпадают лишь в области достаточно высоких температур.

В четвертой главе рассматривается вопрос о возможности наблюдения явления стохастического резонанса методами ядерной гамма-резонансной спектроскопии. На основе формализма супероператоров Лиувилля вычислены сечение поглощения и спектр пошедшего гамма-излучения. Получены рекуррентные соотношения для супероператоров эволюции, позволяющие проводить численные расчеты, используя алгоритм цепных матричных дробей, в случае внешнего периодического возмущения системы одноосных суперпарамагнитных частиц. Результаты численных расчетов представлены графически. Они указывают, что в режиме коллапса мёссбауэровских спектров (в случае Fe^{57} секстет вырождается в одиночную линию) появляются боковые сателлиты приблизительно естественной ширины, отстоящие от основной линии на частоту модуляции. Интенсивность таких сателлитов проявляет немонотонную температурную зависимость, что согласуется с теорией стохастического резонанса.

Пятая глава посвящена изучению подбарьерного (туннельного) механизма реализации стохастического резонанса в системе однодоменных частиц. В отличие от надбарьерного (классического) случая, туннельные переходы в одноосных системах невозможны без дополнительного постоянного магнитного поля, приложенного перпендикулярно легкой оси, причем скорость туннельных переходов зависит от величины этого поля. Здесь предложена аналитическая модель, позволяющая описать туннельные переходы в модулированном бистабильном потенциале. В рамках этой модели прежде всего аналитически вычислена скорость туннелирования вектора намагниченности из метастабильного состояния на основе евклидова действия, получаемого интегрированием функции Лагранжа вдоль инстантонной траектории. Проверочные численные расчеты показывают, что полученный аналитический результат является более корректным, по сравнению с результатами других авторов (А.Н.Григоренко и др., О.Б.Заславский, 1990 г.). Другая специфика предложенной динамической модели особенно важна при температурах, стремящихся к нулю. Так, например, вычисления магнитной восприимчивости и

отношения сигнал/шум системы при температуре абсолютного нуля с учетом этой особенности приводят к результатам, на два порядка превышающим прежние. Изучено поведение системы и при отличных от нуля конечных температурах, что достигается учетом возможности туннелирования не только со дна потенциальной ямы, но и с более высоких уровней. Основные соотношения получены аналитически в рамках модели дискретных ориентаций; проводится проверочное сравнение с результатами численного моделирования. Вычисленные значения компонент динамической магнитной восприимчивости при сверхнизких температурах сравниваются с соответствующими результатами для классического механизма реализации стохастического резонанса в системе суперпарамагнитных частиц, связанного только с надбарьерными тепловыми переходами вектора магнитного момента. Эффекты квантового туннелирования намагниченности максимально проявляются на образцах с размерами от 2 до 5 нм ниже температуры кроссовера (перехода от надбарьерного к подбарьерному механизму), не превышающей 0.01-0.1 К. Приведены оценки оптимальных размеров частиц, величины напряженности внешнего постоянного поля и амплитуды переменного поля для возможного экспериментального наблюдения стохастического резонанса в туннельном режиме перемагничивания.

В шестой главе рассматривается стохастический резонанс в несколько иной геометрии - устойчивые состояния системы оказываются смещенными вследствие приложения дополнительного постоянного магнитного поля. В рамках теории двух состояний рассмотрено влияние перпендикулярной и продольной составляющих такого поля на значение величин крамерсовых скоростей, величины отношения мощностей выходного сигнала и шума, динамической магнитной восприимчивости. Результаты численного моделирования отражают влияние произвольно направленного постоянного магнитного поля. Показано, что приложение постоянного магнитного поля перпендикулярно легкой оси приводит к усилению эффекта стохастического резонанса. Такой режим может быть полезен, например, вблизи точки Кюри, когда изменение уровня шума в системе с помощью температуры невозможно.

На основе решения управляющего уравнения получены компоненты динамической магнитной восприимчивости по отношению к сканирующему пробному полю для модулированной суперпарамагнитной частицы при наличии постоянного поля, приложенного перпендикулярно легкой оси.

Седьмая глава посвящена выбору лучшей аналитической модели, описывающей скорость суперпарамагнитной релаксации модулированных радиочастотным сигналом одноосных малых частиц. В рамках модели двух состояний рассматривается несколько выражений, модифицированных для случая внешней модуляции, и проводится сравнительный анализ с результатами непрерывной модели в температурном диапазоне реализации стохастического резонанса в системе суперпарамагнитных частиц. Найденная оптимальная аналитическая модель для скорости выхода системы из устойчивого состояния позволяет также установить корректную зависимость частоты попыток от параметров системы, например, от параметра затухания.

В приложении представлены основные программы, разработанные автором диссертации в среде программирования Turbo Pascal, использованные при расчетах динамической восприимчивости в дискретной и непрерывной моделях описания динамики вектора магнитного момента частиц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования, проведенные в настоящей работе, связаны с приложением теории стохастического резонанса к области мелкодисперсного магнетизма и являются продолжением изучения стохастического резонанса в бистабильных системах - малых частицах с магнитной анизотропией типа "легкая ось". Исследованы два механизма реализации стохастического резонанса, основанные на тепловых надбарьерных и туннельных переходах вектора магнитного момента таких частиц. Построены теоретические модели (дискретная и непрерывная), описывающие поведение намагниченности однодоменных частиц

в условиях стохастического резонанса. Показано, что вид кривых динамической магнитной восприимчивости и отношения сигнал/шум на выходе системы имеет в данном случае характерную для стохастического резонанса немонотонную колокообразную зависимость от интенсивности шума.

Аналитически, в рамках модели дискретных ориентаций, получены зависимости основных характеристик явления стохастического резонанса от различных параметров системы - частоты внешнего поля, размеров частиц, значений констант магнитной анизотропии и намагниченности насыщения. Полученные результаты указывают на возможность усиления переменного сверхтонкого поля на ядрах суперпарамагнитных частиц в соответствующем температурном режиме. Отмечено, что в определенной температурной области происходит подавление шума в системе суперпарамагнитных частиц. В результате энергия неупорядоченной компоненты динамики вектора магнитного момента частицы трансформируется в энергию упорядоченных переходов между устойчивыми ориентациями.

Произведен учет непрерывного характера изменения вектора магнитного момента малых частиц. Метод, основанный на численном решении уравнения Фоккера-Планка, позволяет установить более корректную зависимость компонент динамической магнитной восприимчивости от параметров системы. Сравнение с соответствующими результатами дискретной модели показало довольно существенное различие в некоторых температурных областях. Использование непрерывной модели позволило также выйти за рамки теории линейного отклика, учесть влияние амплитуды внешнего радиочастотного поля и значения параметра затухания.

В качестве эффективного метода наблюдения стохастического резонанса в системе суперпарамагнитных частиц предложена гамма-резонансная спектроскопия. Численные расчеты сечения поглощения, использующие формализм супероператоров Лиувилля, указывают на возникновение сателлитных линий в режиме коллапса сверхтонкой структуры

мёссбауэровского спектра; интенсивность сателлитных линий проявляет немонотонную температурную зависимость типа стохастического резонанса.

Рассмотрена ситуация с дополнительным внешним постоянным магнитным полем, приложенным перпендикулярно легкой оси, для предельно низких температур. Показывается, что такое поле вызывает туннельные переходы вектора намагниченности малых частиц между устойчивыми ориентациями. Кроме того, величина этого поля определяет интенсивность подбарьерных переходов. Исследованы зависимости динамической магнитной восприимчивости и отношения сигнал/шум однодоменных частиц от величины этого поля. Произведен более корректный учет квантового характера динамики модулированной системы, по сравнению с предложенными ранее моделями. Данная поправка особенно важна при температурах, стремящихся к абсолютному нулю. Рассмотрено поведение системы и при отличных от нуля температурах, где проявляется действие как надбарьерного, так и подбарьерного механизма перемагничивания.

Показано, что дополнительное постоянное магнитное поле приводит к изменению и Крамерсовых скоростей надбарьерных переходов вектора магнитного момента суперпарамагнитной частицы. При этом перпендикулярная легкой оси компонента такого поля приводит к увеличению величины отклика системы (отношение сигнала к шуму, динамическая магнитная восприимчивость) на слабое переменное возмущение, а продольная компонента приводит к уменьшению отклика. Таким образом, регулировать уровень шума в системе суперпарамагнитных частиц можно не только с помощью изменения температуры образца, но и варьируя величину напряженности постоянного магнитного поля. И при наличии дополнительного постоянного магнитного поля, приводящего к смещению устойчивых ориентаций вектора магнитного момента частицы, также наблюдается характерная для стохастического резонанса немонотонная, проходящая через отчетливый максимум температурная зависимость динамической восприимчивости системы и выходного отношения сигнала к шуму. Показана возможность обнаружения

стохастического резонанса в режиме сканирования пробным полем с изменяющейся частотой модулированной радиочастотным полем суперпарамагнитной частицы.

Найдена оптимальная аналитическая модель для описания скорости суперпарамагнитной релаксации в приближении дискретных ориентаций в условиях стохастического резонанса. Определена зависимость частоты попыток от параметров системы: температуры, коэффициента диссипации, размера частиц, константы анизотропии и величины намагниченности насыщения.

Полученные модели описания динамики магнитных моментов однодоменных одноосных частиц в условиях стохастического резонанса имеют фундаментальное значение, а в прикладном аспекте позволяют, например, определить оптимальный диапазон изменения внутренних и внешних параметров системы (амплитуда и частота внешнего поля, температура, значения констант магнитной анизотропии и намагниченности насыщения, размеры частиц), в котором наблюдается максимальное взаимовлияние сигнала и шума, приводящее к увеличению отклика на выходе системы. Понимание природы явления стохастического резонанса дает возможность выделить, усилить регулярную компоненту изначально нерегулярной динамики вектора магнитного момента и ослабить случайную составляющую. В более широком понимании рассмотренный эффект является по сути еще одним из способов увеличения разрешения, резкости, контраста, изменения порога чувствительности сенсоров. Также иногда необходимо решение и обратной задачи - определение параметров системы, при которых стохастический резонанс не возникает. При этом, например, становится возможным предотвращение необратимых катастрофических воздействий слабых, незаметных периодических магнитных полей на живые организмы.

Наряду с рассмотренным в настоящей работе способом наблюдения динамики вектора магнитного момента, использующим модуляционную мёссбауэровскую спектроскопию, в настоящее время существует экспериментальная сквид-техника, позволяющая проводить наблюдение за

отдельной суперпарамагнитной частицей (В.Вернсдорфер и др., В.Коффи и др., 1994 г.), в том числе и при очень низких температурах (Х.Фернандес и др., 1998 г., М.Ледерман и др., 1994 г.). Кроме того, есть еще одна возможность экспериментального наблюдения стохастического резонанса в системе однодоменных анизотропных частиц (И.Абу-Альджараш др., 1993 г.). Она может оказаться особенно полезной в ситуации с дополнительными постоянными магнитными полями. Суть ее состоит в использовании феррожидкостей. Это дает следующие два преимущества. Во-первых, разбавляя и, затем, замораживая магнитную жидкость, можно получить твердый образец с нужной концентрацией магнитных кластеров (например, чтобы свести к минимуму эффекты диполь-дипольных взаимодействий). Во-вторых, замораживая феррожидкость в сильном постоянном магнитном поле, можно ориентировать легкие оси кластеров в одном выбранном направлении. Отсутствие подобного поля, естественно, приводит к случайному распределению осей анизотропии магнитных кластеров в немагнитной матрице.

Полученные в диссертации результаты позволяют ставить и новые задачи. Исследование влияния окрашенного шума, другая природа входного сигнала и шума, более сложные типы магнитной анизотропии, учет различных видов взаимодействия между частицами – эти и многие другие вопросы, связанные с приложением концепции стохастического резонанса к области мелкодисперсного магнетизма, наверняка вызовут исследовательский интерес у широкого круга теоретиков и экспериментаторов.

Основные результаты диссертационной работы отражены в следующих опубликованных материалах

МОНОГРАФИЯ

1. Исавнин А.Г. Стохастический резонанс в системе однодоменных магнитных частиц. - Набережные Челны: Издательство Камского

государственного политехнического института, 2004. - 160 с. - ил. - Библиогр. 155 назв. - ISBN 5-9536-0044-5. - 800 экз.

СТАТЬИ

1. Садыков Э.К., Скворцов А.И., Антонов Ю.А., Исавнин А.Г. Об одном механизме усиления сверхтонкого поля на ядре // Известия РАН. Серия физическая. - 1994. - т.58. - №4. - с.101-104.
2. Садыков Э.К., Исавнин А.Г. Усиление переменного магнитного поля в системе мелких магнитных частиц // Физика твердого тела. – 1994. - т.36. - № 11. - с.3473-3475.
3. Садыков Э.К., Исавнин А.Г. К теории динамической магнитной восприимчивости одноосных суперпарамагнитных частиц // Физика твердого тела. – 1996. - т.38. - № 7. - с.2104-2112.
4. Sadykov E.K., Isavnin A.G. Hyperfine field response to RF excitation in superparamagnetic particles (на английском языке) // Hyperfine Interactions. – 1996. - Vol.99. - p.415-419.
5. Садыков Э.К., Исавнин А.Г., Болденков А.Б. К теории квантового стохастического резонанса в однодоменных магнитных частицах // Физика твердого тела. – 1998. - т. 40. - №3. - с.516-518.
6. Sadykov E.K., Isavnin A.G. The Mössbauer susceptibility of magnetic materials in conditions far from equilibrium (на английском языке) // Лазерная физика (Laser Physics). – 1995. - т.5. - №2. - с.411-416.
7. Sadykov E.K., Isavnin A.G., Skvortsov A.I. Mössbauer transition dynamics in conditions of strong excitation of nuclear spins (на английском языке) // Hyperfine Interactions. – 1997. - Vol.107. - p.257-275.
8. Исавнин А.Г. Стохастический резонанс в мелкодисперсных магнетиках: механизм подбарьерного перемагничивания // Физика твердого тела. – 2001. - т.43. - № 7. - с.1216-1219.

9. Исавнин А.Г. Подавление шума в системе легкоосных суперпарамагнитных частиц в условиях радиочастотной модуляции // Физика твердого тела. – 2002. - т.44. - № 7. - с.1277-1279.
10. Исавнин А.Г. Стохастический резонанс в мелкодисперсных магнетиках: сравнение дискретной и непрерывной моделей описания // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2002. - т.45. - №11. - с.73-77.
11. Исавнин А.Г. Отклик суперпарамагнитных легкоосных частиц на радиочастотное поле с учетом постоянного магнитного поля, приложенного перпендикулярно легкой оси // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2005. - №4. - с.123-126.
12. Исавнин А.Г. Зависимость динамической восприимчивости суперпарамагнитных частиц от постоянного магнитного поля перпендикулярного легкой оси // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2005. - т.48. - №5. - с.64-68.
13. Исавнин А.Г. Динамическая восприимчивость легкоосных суперпарамагнитных частиц в слабом переменном поле // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2005. - №6. - с. 105-108.
14. Исавнин А.Г. Стохастический резонанс в мелкодисперсных магнетиках: влияние постоянного магнитного поля, приложенного вдоль легкой оси // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2005. - т.48. - №7. - с.26-31.
15. Исавнин А.Г. Влияние произвольно направленного постоянного магнитного поля на динамическую восприимчивость суперпарамагнитной частицы в условиях стохастического резонанса // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2006. - т.49. - №3. - с. 67-71.