

Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова

Физический факультет

На правах рукописи

ФЕДУЛОВА Татьяна Сергеевна

**ВЛИЯНИЕ СЛАБОЙ АДСОРБЦИИ НА ПРОЦЕССЫ
ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ АМОРФНЫХ
ФЕРРОМАГНЕТИКОВ**

Специальность 01.04.11 – физика магнитных явлений

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва, 2005

Работа выполнена на кафедре магнетизма физического факультета
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Научный руководитель	доктор физико-математических наук, профессор В. Е. Зубов
Официальные оппоненты:	доктор физико-математических наук, профессор Г. С. Плотников кандидат физико-математических наук, доцент А. С. Таблин
Ведущая организация	Физико-технический институт Уральского отделения РАН, г. Ижевск

Защита состоится “ 17 “ февраля 2005 года в 16-30 часов на заседании
диссертационного совета К 501.001.02 в Московском государственном
университете им. М.В. Ломоносова по адресу: 119992 ГСП-2, г. Москва,
Ленинские горы, МГУ, физический факультет, аудитория ЮФА.

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

Автореферат разослан “ 17 ” января 2005 года.

Ученый секретарь
Диссертационного Совета К 501.001.02,
кандидат физико-математических наук

И. А. Никанорова

Актуальность темы

Исследование влияния поверхности на магнитные свойства ферромагнетиков активно ведется в течение последних десятилетий. С фундаментальной точки зрения приповерхностная область магнетиков представляет интерес как объект пониженной размерности. В области практических приложений в настоящее время доминирует тенденция к миниатюризации электронных устройств, в частности устройств магнитной электроники. А это, в свою очередь, неизбежно приводит к повышению относительного влияния приповерхностных слоев магнитных элементов на работу устройств в целом, вплоть до того, что их вклад становится определяющим.

Происходящие при внешних воздействиях атомные, ионные и электронные процессы в граничных фазах твердых тел могут существенно влиять на функционирование различных систем микро-, опто- и акустоэлектроники. Одним из наиболее эффективных внешних воздействий на поверхность является адсорбция. Как правило, энергия связи молекул с поверхностью при химической адсорбции велика, и возврат к исходному состоянию может быть осуществлен лишь с помощью жесткого воздействия: например, очистки с помощью каталитических реакций, ионного травления, термической десорбции при высоких температурах, зачастую превышающих температуру плавления металла. В ряде случаев, например для тонких магнитных пленок или для аморфных ферромагнетиков, такое воздействие неизбежно изменяет структурные и магнитные характеристики материала. В отличие от химической адсорбции, слабая адсорбция, протекающая по механизму образования водородных связей, часто обратима при комнатной температуре или небольшом (на несколько десятков градусов Цельсия) нагреве, что позволяет вернуться к исходной поверхности, и, следовательно, получить

повторяемые экспериментальные результаты на одной и той же поверхности исследуемого образца.

С фундаментальной точки зрения представляет интерес исследование влияния адсорбции молекул воды и органических веществ, протекающей по механизму образования водородных связей, на свойства ферромагнитного материала, выяснение механизмов такого влияния и степени его воздействия на магнитные свойства ферромагнетика. Влияние внешней среды, а именно воздействие слабой адсорбции на магнитные свойства ферромагнетиков – практически неизученная область в физике магнитных явлений. В то же время, вода и органические вещества неизбежно присутствуют в окружающей атмосфере, контактируя и взаимодействуя с поверхностью ферромагнетиков.

С практической точки зрения интерес представляет изучение реальной поверхности ферромагнетиков, которая образуется в результате пребывания образца на воздухе. Атомные и электронные процессы на реальных поверхностях во многих случаях определяют функционирование миниатюризированных устройств магнитной электроники: магниторезистивных головок считывания, тонкопленочных магниторезистивных датчиков магнитного поля и многих других элементов современной техники. Для магнитной записи с увеличением плотности записи и снижением толщины рабочего слоя магнитной головки и носителя резко возрастает влияние приповерхностного слоя ферромагнетика. Наличие адсорбционного слоя на реальной поверхности магнитной ленты или магнитной головки может существенно ухудшить характеристики магнитной записи и воспроизведения. Для тонкопленочных элементов изменение свойств поверхностной области может оказаться эквивалентным изменению свойств всего элемента. Так как в настоящее время все большее количество ферромагнитных микроэлектронных устройств изготавливаются совместно с

полупроводниковыми схемами управления на одной подложке, то нестабильная работа одного элемента может стать причиной неработоспособности всей интегральной схемы. Поэтому решение проблемы выяснения механизмов влияния слабой адсорбции на поверхностные магнитные свойства является ключом к управлению статическими и динамическими магнитными свойствами ферромагнетиков с помощью обратимой адсорбции.

Цель работы

Целью данной работы было изучить влияние слабой адсорбции, не затрагивающей химической модификации поверхности, на магнитные свойства магнитомягкого ферромагнетика. Предполагалось, что такие данные:

- выявят влияние адсорбционных процессов на свойства магнитомягкого ферромагнетика;
- позволят выяснить механизмы влияния слабой адсорбции на магнитные свойства ферромагнитного материала;
- дадут новую информацию, которую можно будет использовать для управления свойствами магнитомягких ферромагнитных материалов, а также для стабилизации работы конкретных технических устройств магнитной микроэлектроники в условиях их взаимодействия с окружающей средой, то есть для поиска способов пассивации поверхности ферромагнетика.

Научная новизна

1. Впервые проведены экспериментальные исследования влияния слабой адсорбции различных газов (паров воды, метилового и гептилового спиртов), протекающей по механизму образования водородных связей, на процессы перемагничивания магнитомягких аморфных ферромагнетиков на основе железа.

2. Обнаружено, что под действием адсорбции молекул воды и метилового спирта релаксационная частота доменной границы в несколько раз уменьшается. Эффект полностью обратим при комнатной температуре.
3. Впервые установлено, что под действием адсорбции молекул воды и метилового спирта уменьшается начальная статическая восприимчивость аморфных ферромагнетиков. Эффект также полностью обратим при комнатной температуре.
4. Впервые исследовано влияние адсорбции гептилового спирта на магнитомягкие аморфные ферромагнетики. Обнаружено, что адсорбция молекул гептилового спирта на поверхности образцов не изменяет релаксационную частоту доменной границы и начальную статическую магнитную восприимчивость аморфных ферромагнетиков. Однако, адсорбированные молекулы гептилового спирта блокируют действие на эти свойства молекул метанола.
5. Предложена модель, объясняющая обнаруженные эффекты влияния слабой адсорбции, протекающей по механизму образования водородных связей, на процессы перемагничивания магнитомягких аморфных ферромагнетиков.

Практическая значимость

Практическую ценность представляет обнаружение влияния слабой адсорбции на магнитные свойства магнитомягких материалов, а также построение модели, объясняющей обнаруженные эффекты. Эти результаты могут быть использованы при определении направления совершенствования технологий изготовления магнитомягких ферромагнитных материалов.

Понимание механизмов влияния слабой адсорбции на процессы перемагничивания магнитомягких ферромагнитных материалов позволяет сформулировать практические рекомендации для защиты устройств

магнитной микроэлектроники от негативного влияния окружающей среды, сопровождающегося ухудшением магнитных характеристик материала. Полученные данные также предлагают метод пассивации поверхности таких материалов с помощью адсорбции крупных молекул. Полученные результаты представляют интерес и для разработки метода диагностики качества поверхности магнитомягких ферромагнетиков на основании данных об их взаимодействии с молекулами воды и спиртов. Кроме того, полученные данные можно использовать для создания материалов с модифицированными магнитными характеристиками, используя для этого контролируемые газовые среды.

Результаты, выносимые на защиту

- Результаты экспериментов, в которых обнаружен эффект торможения доменной границы магнитомягкого ферромагнетика в приповерхностной области под влиянием адсорбции молекул воды, а также метилового спирта с образованием водородных связей.
- Результаты экспериментов, в которых обнаружено уменьшение начальной статической магнитной восприимчивости магнитомягкого ферромагнетика под влиянием адсорбции с образованием водородных связей.
- Модель, объясняющая торможение доменной границы и изменение магнитной восприимчивости формированием в результате слабой адсорбции дополнительных приповерхностных магнитных дефектов, возникающей деформацией поверхности и, как следствие, появляющейся поверхностной перпендикулярной магнитной анизотропии.
- Результаты экспериментов, в которых обнаружено, что адсорбция молекул гептилового спирта блокирует поверхность магнитомягкого ферромагнетика от действия молекул метилового спирта; а также предложенный механизм обнаруженного эффекта.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы докладывались на 6 конференциях, в том числе 3 международных конференциях («Moscow International Symposium on Magnetism. Moscow. 1999», «the 3-rd European Conference on Magnetic Sensors & Actuators. Dresden. Germany. 2000», «19-th European Conference on Surface Science. Madrid. Spain. 2000», «Новые Магнитные Материалы Микроэлектроники. Москва. 2000», «Новые Магнитные Материалы Микроэлектроники. Москва. 2002», «Новые Магнитные Материалы Микроэлектроники. Москва. 2004»)

Основное содержание работы изложено в 7 статьях в отечественных и зарубежных журналах («Surface Science», «Sensors and Actuators», «ЖТФ», «Письма в ЖЭТФ», «Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия»).

Список печатных работ приведен в конце автореферата.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, выводов и списка цитируемой литературы. Полный объем работы 128 страниц, включая 40 рисунков. Библиография содержит 143 наименования.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель работы, научная новизна и практическая значимость результатов исследований; перечислены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертационной работы носит обзорный характер. В ней представлены основные сведения относительно доменных границ (ДГ) в ферромагнитных материалах: рассматривается их структура в объеме и на поверхности, приводятся основные сведения о динамике доменных

границ в ферромагнитных материалах. Дается краткий обзор современного состояния аморфных магнитомягких ферромагнитных материалов: их отличительных магнитных характеристик и структурных особенностей, технологических аспектов приготовления магнитомягких аморфных материалов с заданными магнитными свойствами. Значительная часть обзора посвящена анализу имеющихся на сегодняшний день данных о взаимосвязи адсорбционных и магнитных свойств ферромагнитных материалов. Приведены современные представления о реальной поверхности. Под термином *реальная поверхность* твердого тела подразумевают его контактирующую с атмосферой свободную поверхность, не подвергавшуюся специальной очистке. Важно отметить, что в этих условиях все активные центры поверхности заняты хемосорбированными молекулами, и образования новых прочных химических связей с молекулами из атмосферы не происходит. На реальной поверхности обычно присутствует пленка оксида, который в свою очередь гидратирован, т.е. содержит в своем составе координационно-сорбированные молекулы воды и гидроксильные группы. Большое внимание уделено современному пониманию механизмов адсорбции на реальных поверхностях переходных металлов и их оксидах. Анализируются экспериментальные и теоретические данные влияния различных типов адсорбции на магнитные свойства ферромагнитных материалов.

Вторая глава посвящена экспериментальной методике. Приведено описание используемого в работе магнитооптического микромагнетометра; изложена схема вакуумной системы, которая была разработана специально для осуществления поставленной задачи и позволяет проводить магнитооптические измерения образцов,

находящихся в условиях вакуума или контролируемых газовых сред. Подробно описана модуляционная методика наблюдения доменных границ на поверхности образцов. Проанализированы погрешности эксперимента.

Также во второй главе рассматриваются основные характеристики исследованных образцов – аморфных ферромагнитных лент состава $\text{Fe}_{76,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_6$. Охарактеризованы особенности термовременной обработки расплава – технологического этапа приготовления образцов, играющего определяющую роль в формировании высоких магнитомягких характеристик образцов. Приведены основные характеристики исследованных материалов, в том числе наличие одиночной 180-градусной ДГ с низким коэрцитивным полем (порядка 1 А/м) и большой шириной на поверхности (около 7 мкм). Показано, что выбранные аморфные ферромагнитные образцы и методика измерений отвечают условиям поставленной задачи.

Третья глава посвящена описанию результатов экспериментов по исследованию колебаний 180° ДГ в объеме и на поверхности образцов аморфного магнитомягкого ферромагнетика состава $\text{Fe}_{76,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_6$ в вакууме и атмосфере паров воды, метилового и гептилового спиртов при комнатной температуре. На рис. 1 представлены зависимости относительной амплитуды колебаний ДГ Δ/Δ_0 от частоты внешнего магнитного поля в условиях адсорбции молекул воды. Кривая 1 соответствует давлениям паров воды от 10^{-3} до 400 Па и характеризуется релаксационной частотой $f_r = 10$ кГц. Увеличение давления паров воды в ячейке приводит к существенному уменьшению релаксационной частоты (кривые 2 – 5), которое наблюдается в интервале давлений паров воды от 0,4 кПа до 1,3 кПа (см. рис. 2).

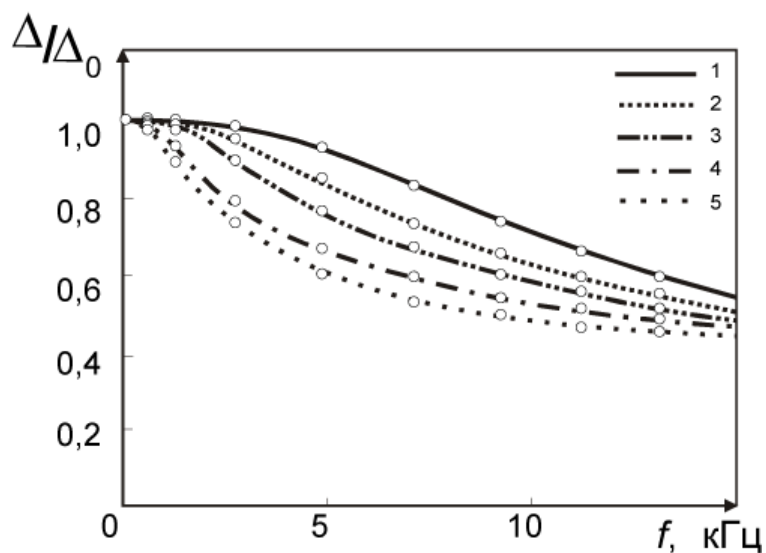


Рис. 1.

Зависимости относительной амплитуды колебаний ДГ на поверхности образцов для различных давлений паров воды: (1) 10^{-3} – 400 Па, (2) 800 Па, (3) 1000 Па, (4) 1200 Па, (5) 1900 Па.

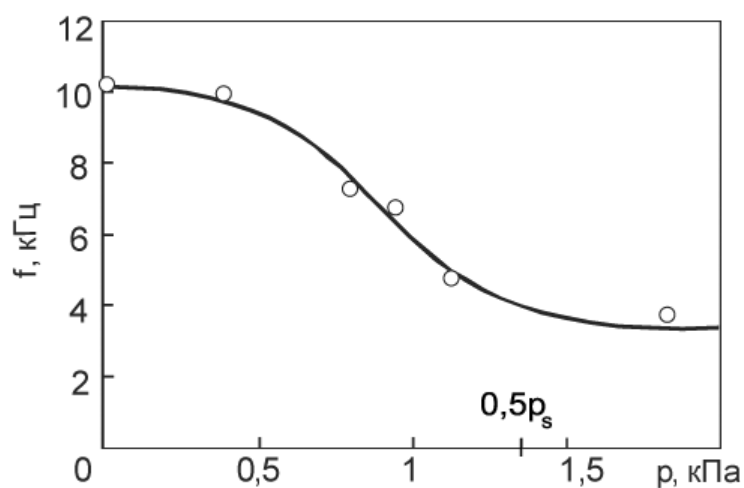


Рис. 2.

Зависимость релаксационной частоты колебаний ДГ на поверхности образцов от давления паров воды в ячейке с образцом.

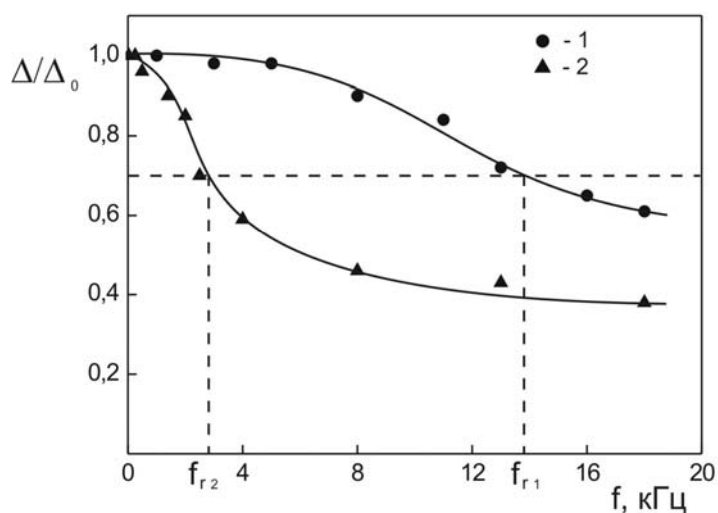


Рис. 3.

Зависимость амплитуды колебаний ДГ на поверхности образцов от частоты магнитного поля: в вакууме (1) и при адсорбции метилового спирта с давлением $p = 10$ кПа (2).

Эксперимент по изучению влияния адсорбции метилового спирта проводился аналогичным образом. Релаксационная частота доменной границы на поверхности исходного аморфного ферромагнетика в вакууме составила 13,5 кГц; напуск паров метилового спирта с давлением порядка 10 кПа привел к уменьшению релаксационной частоты до 2,6 кГц, т.е. примерно в 5 раз (см. рис. 3).

Исследование, проведенное индукционным методом, показало, что амплитуда колебаний ДГ в объеме образцов в диапазоне частот 20 Гц – 20 кГц остается постоянной и не зависит от газовой среды, в которой находится образец.

Обнаруженные эффекты полностью обратимы: вакуумирование ячейки с образцом при комнатной температуре приводит к восстановлению первоначальной зависимости $\Delta(f)$.

Помимо уменьшения релаксационной частоты колебаний ДГ на поверхности аморфных лент, с ростом давления паров воды и метилового спирта в ячейке с образцом наблюдался обратимый эффект уменьшения амплитуды колебаний ДГ при очень малой частоте внешнего магнитного поля (см. рис. 4, 5), что в нашем случае эквивалентно уменьшению статической начальной магнитной восприимчивости всего образца. Это заключение было подтверждено прямыми измерениями смещения положения доменной границы в постоянном поле под влиянием адсорбции молекул воды и метилового спирта.

Напуск паров гептилового спирта ($C_7H_{15}OH$) в ячейку с образцом при различных давлениях вплоть до давления насыщенных паров при комнатной температуре не приводил к изменению амплитуды колебаний ДГ на поверхности при частотах перемагничивающего поля в диапазоне 20 Гц – 20 кГц. Однако напуск паров метилового спирта в ячейку с

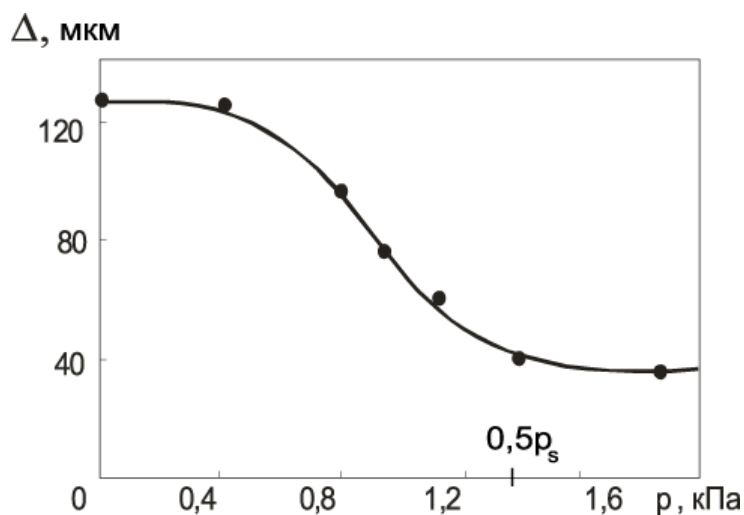


Рис. 4.

Зависимость амплитуды колебаний ДГ при частоте перемагничивания 80 Гц и амплитуде 80 А/м от давления паров воды в ячейке с образцом.

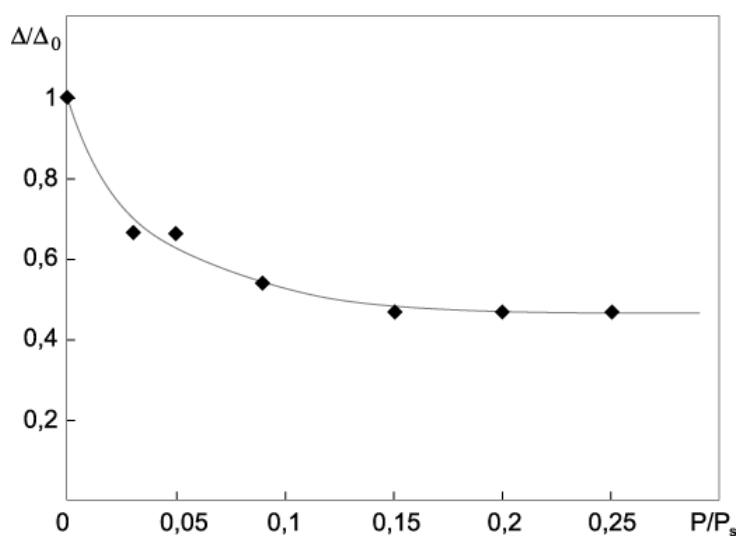


Рис. 5.

Зависимость относительной амплитуды колебаний ДГ на поверхности аморфного ферромагнетика от давления паров метилового спирта в ячейке с образцом. Амплитуда магнитного поля – 300 А/м, частота – 270 Гц.

образцом после того, как из нее был откачан гептиловый спирт, не влиял на магнитные свойства аморфного ферромагнетика.

Таким образом, оказалось, что адсорбция молекул гептилового спирта приводит к неожиданному результату: адсорбированные молекулы $C_7H_{15}OH$ сами не изменяют магнитных свойств образца, но блокируют действие на эти свойства молекул CH_3OH .

Также в третьей главе построена модель, объясняющая наблюдаемые в настоящей работе эффекты, соответствующие образованию и разрушению слабых водородных связей между адсорбированными молекулами и гидратным покрытием реальной поверхности образца. Предполагается, что на поверхности образца существуют микропоры

размером $\sim 20 \text{ \AA}$, которые при адсорбции заполняются молекулами воды или метилового спирта, образующими в них жидкую фазу. Благодаря поверхностному натяжению в микропорах возникают микродефекты. Релаксационная частота ДГ характеризует величину силы эффективного трения, действующую на движущуюся ДГ. Движущаяся ДГ взаимодействует с флуктуациями плотности микродефектов, что и вызывает уменьшение частоты релаксации ДГ. Возникающие микродефекты также вызывают возникновение поверхностной магнитной анизотропии в аморфном ферромагнетике. Если легкая ось поверхностной магнитной анизотропии ориентирована перпендикулярно поверхности, то это в свою очередь приведет к появлению нормальной составляющей намагниченности на поверхности образца, причем знаки нормальной составляющей намагниченности в доменах будут разными и, следовательно, будут иметь разные знаки эффективные магнитные заряды на поверхности. Возникающее магнитное поле рассеяния увеличит эффективную возвращающую силу, действующую на ДГ при ее смещении из положения равновесия в магнитном поле. Следовательно, статическая начальная магнитная восприимчивость образца уменьшится. Принципиально иное поведение образцов при адсорбции гептилового спирта объясняется тем, что размер его молекул в несколько раз превышает размеры молекул метилового спирта и воды, что не позволяет гептиловому спирту адсорбироваться в микропорах с образованием жидкой фазы, и не появляется механическое напряжение за счет поверхностного натяжения вогнутой поверхности жидкости. Следовательно, не возникают и поверхностные магнитные микродефекты.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в ходе выполнения настоящей диссертационной работы:

1. Проведены экспериментальные исследования колебаний 180^0 ДГ в объеме и на поверхности образцов аморфного магнитомягкого

ферромагнетика состава $\text{Fe}_{76,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_6$ в вакууме, атмосфере паров воды, а также метилового и гептилового спиртов.

2. Обнаружен эффект быстрого уменьшения амплитуды колебаний 180° ДГ в приповерхностной области аморфного ферромагнетика состава $\text{Fe}_{76,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_6$ в вакууме по сравнению с объемом при возрастании частоты перемагничивающего поля. Наблюдаемый эффект объяснен взаимодействием ДГ с макродефектами на поверхности образца и возникновением вследствие этого нестационарного хаотического движения приповерхностной части ДГ, сопровождающегося усилением торможения ДГ в приповерхностной области.
3. Обнаружено обратимое влияние слабой адсорбции, протекающей по механизму образования водородных связей, на движение 180° ДГ в приповерхностной области аморфного ферромагнетика состава $\text{Fe}_{76,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_6$: при адсорбции молекул воды и метилового спирта наблюдалось уменьшение релаксационной частоты ДГ в 2,5 и в 5 раз, соответственно.
4. Обнаружено обратимое влияние слабой адсорбции, протекающей по механизму образования водородных связей, на начальную статическую магнитную восприимчивость аморфных ферромагнитных образцов: при адсорбции молекул воды и метилового спирта она уменьшалась в 3,5 и в 2 раза, соответственно.
5. Показано, что влияние слабой адсорбции одноатомных спиртов на магнитные свойства магнитомягкого аморфного ферромагнетика существенно зависит от размера адсорбируемых молекул. Адсорбция молекул гептилового спирта, размер которых в несколько раз больше, чем размер молекулы метилового спирта, не приводит к изменению магнитных свойств ферромагнетика.

6. Для объяснения наблюдаемых эффектов предложена модель, предполагающая наличие на поверхности ферромагнетика микропор размером $\sim 20 \text{ \AA}$. Молекулы воды или метанола образуют жидкую фазу при заполнении таких пор, вследствие этого возникает поверхностное натяжение, и образуются магнитные микродефекты. Магнитные микродефекты тормозят движущуюся ДГ, что объясняет уменьшение релаксационной частоты ДГ на поверхности образцов.
7. Предложенная модель развита с целью объяснения наблюдаемого эффекта уменьшения начальной статической магнитной восприимчивости. Поверхностное натяжение в микропорах, покрывающих поверхность ферромагнетика, обуславливает возникновение механического напряжения в приповерхностном слое, которое благодаря магнитострикции приводит к появлению перпендикулярной поверхностной магнитной анизотропии. В свою очередь перпендикулярная магнитная анизотропия увеличивает возвращающую силу, действующую на ДГ, что и объясняет уменьшение магнитной восприимчивости. Размеры молекул гептилового спирта сравнимы с размерами микропор, поэтому их адсорбция не приводит к плотному заполнению микропор, и, в результате, влияние адсорбции гептилового спирта на магнитные свойства аморфного ферромагнетика отсутствует.

Публикации по теме диссертации:

1. Zubov V. E., Kudakov A. D., Tsepelev V. S., Sheftel E. N., Fedulova T. S., Zakharova A. Yu., Shmakova K. Yu. Local magneto-optical investigation of improved amorphous ribbons FeCuNbSiB // Proceedings of the Moscow International Symposium on Magnetism. 1999. P.2. p. 317-319.
2. Зубов В. Е., Кудаков А. Д., Левшин Н. Л., Федулова Т. С. Особенности перемагничивания аморфного ферромагнетика при

адсорбции молекул воды // Новые Магнитные Материалы Микроэлектроники. Сборник трудов XVII международной школы-семинара. Москва. 2000. с. 713-716.

3. Zubov V. E., Kudakov A. D., Levshin N. L., Fedulova T. S. The influence of adsorption of water molecules on magnetic susceptibility of amorphous ferromagnets // Proceedings of the 3-rd European Conference on Magnetic Sensors & Actuators. Dresden. Germany. 2000.
4. Zubov V. E., Kudakov A. D., Levshin N. L., Fedulova T. S. The influence of reversible adsorption of water molecules on the domain wall dynamics in amorphous ferromagnets // Abstracts of 19-th European Conference on Surface Science. Madrid. Spain. 2000.
5. Зубов В. Е., Кудаков А. Д., Левшин Н. Л., Федулова Т. С. Влияние термовакuumной обработки на динамику доменной границы в аморфном ферромагнетике при слабой адсорбции // «Новые Магнитные Материалы Микроэлектроники». Сборник трудов XIII международной школы-семинара. 2002. с. 246-248.
6. Зубов В. Е., Кудаков А. Д., Левшин Н. Л., Федулова Т. С.. Влияние адсорбции метилового спирта на статистическую и динамическую магнитную восприимчивость аморфного ферромагнетика // Новые Магнитные Материалы Микроэлектроники». Сборник трудов XIV международной школы-семинара. 2004. с. 203-205.
7. Зубов В. Е., Кудаков А. Д., Федулова Т. С. Аномальное поверхностное торможение доменной границы в аморфном ферромагнетике // Письма в ЖЭТФ. том 71. вып.1. 2000. с. 34-37.
8. Зубов В. Е., Кудаков А. Д., Левшин Н. Л., Федулова Т. С. Влияние слабосорбированных молекул воды на динамику доменной границы в аморфном ферромагнетике // Письма в ЖЭТФ. том 72. вып.4. 2000. с. 289-293.

9. Zubov V. E., Kudakov A. D., Levshin N.L., Fedulova T.S. The influence of adsorption of water molecules on magnetic susceptibility of amorphous ferromagnets // Sensors and Actuators. A91. 2001. p. 214-217.
10. Zubov V. E., Kudakov A. D., Levshin N. L., Fedulova T. S. The influence of reversible adsorption of water molecules on the domain wall dynamics in amorphous ferromagnets // Surface Science. V.482-485. 2001. p. 330-334.
11. Зубов В. Е., Кудаков А. Д., Левшин Н. Л., Федулова Т. С., Зайцева А. В., Цепелев В. С. Торможение доменной границы ферромагнетика дефектами, образованными в процессе слабой адсорбции молекул воды // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2002. №2. с. 52-57.
12. Зубов В. Е., Кудаков А. Д., Левшин Н. Л., Федулова Т. С. Изменение динамики доменной границы в аморфном ферромагнетике при адсорбции молекул метанола // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2004. №4. с. 49-51.
13. Зубов В. Е., Кудаков А. Д., Левшин Н. Л., Федулова Т. С. Влияние обратимой адсорбции метилового спирта на процесс перемагничивания ферромагнетика // Письма в ЖТФ. т.75. вып.1. 2005. с. 134-136.