

На правах рукописи

Звездин Алексей Анатольевич

**МИКРОМАГНЕТИЗМ И ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПЛАНАРНЫХ НАНОСТРУКТУР
И НАНОКОНТАКТОВ**

Специальность 05.27.01 Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2005

Работа выполнена на кафедре моделирования радиофизических процессов Московского государственного института радиотехники, электроники и автоматики (технического университета).

Научный руководитель: д.ф.-м.н., профессор
И.А.Лубашевский

Официальные оппоненты: д.ф.-м.н., профессор П.Н.Стеценко
к.т.н., доцент Д.Е.Балабанов

Ведущая организация: ГОСНИИ Физических проблем
им. Ф.В.Лукина

Защита состоится «__» _____ 2005 года в _____ часов на заседании диссертационного совета Д212.131.02 по адресу 119454, г. Москва, проспект Вернадского, дом 78, МИРЭА.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИРЭА.
Автореферат разослан «__» _____ 2005 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент

Вальднер В.О.

2006-4
26616

2246572

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Исследование физических свойств ферромагнитных наноструктур и наноконтактов приобрело большое значение в последнее десятилетие. Одним из перспективных объектов являются магнитные наноконтакты, наномостики и нанопроволоки. В последние годы в них был обнаружен ряд новых и не-тривиальных эффектов, которые открывают широкие возможности для их использования в радиоэлектронике. Здесь, в первую очередь, следует отметить гигантский эффект изменения магнитосопротивления наноконтактов. В 1999 году группой исследователей во главе с профессором N.García (Мадрид) было показано, что изменение значения магнитосопротивления магнитного наноконтакта может достигать нескольких сот процентов при комнатной температуре. Было обнаружено, что поведение и свойства доменных границ, геометрически запертых в ограниченном нанобъеме, оказывает определяющее влияние на резистивные свойства магнитного наноконтакта.

Изучение доменных стенок в нанобъеме является в настоящее время предметом активного исследования. Установлено, что структура и свойства такой доменной границы существенно отличаются от структуры и свойств доменных стенок типа Неелевской или Блоховской. Одним из основных отличительных свойств такой запертой в ограниченном нанобъеме доменной стенки является то, что ее толщина становится чрезвычайно малой в случае, если характерные размеры запирающей области малы (например, в случае точечного наноконтакта).

Очевидными являются трудности экспериментального изучения магнитной структуры таких нанобъектов. Что касается теории, то, несмотря на отдельные успехи в изучении этих вопросов, в целом обсуждаемая область еще далека от полного понимания природы и механизмов рассматриваемых явлений. Это связано, в частности, с тем, что для этого необходим детальный учет магнито-дипольных взаимодействий, которые в силу их локальности весьма трудоемки как для аналитической теории, так и для численного анализа.

Другими интересными объектами являются так называемые двухслойные обменно-связанные магниты. Они представляют собой композицию обменно-связанных между собой магнитомягкого и магнитожесткого слоев. Магнитомягкий слой обеспечивает высокий магнитный момент структуры, в то время как магнитожесткий (обычно редкоземельный) обеспечивает высокое значение анизотропии и коэрцитивности. Такие композитные магниты характеризуются огромными значениями энергетиче-

РОС. НАЦИОНАЛЬНАЯ
БИБЛИОТЕКА
С.Петербург 9/6
09 ЮЮ акт

ческого произведения ($(\text{ВН})_{\text{max}}$), и, таким образом, представляют большой интерес для самых разнообразных приложений.

С уменьшением размера магнитных структур все большее значение приобретает понимание детальной картины распределения намагниченности в изучаемых объектах. Новейшие магнитные микроскопы позволяют исследовать структуры намагниченности с характерной длиной до десятков нанометров и меньше. Другим мощным инструментом исследования магнитной структуры является микромагнитное моделирование, позволяющее получать детальную трехмерную статическую и динамическую информацию о структуре изучаемых объектов. Современные магнитная микроскопия и микромагнитное моделирование хорошо дополняют и усиливают друг друга, помогая, с одной стороны, правильно интерпретировать полученные экспериментальные данные и усиливая вычислительную модель с другой.

Компьютерное моделирование широко используется для разработки новых радиоэлектронных устройств и композитных структур с заданными свойствами. При рассмотрении тонких слоев (менее 5 нм) обменно-связанных магнитов, необходимых для создания радиоэлектронных приборов, для правильного предсказания полей перемагничивания необходимо использование полномасштабной трехмерной модели, основанной на численном интегрировании уравнений Ландау-Лифшица с учетом магнитодипольного взаимодействия.

В основе анализа лежат уравнения электродинамики сплошных сред для ферромагнитных наноструктур: уравнения Максвелла, решаемые в магнитостатическом приближении совместно с уравнениями Ландау-Лифшица, которые, в данном случае играют роль обобщенного уравнения состояния среды, с соответствующими граничными условиями. Получить адекватное аналитическое решение такой системы уравнений для наноструктур со сложной геометрией практически невозможно, поэтому в этой работе используется метод математического моделирования.

Таким образом, исследование свойств ферромагнитных планарных наноструктур и наноконтактов представляется актуальным как с теоретической, так и с практической точек зрения.

Цель работы и задачи исследования

Целью диссертационной работы являлось микромагнитное исследование доменной структуры в различных низкоразмерных магнитных структурах, а также исследование эффектов, связанных с магнитной конфигурацией этих объектов. А именно:

- 1 исследование магнитной структуры наноконтактов и наномостиков различной конфигурации;
- 2 исследование магнитной структуры и процесса перемагничивания обменно-связанных магнитов и выяснение роли различных структурных дефектов в процессе перемагничивания;
3. анализ возможностей использования исследуемых структур для создания новых электронных приборов.

Научная новизна

1. Впервые проведен полномасштабный анализ магнитных конфигураций, возникающих в пленочном наноконтакте. Разработан численный метод анализа магнитной структуры симметричных и асимметричных магнитных наноконтактов в зависимости от физических и геометрических параметров.
2. Установлено новое физическое свойство магнитных наноконтактов, заключающееся в том, что доменная граница типа «head-to-head», которая согласно требованиям симметрии должна всегда находиться в центре наномостика, при определенных условиях спонтанно выходит из центра. Другими словами, обнаружен фазовый переход магнитной структуры из симметричного в асимметричное состояние. Определены пути практического использования обнаруженного физического эффекта, один из которых защищен патентом РФ.
3. Определены фазовые диаграммы тонкопленочных пермалловых ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$) наноконтактов, являющиеся основой для проектирования магнитных наноструктур с заданными техническими характеристиками.
4. Разработан новый численный метод микромагнитного анализа двухслойных обменно-связанных магнитных материалов, учитывающий роль различных структурных дефектов в процессе перемагничивания. Впервые проведено исследование зарождения доменной структуры в гранулированном монослое SmCo_5 . Предложен новый метод микромагнитного исследования таких структур, основанный на комбинации микромагнитного и статистического подходов. Метод проиллюстрирован на примере двухслойного элемента SmCo_5/Fe .
5. Предложены и проанализированы новые конструкции сенсора магнитного поля, выполненного на основе магнитного наноконтакта (Патент РФ №2210086). Прибор состоит из одного магнитного слоя, что позволит существенно упростить технологию изготовления. В отличие от традиционных многослойных сенсоров, в нем необходимо перемагничивать только область перемычки, объем которой, в зависимости от геометрии прибора, составляет порядка 1-5% от объема магнитной пленки прибора.

6. Предложены новые конструкции магнитного биосенсора, позволяющего получать и перерабатывать экспресс-информацию о биохимическом составе тех или иных объектов. Существенным преимуществом такого прибора, особенно для применения в биосенсорных устройствах, является то, что он состоит из одного магнитного слоя, что определяет простоту и невысокую стоимость его изготовления. Такой прибор компактен, обладает высокой чувствительностью и имеет малое энергопотребление.

Практическая значимость

Результаты работы могут быть использованы для исследования электродинамических свойств ферромагнитных материалов и наноструктур, а также для создания новых спинтронных приборов. Впервые спроектированы и проанализированы новые конструкции датчика магнитного поля, выполненного на основе магнитного наноконтакта (Патент РФ №2210086), а также предложено устройство нового магнитного биосенсора, использующего такие датчики. Разработана новая методика компьютерного проектирования новых композитных обменно-связанных магнитных материалов с заданными свойствами. Результаты исследования внедрены в учебном процессе МИРЭА.

Положения, выносимые на защиту

1. При изменении определенных параметров магнитного наноконтакта (константа анизотропии, длина перешейка и др.) происходит спонтанное изменение симметрии его магнитной структуры, что сопровождается изменением магнитосопротивления.
2. Фазовые диаграммы тонкопленочных пермалоевых ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$) наноконтактов, являющиеся основой для проектирования магнитных наноструктур с заданными техническими характеристиками.
3. Существование двух вариантов выхода доменной границы из центра наноконтакта (непрерывного и дискретного). Обнаружена бистабильность магнитной структуры наноконтакта. Показано, что на фазовой диаграмме металлических и полупроводниковых наноконтактов существует трикритическая точка. Эта точка разделяет линии, на которых доменная граница выходит из центра структуры непрерывно (фазовый переход 2-ого рода) или дискретно (фазовый переход 1-ого рода).
4. Метод компьютерного моделирования и численного расчета свойств новых магнитных материалов, представляющих собой двухслойные обменно-связанные пленки из гранулированных магнитотвердых и магнитомягких материалов, обладающих высокими значениями магнитного произведения $(\text{ВН})_{\text{max}} \sim 2-8 \text{ МДж/м}^3$, превышающими соответствующие величини

ны наилучших в настоящее время магнитотвердых материалов SmCo_5 , NdFe_{14}B , у которых $(\text{BH})_{\text{max}}$ не превышает 5 МДж/м^3 .

5. Влияние структурных дефектов гранулированного магнитотвердого слоя обменно-связанных наноструктур (обменных магнитных спиралей) на их процесс перемагничивания и петлю гистерезиса.

Апробация работы

Результаты работы докладывались на Международной конференции по магнетизму в Риме (International Conference on Magnetism - ICM 2003), на международном семинаре по наномагнетизму в Гаване (International Workshop on Nanomagnetism, Havana, November 15-19, 2004), на Московском международном симпозиуме по магнетизму (MISM 2005, Moscow, June 25-30, 2005), на 5-ом международном симпозиуме «Гистерезис и микромагнитное моделирование» (5th International Symposium on Hysteresis and Micromagnetic Modeling, HMM-2005, Budapest, 30 May – 1 June 2005), на научных семинарах в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, Институте общей физики Российской академии наук имени А.М. Прохорова.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 8 печатных работ, в том числе 4 статьи и 3 тезиса докладов, получен 1 Патент РФ.

Объем и структура работы

Работа состоит из введения, 5-ти глав, заключения, списка литературы из 144 наименований. Объем диссертации составляет 121 страниц, включая 85 страниц машинописного текста, 12 страниц списка литературы, 24-ти рисунков.

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 первой части главы кратко представлена история, современное состояние и перспективы развития тех направлений радиоэлектроники, которые имеют отношения к теме диссертации. Развитие технологии в последнее время позволило создавать ультратонкие пленки с практически совершенной кристаллической структурой и конструировать на их основе принципиаль-

но новые магнитные материалы: магнитные мультислойные структуры и сверхрешетки. Открытие эффекта гигантского магнитосопротивления в таких системах дало мощный импульс работам по физике магнитных наноструктур. Достигнутый на данный момент прогресс в создании низкоразмерных магнитных структур делает реальным их использование в областях, для которых традиционно применяется полупроводниковая радиоэлектроника. Это связано с тем, что полупроводниковая радиоэлектроника уже вплотную приближается к своим физическим пределам, в частности, по рассеиваемой мощности. Ожидается, что при благоприятных условиях использование магнитных наноструктур позволит продвигнуться по пути дальнейшего повышения плотности записи и быстродействия элементной базы микроэлектроники.

Следующий раздел главы посвящен магнитным наноконтактам и нанопроволокам, а также физическим вопросам, связанным с баллистическим транспортом электронов через узкие металлические и полупроводниковые каналы; показаны экспериментальные результаты для Ni наноконтакта, в котором было обнаружено, что магниторезистивность узкого наноконтакта обычно ниже, чем широкого.

Далее рассматривается магнитная структура наноконтакта. Несмотря на активное экспериментальное и теоретическое исследование транспортных свойств наноконтакта, его магнитная структура до настоящего времени изучена слабо. При анализе экспериментальных данных обычно предполагалось, что намагниченности в ферромагнитных стержнях однородны и направлены строго антипараллельно друг другу. До настоящего времени не исследованы форма и положение доменной границы в зависимости от магнитных и геометрических параметров системы. Все эти факторы могут оказать большое влияние на магнитосопротивление наноконтакта. Для исследования этих свойств наноконтакта весьма эффективным методом является микромагнитное моделирование.

В заключительной части главы даны основы микромагнетизма - феноменологической теории, предназначенной для расчета структуры намагниченности в малых ферромагнитных структурах при заданных граничных условиях, основы которой были впервые изложены в монографии В.Брауна.

Во второй главе описан оригинальный алгоритм, использованный для компьютерного моделирования, результаты которого представлены в настоящей работе. Проведен краткий обзор численных методов, используемых при решении микромагнитной задачи.

В теории микромагнетизма обычно выделяется два аспекта обсуждаемой проблемы. Первый связан с анализом статических и квазистатических распределений намагниченности в области обратимого их изменения

во внешнем поле. Второй аспект связан с изучением динамики и механизмов переключения и необратимого изменения состояний в области критических значений магнитного поля.

Для моделирования квазистатики и динамики процессов переключения обычно используется численное решение уравнений Ландау-Лифшица. Процесс намагничивания описывается уравнением Ландау-Лифшица:

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = \gamma [\mathbf{M} \times \mathbf{H}^{\text{eff}}] - \frac{\alpha \gamma}{M} [\mathbf{M} \times [\mathbf{M} \times \mathbf{H}^{\text{eff}}]] \quad (1)$$

где $\mathbf{M} = \mathbf{M}(x, y)$ вектор намагниченности; M , γ и α намагниченность насыщения, гиромангнитное отношение и константа диссипации, соответственно; \mathbf{H}^{eff} - эффективное поле, представляющее собой сумму полей различных магнитных взаимодействий:

$$\mathbf{H}^{\text{eff}} = \mathbf{H}^{\text{ext}} + \mathbf{H}^{\text{m}} + \mathbf{H}^{\text{anis}} + \mathbf{H}^{\text{exch-in-layer}}, \quad (2)$$

где \mathbf{H}^{ext} внешнее магнитное поле; \mathbf{H}^{m} магнитостатическое поле, определяемое формулой:

$$\mathbf{H}^{\text{m}}(\mathbf{r}) = \int_{G_l} \text{div} \mathbf{M}(\mathbf{r}_1) \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}_1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_1|^3} d\mathbf{r}_1, \quad (3)$$

где \mathbf{r}_1 радиус-вектор, G_l рассматриваемая область (поверхностные магнитные заряды также учтены обычным образом); \mathbf{H}^{anis} поле одноосной анизотропии

$$\mathbf{H}^{\text{anis}} = \frac{2K}{M^2} (\mathbf{M}, \mathbf{n}) \mathbf{n}, \quad (4)$$

где K и \mathbf{n} соответственно константа анизотропии и единичный вектор, направленный вдоль легкой оси; $\mathbf{H}^{\text{exch-in-layer}}$ - поле внутрислойного обмена:

$$\mathbf{H}^{\text{exch-in-layer}} = \frac{2A}{M^2} \Delta \mathbf{M}, \quad (5)$$

где A - внутрислойная обменная константа, Δ - двумерный оператор Лапласа.

Использованы следующие граничные условия

$$\left. \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial \mathbf{n}} \right|_{\partial G} = 0, \quad (6)$$

где \mathbf{n} - вектор, нормальный к границе ∂G области G .

Различают явную и неявную схемы решения уравнений магнитодинамики. В работе представлено сравнение достоинств и недостатков этих схем при решении различных микромагнитных задач.

В третьей главе описываются результаты исследования перемагничивания двухслойных обменно-связанных магнитов и влияние структурных дефектов на процесс перемагничивания. Такие магниты представляют

собой композицию обменно-связанных между собой магнитомягкого и магнитожесткого слоев. Магнитомягкий слой обеспечивает высокий магнитный момент структуры, в то время как магнитожесткий слой обеспечивает высокое значение анизотропии и коэрцитивности. Такие композитные магниты характеризуются огромными значениями энергетического произведения ($(BH)_{\max}$), и, таким образом, представляют большой интерес для самых разнообразных приложений.

Компьютерное моделирование является мощным методом для изучения свойств таких материалов и разработки новых композитных структур с заданными свойствами. При рассмотрении тонких слоев (менее 5 нм) обменно-связанных магнитов, необходимых для создания спинтронных приборов, правильное предсказание полей перемагничивания возможно только при использовании полномасштабной трехмерной модели, основанной на численном интегрировании уравнений Ландау-Лифшица с полным учетом магнитодипольного взаимодействия. Расчеты таких структур, однако, требуют очень больших ресурсов компьютера и высоко оптимизированного компьютерного кода. Была предложена вычислительная методика, которая помогает преодолеть эти трудности. При помощи построенной модели удалось адекватно промоделировать процессы перемагничивания в пленках $SmCo_5$. Исследование проведено для случая ультратонких слоев. Показано, что значение поля перемагничивания субмикронного образца конечных размеров со случайным распределением структурных дефектов сильно зависит от конкретной картины их распределения.

Здесь необходимо отметить, что результаты, полученные с помощью полномасштабного микромагнитного моделирования, не отличаются существенным образом от результатов, полученных из одномерной модели только до тех пор, пока микромагнитная модель не учитывает гранулированность структуры пленок $SmCo_5$. Для того, чтобы корректно задать структуру дефектов, необходимо рассматривать достаточно большой объем материала. Гигантские значения анизотропии приводят к необходимости использования малого шага интегрирования уравнения Ландау-Лифшица. Вместе с малым размером вычислительной ячейки это приводит к тому, что задача становится чрезвычайно сложной и ресурсоемкой с вычислительной точки зрения.

Для преодоления этих трудностей, использовано следующее приближение. Основная идея заключалась в том, что моделирование проведено на некотором характерном участке композитной пленки. Изначально на пленке выделялась область с таким характерным распределением дефектов, которое приводит к зарождению доменной структуры. После этого определяли критические параметры перемагничивания этой области, которые с хорошей точностью совпадали с характеристиками перемагничива-

ния всей структуры. Это утверждение основывается на том факте, что в монослое $SmCo_5$ всегда существует критический зародыш доменной структуры, на котором впоследствии зарождается расширяющийся цилиндрический домен, который и перемагничивает весь объем материала.

Было проведено микромагнитное исследование прямоугольных нанокристаллических пленок $SmCo_5$. Гранулированная структура в пленках различных форм и размеров (от $50 \times 50 \text{ нм}^2$ до $1 \times 1 \text{ мкм}^2$) и распределение размеров гранул (средний размер варьировался от 8 нм до 55 нм) формировались случайным образом. В исследовании варьировался параметр отклонения легкой оси в грануле от среднего направления, остальные параметры были постоянны. Показано, что варьирование константы одноосной анизотропии или намагниченности влияет на процесс перемагничивания аналогично тому, как это делает параметр отклонения легкой оси намагниченности.

При приложении внешнего поля к образцу, изначально намагниченному в направлении, противоположном полю, намагниченности в гранулах начинали вращаться в противоположных направлениях. Гранулы, в которых намагниченность заметно отклонялась от среднего направления по образцу (на угол в несколько десятков градусов), являлись зародышами доменной структуры. Значение внешнего магнитного поля $H_{\text{нкл}}$, при котором на зародышах формировались доменные стенки, сильно зависит от особенности структуры гранул. При некотором критическом поле начинался процесс перемагничивания путем движения доменных стенок, которые формировали расширяющиеся цилиндрические области перемагничивания.

В четвертой главе представлены результаты исследования магнитной структуры и магнитных превращений пленочного магнитного наноконтакта с различными геометрическими конфигурациями. Магнитный наноконтакт представляет собой однослойную магнитопленочную структуру толщиной a , состоящую из двух широких площадок, соединенных узким каналом размером $L \times b$ (рис.1). Параметры материала: намагниченность насыщения $M=800 \text{ Гс}$ и обменная энергия $A=10^{-6} \text{ эрг/см}$. Константа одноосной анизотропии и длина наноконтакта варьировались.

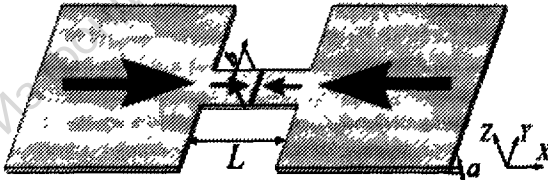


Рис.1 Плоский магнитный наноконтакт с противоположно намагниченными берегами (на рисунке нанесены обозначения, используемые в тексте)

Предполагается, что над ферромагнитными электродами (берегами) расположены токовые шины, по которым подаются встречные импульсы

тока, индуцирующие магнитные поля, необходимые для намагничивания берегов по типу «голова-к-голове» (“head-to-head”).

Используемая наноструктура (рис.1) обладает симметрией относительно центра наноконтакта, поэтому следует ожидать, что граница между встречно-намагниченными берегами локализуется в центре, и это действительно достигается в результате действия начальных импульсов тока. Была исследована стабильность такой магнитной конфигурации после отключения тока. При этом было обнаружено, что доменная граница выходит из центра наноконтакта. Спонтанное нарушение положения доменной границы может быть непрерывным или дискретным в зависимости от параметров наноконтакта, прежде всего, например, от отношения его ширины и длины.

Описанное явление спонтанного нарушения симметрии положения доменной границы внутри шейки канала наноконтакта имеет очевидную аналогию с фазовым переходом. Тип перехода зависит от длины канала, что хорошо видно из графиков отклонения центра локализации границы от середины канала в зависимости от величины энергии анизотропии, показанной на рис.2.

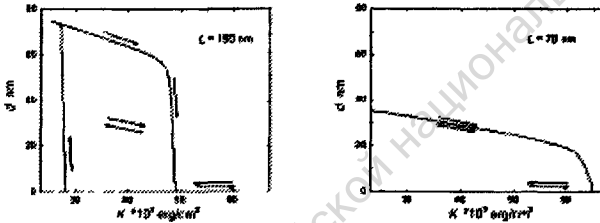


Рис.2 Зависимость величины смещения доменной границы из центра перемычки от константы анизотропии для двух длин перемычки

В случае короткой перемычки смещение непрерывно меняется с понижением константы анизотропии ниже критической величины (пунктирная кривая), а в длинной перемычке возникает гистерезисная зависимость, как при переходе первого рода (сплошные кривые на рис.2).

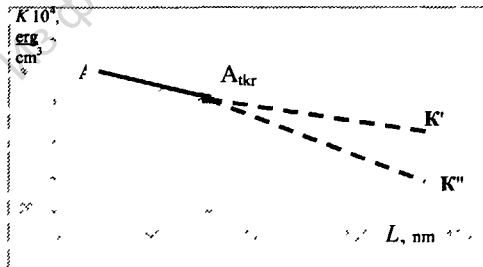


Рис.3 Фазовая диаграмма магнитного наномостика

На рис.3 представлена фазовая диаграмма, определяющая области существования этих типов выхода доменной границы из центра наноконтакта в зависимости от соотношения величины анизотропии и длины доменной стенки. На фазовой диаграмме показана характерная трикритическая точка A_{dkr} , отделяющая область параметров, при которых доменная граница непрерывно выходит из центра наноконтакта, от области с гистерезисным выходом доменной границы. В теории фазовых переходов ее называют трикритической точкой. Линия $A_1 A_{dkr}$ соответствует непрерывному переходу, линии $A_{dkr} K'$ и $A_{dkr} K''$ – линии потери устойчивости метастабильных фаз (линии лабильности). Линии перехода 1-го рода проходит между ними и может при необходимости быть определена из гистерезисных кривых по правилу Максвелла. Поскольку константа магнитной анизотропии зависит от температуры, то рассмотренные магнитные превращения в плоскости L-K и соответствующая фазовая диаграмма могут быть отображены на плоскость L-T, где T-температура.

Также как и симметричный наноконтакт, асимметричный наноконтакт представляет собой однослойный элемент с толщиной пленки 1-10нм. Исследование асимметричных наноконтактов представляется важным, поскольку такие наноконтакты обычно реализуются в экспериментальных ситуациях. Рассмотрим характер магнитной структуры в зависимости от геометрии наноконтакта, например, от «берегов наноконтакта», оставляя другие параметры неизменными. В асимметричных структурах можно видеть следующие магнитные конфигурации (фазы):

- доменная граница находится в центре наноконтакта,
- доменная граница находится в «правом берегу»,
- доменная граница находится в «левом берегу» наноконтакта.

Хотя существование фазы, когда доменная граница находится строго в центре наноконтакта, не следует из симметрии, в расчетах с достаточно большой точностью было доказано, что такая фаза существует, когда константа односторонней анизотропии K больше критического значения K_c , независимо от размеров берегов. При уменьшении этого значения доменная граница спонтанно выходит из центра влево или вправо в зависимости от размеров берегов.

Интересным свойством асимметричного наноконтакта является обнаруженный в данном исследовании переход доменной границы между «берегами» наноструктуры. Такой переход происходит спонтанно при изменении внешних параметров: константы одноосной анизотропии (или температуры), форм-фактора структуры, намагниченности. Рассматриваемый переход может быть индуцирован внешним магнитным полем и, следовательно, представляет интерес также и с практической точки зрения.

В пятой главе предложены и проанализированы новые спинтронные

приборы, выполненные на основе магнитного наноконтакта.

В течение последних 10 лет увеличение плотности информации на магнитных носителях составляло 60% в год.

Для считывания информации высокой плотности необходимо использовать считывающие элементы высокой чувствительности. Современные миниатюрные магниторезистивные считывающие сенсоры как правило изготавливаются на основе трехслойных пленочных элементов. Принцип считывания основан на эффекте гигантского магнитосопротивления.

Компьютерное моделирование позволило провести анализ работы магниторезистивных сенсоров в большой области магнитных и геометрических параметров.

Было предложено использовать наноконтакт, изображенный на рис.1, в качестве сенсора магнитного поля. В качестве ферромагнитного материала могут использоваться магнитные материалы Fe, Co, Ni, сплавы на их основе, редкие земли и сплавы на их основе, а также сплавы редкоземельных металлов и металлов группы Fe (Fe, Ni, Co, Mn и другие). Также могут быть использованы магнитные полупроводники, например Ga(Mn)As. Область контакта может быть прямоугольной формы (как показано на рис.1), а также может быть переменной ширины и/или толщины. Магниточувствительный элемент работает следующим образом. Внешнее магнитное поле, приложенное к наноконтакту, выводит доменную границу из центра контакта (рис.2), что ведет к уменьшению магнитосопротивления.

Во второй части главы предложены новые конструкции магнитного биосенсора, выполненного на основе магнитного наноконтакта. Биосенсоры представляют собой биомолекулярные приборы, служащие для определения наличия или концентрации биологических или химических молекул, биологических структур, микроорганизмов и т.п. Это аналитические устройства, использующие биологические молекулы для узнавания (рецепции) разнообразных веществ (аналитов) биологического или небиологического происхождения. Распознающий элемент биосенсора - рецептор, иммобилизованный на подходящем твердом носителе, находится в прямом пространственном контакте с системой преобразования сигнала, возникающего в рецепторе при его биохимическом взаимодействии с аналитом. Возникший при этом сигнал преобразуется трансдьюсером в регистрируемый ответ – оптический, электрохимический, магнитный и другие. Биосенсоры объединяют селективные возможности биологии с технологическим аппаратом современной микроэлектроники, оптоэлектроники и нанотехнологии, создавая, таким образом, мощные и весьма компактные аналитические устройства для медицины и биологии, для анализа лекарственных препаратов, качества окружающей среды и продуктов питания, для сель-

ского хозяйства и ветеринарии, для борьбы с биотерроризмом и многого другого.

Любой биосенсор состоит из двух принципиальных функциональных подсистем. Первая - биорецепторная, т.е. селективирующая подсистема, использующая различные биологические структуры, обладающие высоким сродством и избирательностью к соответствующим биологическим молекулам (лигандам). Вторая – трансдьюсерная подсистема, которая преобразует биологический сигнал в физический (электрический оптический, магнитный и т.д.). Для обработки информации применяют разнообразные микроэлектронные системы, интегрированные с сенсорными на одном и том же чипе. Биосенсоры подразделяются по типу биоселективирующих подсистем и типу трансдьюсеров. Их комбинирование между собой создает большое разнообразие различных типов биосенсоров. В работе описываются магнитные биосенсоры, в которых в качестве трансдьюсера используются датчики магнитного поля, а биоселективирующая подсистема использует в качестве маркеров магнитные нано- или микрочастицы. Принцип действия магнитного биосенсора основан на детектировании и подсчете микроскопических парамагнитных частиц, химически связанных с антигеном (аналиту), содержание которого требуется определить (рис.4)

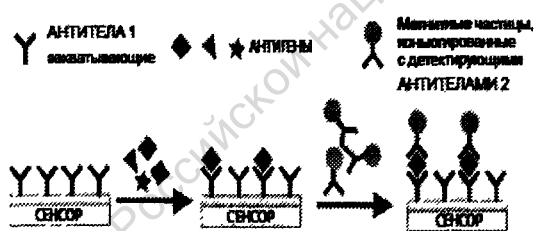


Рис.4. Принцип действия магнитного биосенсора

Система в целом состоит из находящегося в растворе определяемого антигена (так называемого аналита), и двух специфических антител, независимо друг от друга взаимодействующих с двумя активными центрами аналита. Первые антитела, так называемые “захватывающие” или рецептирующие антитела, иммобилизованы на поверхности магнитного сенсора. Вторые антитела, так называемые детектирующие антитела, конъюгированы с поверхностью магнитных наночастиц. Когда исследуемая жидкость, в которой предположительно находится аналит, контактирует с первыми - «захватывающими» антителами, антиген оказывается иммобилизованным на поверхности магнитного детектора. При добавлении в систему рас-

твора, содержащего магнитные наночастицы со вторыми - детектирующими антителами, они в свою очередь связываются с антигеном. Это приводит к осаждению магнитных частиц на поверхности магнитного датчика, что им и регистрируется. Широкое применение магнитных биосенсоров для биологической и медицинской диагностики сдерживалось тем, что до недавнего времени не было магнитных датчиков, которые бы обладали высокой чувствительностью при малом геометрическом размере, малой потребляемой мощностью и невысокой стоимости.

Важным достоинством датчиков магнитного поля, разработанных на основе эффекта гигантского магнитного сопротивления и обладающих высокой чувствительностью к магнитному полю, является то, что они могут производиться методами интегральной микроэлектронной техники и совместимы со стандартной кремниевой технологией. Это значит, что становится возможным на одном чипе интегрировать и систему магнитных сенсоров, и электронику, необходимую для обработки считываемых сигналов. При этом предполагается, что на одном чипе смонтированы разнообразные рецептирующие биосенсоры к различным анализам.

В качестве датчика магнитного поля предлагается использовать пленочные наномостики. Физические параметры материала: намагниченность насыщения (M_s), константа анизотропии (K), обменная жесткость (A) и геометрия выбираются так, чтобы с одной стороны, реализовать состояние прибора с одним положением равновесия доменной границы (в данном случае в центре контакта), а с другой - обеспечить его максимальную восприимчивость.

Основные результаты и выводы

1. Разработан численный метод анализа магнитной структуры симметричных и асимметричных магнитных наноконтактов, наномостиков и обменно-связанных наноструктур (обменные магнитные спирали), в котором для решения ресурсоемких уравнений Ландау-Лифшица с полномасштабным учетом магнитодипольных взаимодействий достигнуто значительное ускорение длительности расчета за счет использования операции быстрого преобразования Фурье.

2. Проведен микромагнитный анализ магнитной структуры и магнитных превращений симметричного наноконтакта. Обнаружен и детально исследован новый физический эффект. Суть этого эффекта заключается в том, что в симметричном магнитном наноконтакте доменная граница типа «head-to-head» находящаяся согласно требованию симметрии в центре структуры спонтанно выходит из центра наноконтакта, когда константа одноосной магнитной анизотропии или длина перемычки достигает некоторого критического значения. Переход из симметричного состояния (до-

менная граница в центре) в асимметричное может быть непрерывным (фазовый переход 2 рода) или дискретным (фазовый переход 1 рода) в зависимости от геометрических и физических параметров наноконтакта (форм-фактор, константа анизотропии, намагниченность насыщения).

3. Впервые построена фазовая диаграмма наноконтакта в переменных координатах: длина наноконтакта – константа анизотропии, разделяющая симметричную и асимметричную магнитные конфигурации системы. Характерной чертой фазовой диаграммы является наличие на ней трикритической точки, разделяющей на линии фазового перехода области непрерывного и дискретного перехода. В пермаллое ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$) при $M_s=800$ Гс, $A=1.25 \cdot 10^{-6}$ Эрг/см обнаружено, что $L=100$ нм и $K=58 \cdot 10^3$ Эрг/см³.

4. Впервые исследован асимметричный нанокontakt. Важной характеристикой асимметричного наноконтакта является наличие в нем спонтанного перехода доменной границы между «берегами» наноструктуры. Такой переход происходит при изменении внешних параметров: константы одноосной анизотропии (или температуры), форм-фактора структуры, намагниченности. Рассматриваемый переход может быть индуцирован внешним магнитным полем и поэтому может быть использован для создания высокочувствительных спинтронных сенсорных элементов.

5. Предложены и проанализированы новые конструкции сенсора магнитного поля, выполненного на основе магнитного наноконтакта (Патент РФ №210086). Прибор состоит из одного магнитного слоя, что позволит существенно упростить технологию изготовления. В отличие от традиционных многослойных сенсоров в нем необходимо перемагничивать только область переключки, объем которой, в зависимости от геометрии прибора, составляет порядка 1-5% от объема магнитной пленки прибора.

6. Предложены новые конструкции магнитного биосенсора, позволяющего получать и перерабатывать экспресс-информацию о биохимическом составе тех или иных объектов. Существенным преимуществом такого прибора, особенно для применения в биосенсорных устройствах, является то, что он состоит из одного магнитного слоя, что определяет простоту и невысокую стоимость его изготовления. Такой прибор компактен, обладает высокой чувствительностью и имеет малое энергопотребление.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 8 работ:

1. А.А.Звездин, К.А. Звездин. Спонтанные превращения магнитной структуры пленочного наноконтакта // Письма в ЖЭТФ. т.75. №10, 2002.-с.613-616.

2. А.К. Звездин, К.А. Звездин, А.А. Звездин, С.А. Звездин, П. Д. Перло. Магниторезистивный элемент, Патент РФ № №2210086 от 10.08.2003 г.
3. А.А. Звездин, К.А. Звездин. Наномагнитные биосенсоры, основанные на эффекте гигантского магнитосопротивления // Нанотехника. №.2. 2005.-с. 69-71.
4. A.V. Khvalkovskii, A.A. Zvezdin, K.A. Zvezdin. Frequency response of magnetic planar nanobridges // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. v. 294. Issue 2. 2005.-p. 13-15.
5. V. Khvalkovskii, A. A. Zvezdin, K. A. Zvezdin, D. Pullini and P. Perlo. Spin-accumulation effect in magnetic nano-bridge // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. v. 272-276. Supplement 1. 2004.-p. 1517-1518.
6. A.V. Khvalkovskii, A.A. Zvezdin, K.A. Zvezdin, D.G. Skachkov, V.S. Gornakov, P. Perlo. Micromagnetic investigation of domain wall nucleation in $SmCo_5$ films as a technique of simulation of $SmCo_5/Fe$ exchange-coupled magnets // Books of Abstracts of Moscow international symposium on Magnetism, June 25-30, 2005.-p. 435-435.
7. A.V. Khvalkovskii, A.A. Zvezdin, K.A. Zvezdin, V.S. Gornakov, V.I. Nikitenko, B. Martorana, P. Perlo, D. Pullini, Micromagnetic Simulation of the Reversal Process in Exchange-Coupled Supermagnets // Proceedings of the 18th International Workshop on High-Performance Magnets and Their Applications, France. 2004.-p.493-498.
8. A V.Khvalkovskii, A.A. Zvezdin, K.A. Zvezdin, P. Perlo, D. Pullini Magnetic nanobridges based on magnetic semiconductors // Books of Abstracts of Moscow international symposium on Magnetism, June 25-30, 2005.-p. 226-226.

Подписано в печать 08.11.2005. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л.0,93. Усл. кр.-отт. 3,72. Уч.-изд. л. 1,0.

Тираж 100 экз. Заказ 820

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
“Московский государственный институт радиотехники,
электроники и автоматики (технический университет)”
119454, Москва, пр. Вернадского, 78

№ 24393

РНБ Русский фонд

2006-4

26616

Из фондов Российской национальной библиотеки