

0-789727

На правах рукописи



Балымов Константин Геннадьевич

**МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА АМОРФНЫХ ПЛЁНОК Gd-Co,  
Tb-Co И МНОГОСЛОЙНЫХ ОБМЕННОСВЯЗАННЫХ  
ПЛЁНОЧНЫХ СТРУКТУР НА ИХ ОСНОВЕ**

01.04.11 – Физика магнитных явлений

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург 2011

Работа выполнена на кафедре магнетизма и магнитных наноматериалов и в отделе магнетизма твердых тел НИИ физики и прикладной математики ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор  
**Васьковский Владимир Олегович**

Официальные  
оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор  
**Медведев Михаил Владимирович**

доктор физико-математических наук,  
заведующий лабораторией  
**Носов Александр Павлович**

Ведущая организация: **Институт физики им. Л.В.  
Киренского СО РАН, г. Красноярск**

Защита состоится 13 октября 2011 года в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.286.01 по защите докторских и кандидатских диссертаций при ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина» по адресу: 620000, г. Екатеринбург, пр. Ленина, д. 51, комн. 248.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина».

Автореферат разослан 12 сентября 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук,  
директор НИИ физики и прикладной  
математики УрФУ



НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000687430

Н.В. Кудреватых

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Магнитные пленки более полувека являются объектами интенсивных научных и технических исследований. В последнее время интерес к ним особенно возрос в связи с обнаружением ряда новых физических явлений, к которым, в частности, относятся гигантский магниторезистивный эффект, гигантский магнитный импеданс, гигантский эффект Холла, а также благодаря широкому внедрению плёночных материалов в магнитную сенсорикку. Причём преимущество отдаётся исследованию гетерогенных плёночных структур, которым и свойственен ряд из вышеперечисленных явлений.

Важной разновидностью гетерогенных структур являются слоистые плёнки и, в частности, плёнки, содержащие слои редкоземельных и переходных 3d-металлов. Они обладают уникальной способностью к образованию ферромагнитных структур и позволяют варьировать их свойства в широких пределах. В том числе в многослойных плёнках удаётся существенно снижать некоторые обменные параметры при сохранении высокой температуры магнитного упорядочения системы в целом. Это делает данные объекты удобными для эффективного моделирования при исследовании спонтанных и индуцированных магнитных фазовых переходов, а также позволяет формировать магнитоупорядоченные объекты, не встречающиеся в естественном состоянии.

Значительный интерес при исследовании многослойных плёнок вызывает явление так называемой однонаправленной анизотропии. Оно, в частности, позволяет реализовать в функциональных магнитных средах состояние внутреннего магнитного смещения, которое необходимо во многих практических приложениях. К числу плёночных структур, в которых наблюдается однонаправленная анизотропия, относятся слоистые пленки типа ферромагнетик/ферромагнетик. В них функцию магнитного смещения выполняет магнитотвердый ферромагнитный слой, обладающий повышенной температурой магнитного упорядочения по сравнению с антиферромагнитными слоями, а в качестве элемента, проявляющего однонаправленную анизотропию, обычно выступает слой пермаллоя. В ферромагнетиках магнитотвердое состояние, как правило, связано с наличием магнитной компенсации, которая относительно просто

реализуется в аморфных сплавах кобальта с тяжелыми редкоземельными элементами. Указанные известные положения, тем не менее, носят довольно общий характер. Конкретная реализация магнитного смещения в связи с другими функциональными свойствами требует систематического исследования подобных плёнок.

**Цель работы:** установить закономерности формирования, механизмы и способы целенаправленного варьирования магнитной анизотропии и гистерезисных свойств в однослойных и многослойных обменносвязанных плёнках, содержащих аморфные слои типа R-Co ( $R = \text{Gd}, \text{Tb}$ ).

В рамках указанной цели в работе были поставлены следующие конкретные задачи:

1) количественно описать и выявить возможные источники магнитной анизотропии в аморфных плёнках, содержащих кобальт и редкоземельные элементы с резко отличающимися конфигурациями электронных оболочек;

2) установить и дать феноменологическое описание особенностей магнитных свойств многослойных плёнок Gd-Co/Co с псевдоферритмагнитной структурой;

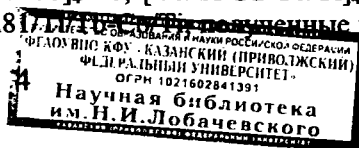
3) исследовать влияние температуры на однонаправленную анизотропию и гистерезисные свойства слоёв пермаллоя в составе двухслойных плёнок Tb-Co/Fe<sub>19</sub>Ni<sub>81</sub>;

4) выполнить оптимизацию поля однонаправленной анизотропии, гистерезисных свойств и анизотропии магнитосопротивления плёнок Tb-Co/Fe<sub>19</sub>Ni<sub>81</sub>, рассматривая их как потенциальную магниторезистивную среду с внутренним магнитным смещением;

5) провести испытания разработанной магниторезистивной среды в составе магнитных сенсоров с внутренним магнитным смещением.

#### **Объекты исследования**

В работе исследованы слоистые плёночные структуры с варьируемым составом, структурным состоянием и толщиной слоёв: Cu/Gd-Co/Cu, Ti/Gd-Co/Ti, [Co/Gd-Co]<sub>n</sub>/Co, [Co/Ti/Gd-Co/Ti]<sub>n</sub>/Co, Tb-Co/Ti, Fe<sub>19</sub>Ni<sub>81</sub>/Tb-Co/Ti, Fe<sub>19</sub>Ni<sub>81</sub>/Co.



ионного высокочастотного распыления. Косая черта обозначает деление плёнки на слои разного состава, нижний индекс у квадратных скобок – количество периодов.

### **Научная новизна**

1. Показано, что слоистые плёночные структуры типа Gd-Co/Co при определённых составе аморфных слоёв, соотношении толщины магнитных слоёв и толщины немагнитных прослоек являются искусственным ферромагнетиком; спонтанная намагниченность и индуцированные магнитным полем спин-ориентационные переходы в этих плёнках удовлетворительно описываются в рамках феноменологической модели слабоанизотропного объёмного ферромагнетика.
2. В аморфных плёнках Tb-Co реализована сильная одноосная магнитная анизотропия, по-видимому, магнитоупругой природы, которая подавляет перпендикулярную анизотропию, обусловленную столбчатой микроструктурой, и создаёт предпосылки для эффективного использования этих плёнок в составе функциональных плёночных структур с внутренним магнитным смещением.
3. Установлено, что однонаправленная анизотропия и гистерезисные свойства двухслойных плёнок типа Fe<sub>19</sub>Ni<sub>81</sub>/Tb-Co могут целенаправленно изменяться при варьировании температуры, толщины слоя пермаллоя, толщины немагнитной прослойки, а также путём селективного отжига слоя пермаллоя.
4. Обнаружены резкие и в ряде случаев немонотонные изменения коэрцитивной силы слоя пермаллоя в составе двухслойных плёнок в зависимости от структурных параметров и внешних воздействий. Они связываются с изменением структурного состояния немагнитной прослойки между слоём пермаллоя и аморфным слоем, образованием ультратонкой немагнитной прослойки при селективном отжиге слоя пермаллоя, изменением по толщине локализации межслойного магнитного интерфейса при варьировании температуры.

### **Практическая ценность**

Полученные результаты могут быть использованы как физическая основа при разработке сред для высокочувствительных сенсоров магнитного поля с определёнными функциональными свойствами. Такая возможность продемонстрирована на примере

прототипов сенсорных элементов, изготовленных из плёнок Tb-Co/Fe19Ni81 на федеральном государственном унитарном предприятии «НПО автоматики».

### **Достоверность**

Представленные в работе экспериментальные исследования проведены с использованием современных и апробированных методик на высокоточных приборах и установках. Результаты, представленные в диссертации, внутренне непротиворечивы и не имеют принципиальных расхождений с имеющимися экспериментальными и теоретическими данными других исследователей, опубликованными в открытой печати.

### **Апробация работы**

Материалы диссертационной работы были представлены на 15 научных конференциях: XI-я Всероссийская научная конференция студентов-физиков ВНКСФ-11 (2005, Екатеринбург, Россия); X-й Международный семинар «Дислокационная структура и механические свойства металлов и сплавов» (2005, Екатеринбург, Россия); Московский международный симпозиум по магнетизму (2005, Москва, Россия); XIX-я международная школа-семинар «Новые магнитные материалы микроэлектроники» (2004, Москва, Россия); III-я Российская научно-практическая конференция «Физические свойства металлов и сплавов» (2007, Екатеринбург, Россия); V-я Российская научно-практическая конференция «Физические свойства металлов и сплавов» (2009, Екатеринбург, Россия); VIII-я Всероссийская молодежная школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (2007, Екатеринбург, Россия); IX-я Всероссийская молодежная школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (2008, Екатеринбург, Россия); X-я Всероссийская молодежная школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (2009, Екатеринбург, Россия); XI-я Всероссийская молодежная школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (2010, Екатеринбург, Россия); XXXV-ое совещания по физике низких температур (2009, Черногоровка, Россия); Международная конференция «Новое в магнетизме и магнитных материалах» (2009, Москва, Россия); IV Euro-Asian Symposium

«Trends in MAGnetism»: Nanospintronics EASTMAG-2010 (2010, Ekaterinburg, Russia); X International Workshop on Non-Crystalline Solids, IWNCS-10 (2010, Barcelona, Spain); Moscow International Symposium on Magnetism MISM-2011 (2011, Moscow, Russia).

### **Публикации и личный вклад автора**

По теме работы опубликовано 4 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, 2 статьи в сборниках с ISBN, 16 тезисов докладов. Список публикаций приведен в конце автореферата. Соискатель принимал непосредственное участие в постановке задач, методическом обеспечении экспериментов, проведении измерений, обсуждении и описании полученных результатов во всех работах, опубликованных в соавторстве.

### **Структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов и списка цитируемой литературы. Ее объем составляет 158 страниц, включая 77 рисунков и 1 таблицу. В списке литературы приведено 85 наименований.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы общая цель и конкретные задачи работы, указаны основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** посвящена обзору литературы. В ней излагаются имеющиеся данные об особенностях структуры и магнитных свойств аморфных и многослойных обменносвязанных пленок, содержащих 3d-переходные металлы и редкоземельные элементы. Представлены технологии получения пленочных структур. На основе литературных данных обосновывается выбор объектов исследования, уточняются поставленные задачи.

Во **второй главе** описан метод получения образцов исследованных в данной работе, а также методики измерения их свойств.

Аморфные пленки Gd-Co, Tb-Co и многослойные пленки [Co/Gd-Co]<sub>n</sub>/Co, [Co/Ti/Gd-Co/Ti]<sub>n</sub>/Co, Fe<sub>19</sub>Ni<sub>81</sub>/Tb-Co, Fe<sub>19</sub>Ni<sub>81</sub>/Ti/Tb-Co были получены высокочастотным ионно-плазменным напылением в атмосфере аргона на модернизированной серийной отечественной установке. Осаждение всех плёнок проводилось в присутствии однородного магнитного поля  $H_t$  напряженностью 170 Э, которое интенсифицировало процесс распыления и, как правило, обеспечивало создание одноосной магнитной анизотропии с ориентацией оси легкого намагничивания (ОЛН) в плоскости пленки. В качестве подложек использовались покровные стекла. Для предотвращения окисления слоев, содержащих редкоземельные компоненты, пленки покрывались защитным слоем немагнитного металла Ti или Cu толщиной 10-45 нм. В ряде случаев такие плёнки имели и приподложечные покрытия из указанных металлов. Общая толщина плёнок не превышала 200 нм. Конкретные значения толщин слоёв в нанометрах приведены в подписях к рисункам как цифры в круглых скобках в составе структурных формул.

По данным рентгеновских и электронно-микроскопических исследований пленки Gd-Co, Tb-Co и их слои в многослойных структурах были аморфны, тогда как слои Fe<sub>19</sub>Ni<sub>81</sub>, Co, Ti и Cu находились в мелкокристаллическом состоянии.

Основная часть результатов магнитных измерений, представленных в диссертации, получена с помощью СКВИД-магнитометра MPMS-XL7-EverCool. Также для магнитометрических измерений привлекались оригинальные вибрационный магнитометр и вращательный анизометр. Исследование электрических свойств проводилось с помощью четырехзондовой методики. Определение химического состава осуществлялось с помощью метода атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой. Толщина плёнок контролировалась на стилусном профилометре Dektak-150.

В **третьей главе** изложены результаты исследования магнитных свойств однослойных аморфных пленок двух систем R-Co (R = Gd, Tb). Цель этих экспериментов состояла в определении особенностей формирования спонтанной намагниченности и магнитной анизотропии пленок, а также в реализации при комнатной

температуре высококоэрцитивного состояния, обладающего повышенной устойчивостью к температурным воздействиям.

На основе анализа магнитометрических данных установлено, что в обеих системах имеет место ферримагнитное упорядочение, о чем, в частности, свидетельствуют немонотонный характер зависимостей спонтанной намагниченности от температуры и наличие состояний магнитной компенсации. Вблизи комнатной температуры магнитная компенсация реализуется при содержании R ~ 20 ат.%. Однако наш интерес был сосредоточен на случаях, когда температура компенсации ( $T_{\text{comp}}$ ) удалена от комнатной температуры ( $T_r$ ), поскольку такие плёнки должны проявлять большую термостабильность магнитных свойств в нормальных условиях.

Установлено, что для аморфных пленок Gd-Co с относительно малым содержанием редкоземельного компонента, в которых  $T_{\text{comp}} < T_r$ , присущи повышенные значения коэрцитивной силы  $H_c$  (более 100 Э) и так называемое «закритическое» магнитное состояние [1]. О наличии последнего говорят характерные петли гистерезиса и структура страйп-доменов (рис. 1). Такое состояние есть результат компромисса между анизотропией формы и перпендикулярной

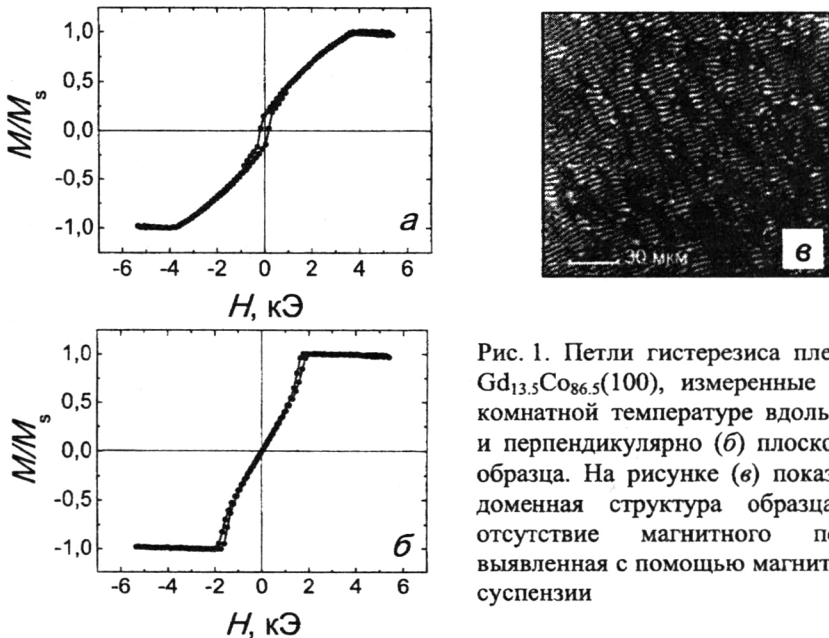


Рис. 1. Петли гистерезиса пленки  $Gd_{13.5}Co_{86.5}(100)$ , измеренные при комнатной температуре вдоль (а) и перпендикулярно (б) плоскости образца. На рисунке (в) показана доменная структура образца в отсутствие магнитного поля, выявленная с помощью магнитной суспензии

анизотропией, которая может быть связана со столбчатой микроструктурой, типичной для металлических пленок [2].

Пленки с большим содержанием атомов Gd ( $T_{\text{comp}} > T_r$ ) не обнаруживают признаков перпендикулярной анизотропии, но имеют низкую  $H_c$  (единицы эрстед). В них наблюдается невысокая одноосная анизотропия в плоскости (рис. 2). Причём положение оси легкого намагничивания соответствует оси приложения технологического поля при осаждении пленки. Вероятной причиной анизотропии в плоскости является упорядочение пар атомов.

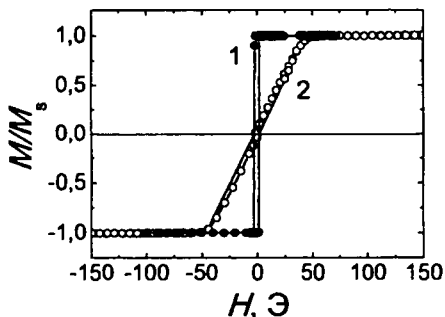


Рис. 2. Петли гистерезиса пленки  $Gd_{36}Co_{64}$  (100), измеренные при комнатной температуре в плоскости плёнки вдоль (кривая 1) и перпендикулярно (кривая 2) оси приложения технологического поля

В аморфных пленках Tb-Co магнитная анизотропия представляется сложнее. Её характеристика может быть дана на основе анализа закономерностей намагничивания пленок разного состава (рис. 3). Вид кривых размагничивания для образца с низким содержанием Tb (рис. 3,б) указывает на наличие сильной одноосной магнитной анизотропии в плоскости пленки. Ориентация ОЛН совпадает с осью приложения поля  $H_i$  (ось OX). Конечные значения остаточной намагниченности  $M_r$ , которые демонстрируют кривые, измеренные перпендикулярно ОЛН в плоскости (кривая 2) и вдоль нормали к плоскости (кривая 3), говорят только о малой неоднородности в распределении намагниченности по объему образца. Количественное различие кривых 2 и 3 на первый взгляд представляется следствием анизотропии формы пленочного образца. Однако учет размагничивающего фактора (кривая 4) не дает совпадения разных кривых  $M(H)$ , измеренных в плоскости перпендикулярной ОЛН. Приходится констатировать, что структурная составляющая магнитной анизотропии для состава

$Tb_8Co_{92}$  не является строго одноосной, а формирует оси  $Ox$ ,  $Oy$ ,  $Oz$  как оси легкого, среднего и трудного намагничивания соответственно.

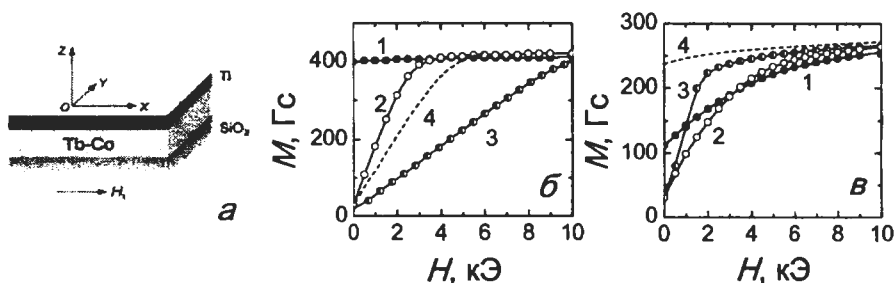
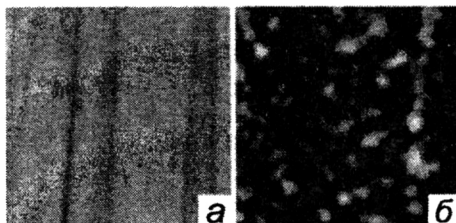


Рис. 3. Схематическое изображение образца (а) и кривые размагничивания плёнок: б –  $Tb_8Co_{92}$  (100), в –  $Tb_{31}Co_{69}$  (120). Измерения выполнены при комнатной температуре и различной ориентации вектора магнитного поля: 1 – в плоскости плёнки, вдоль оси приложения технологического поля  $H_t$  (ось  $Ox$  на схеме); 2 – в плоскости плёнки, перпендикулярно  $H_t$  (ось  $Oy$ ); 3 – перпендикулярно плоскости плёнки (ось  $Oz$ ); 4 – получена из кривой 3 при пересчёте на внутреннее магнитное поле

Картина заметно изменяется при увеличении содержания Tb (рис. 3,в). В первую очередь это относится к кривой размагничивания вдоль  $Ox$  (кривая 1). Плавное изменение  $M$  в широком интервале  $H$  и низкое значение  $M_r$  свидетельствуют о значительной дисперсии анизотропии. Согласно [3] в пленках Tb-Co может иметь место флуктуация локальных ОЛН, определяющая дисперсию атомных магнитных моментов тербия (сперимагнетизм), а также макроскопическая флуктуация ОЛН, приводящая к возникновению доменоподобной магнитной неоднородности. Последнее обстоятельство, по-видимому, и в нашем случае задает характер кривых  $M(H)$  в области относительно невысоких полей. В пользу высказанного выше положения свидетельствуют результаты наблюдения полей рассеяния над поверхностями пленок разного состава. Примеры картин магнитного рельефа, полученные в методике магнитной моды на сканирующем зондовом микроскопе, показаны на рис. 4.

В заключение главы 3 можно констатировать, что однородные аморфные пленки Gd-Co обнаруживают перпендикулярную

магнитную анизотропию или обладают сравнительно низкими значениями коэрцитивной силы. Это не позволяет рассматривать их в практических целях как непосредственный источник магнитного смещения, но не исключает возможности эффективного использования в составе искусственных ферромагнитных структур.



— 2 μm

Рис. 4. Магнитный рельеф поверхностей образцов: *a* –  $Tb_{22}Co_{78}$  (110); *б* –  $Tb_{31}Co_{69}$  (120)

Магнитная анизотропия аморфных пленок Tb-Co имеет несколько составляющих. К их числу относятся: флуктуирующая локальная анизотропия ионов Tb; перпендикулярная анизотропия, источником которой, по-видимому, является столбчатая микроструктура; наведенная одноосная анизотропия, вероятно, магнитоупругой природы. При определенных условиях наведенная анизотропия является доминирующей, что при высоком магнитном гистерезисе создает благоприятные предпосылки для использования данных пленок в составе структур с внутренним магнитным смещением.

В четвертой главе изложены результаты исследования многослойных структур, содержащих аморфные слои Gd-Co и Tb-Co. Дается описание магнитных свойств таких пленок при наличии обменной связи между слоями, а также закономерностей их изменения под действием температуры и магнитного поля. Анализируется влияние немагнитных прослоек и термообработки на межслойное взаимодействие.

Одна группа образцов содержала аморфные слои Gd-Co и поликристаллические слои Co. При постановке данного исследования среди прочего преследовалась цель создания магнитокомпенсированной среды, не имеющей перпендикулярной анизотропии и обладающей повышенными значениями коэрцитивной силы по сравнению с однородными пленками Gd-Co. Это предопределило выбор состава аморфных слоёв ( $Gd_{36}Co_{64}$ ), спонтанная намагниченность которых в широкой области температур

(включая комнатную температуру) определяется редкоземельной составляющей.

Наши эксперименты показали, что в плёнках  $[\text{Co}/\text{Gd}_{36}\text{Co}_{64}]_4/\text{Co}$  действует отрицательное межслойное обменное взаимодействие, которое обеспечивает слоистой системе псевдоферритмагнитную структуру. Кроме того, по температурным зависимостям

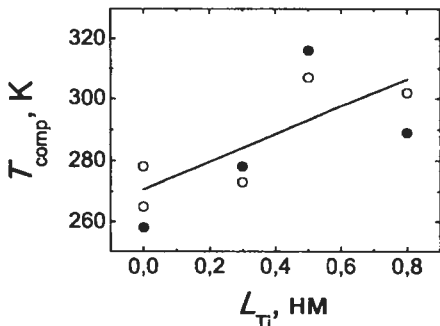


Рис. 5. Зависимости температуры компенсации  $T_{\text{comp}}$  пленки  $[\text{Co}(7)/\text{Ti}(L_{\text{Ti}})/\text{Gd-Co}(24)/\text{Ti}(L_{\text{Ti}})]_4/\text{Co}(7)$  от толщины прослойки титана  $L_{\text{Ti}}$ , полученные на СКВИД магнитометре (незакрашенные точки) и вращательном анизометре

намагниченности было установлено, что при определенных температуре ( $T_{\text{comp}}$ ) и соотношении толщин слоёв в системе магнитных моментов слоёв  $\text{Gd}_{36}\text{Co}_{64}$  и  $\text{Co}$  реализуется магнитная компенсация. Величина  $T_{\text{comp}}$  помимо толщинных параметров чувствительна к состоянию межслойной границы, которое изменялось за счет введения прослоек титана. Согласно полученным данным (рис. 5), по мере роста толщины прослойки  $L_{\text{Ti}}$  имеет место вполне определённая тенденция к увеличению  $T_{\text{comp}}$ . Данный результат нетривиален, поскольку ранее [4] было установлено, что в многослойных плёнках  $\text{Gd}/\text{Co}$  введение прослойки уменьшает температуру компенсации. Установленная особенность связывается нами с неодинаковостью обменного закрепления внутренних и внешних слоёв  $\text{Co}$  в слоистой структуре.

На рис. 6 показаны петли гистерезиса плёнок  $[\text{Co}/\text{Gd}_{36}\text{Co}_{64}]_4/\text{Co}$ , полученные разными методами. На каждой из кривых можно выделить некоторое критическое поле  $H_{\text{cr}}$ , в котором происходит изменение характера намагничивания. Эту особенность можно связать с деформацией исходной коллинеарной магнитной структуры и образованием так называемой «скрученной» магнитной структуры [5]. В силу поверхностного характера обменного взаимодействия

между магнитными слоями и достаточно большой толщины самих слоев это происходит в относительно слабом поле.

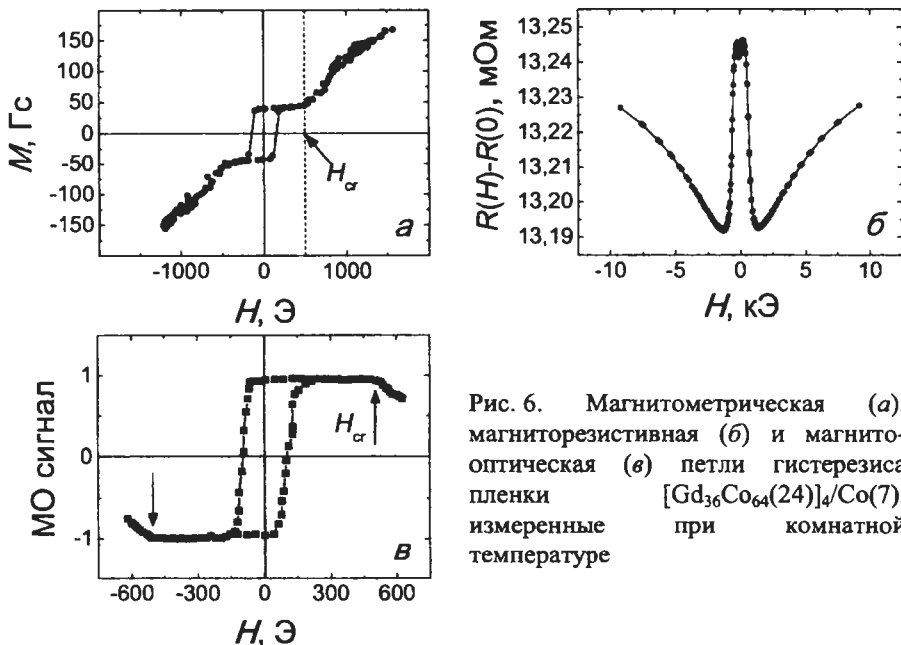


Рис. 6. Магнитометрическая (а), магниторезистивная (б) и магнито-оптическая (в) петли гистерезиса пленки  $[Gd_{36}Co_{64}(24)]_4/Co(7)$ , измеренные при комнатной температуре

Экспериментально установлена температурная зависимость указанного критического поля (рис. 7,а). Показано, что она удовлетворительно описывается в модели слабоанизотропного неограниченного ферримагнетика [6], обобщенной на случай слоистой структуры, в которой магнитная анизотропия и межслойное обменное взаимодействие обусловлены только слоями Co:

$$H_{cr}^2 + H_{cr} \left[ \lambda (M_{Co} l_{Co} - l_{GdCo} M_{GdCo}) - \frac{2K_{Co}}{M_{Co}} \right] - 2K_{Co} l_{Co} \lambda = 0, \quad (1)$$

где  $M_{Co}$ ,  $M_{GdCo}$  и  $l_{Co}$ ,  $l_{GdCo}$  – намагниченности и относительные толщины двух типов слоёв,  $K_{Co}$  – константа анизотропии кобальта,  $\theta$  – угол между намагниченностью подсистемы Co и внешним полем,  $\lambda$  – константа молекулярного поля, характеризующая межслойную связь. При этом параметр модели  $\lambda$ , полученный аппроксимацией экспериментальной зависимости  $H_{cr}(T)$  с помощью (1), обнаруживает

аномальное поведение в области  $T_{\text{comp}}$  (рис. 7,б). Однако по нашему мнению наблюдающийся скачок  $\lambda$  отражает не изменение обменного взаимодействия, а определённую асимметрию магнитной структуры, которая задаётся поверхностными слоями Co.

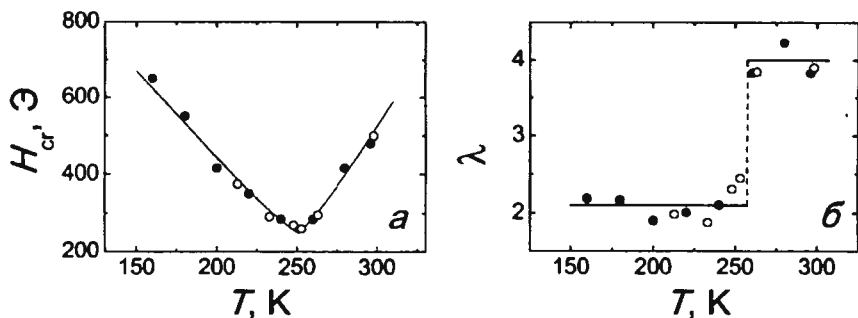


Рис. 7. (а) - Температурные зависимости критического поля, определённые экспериментально из магнитометрических (светлые точки) и магниторезистивных (тёмные точки) петель гистерезиса плёнки  $[\text{Gd}_{36}\text{Co}_{64}(24)]_4/\text{Co}(7)$  или полученная расчётным путём (линия); (б) - Температурная зависимость константы молекулярного поля. Значения  $\lambda$  рассчитаны с использованием магнитометрических (светлые точки) и магниторезистивных (тёмные точки) петель гистерезиса

В целом можно заключить, что в области магнитной компенсации многослойные плёнки Gd-Co/Co в отличие от однородных плёнок Gd-Co не проявляют перпендикулярной анизотропии и имеют повышенную коэрцитивную силу. В тоже время максимальные значения  $H_c$  в исследованных объектах не превышают 300 Э, Такой же порядок имеют и критические поля образования неколлинеарной магнитной структуры. То и другое говорит о недостаточной устойчивости магнитных состояний плёнок Gd-Co/Co как элементов сред с внутренним магнитным смещением.

Другую группу образцов составляли плёнки Fe19Ni81/Tb-Co, в аморфных слоях которых содержание Tb находилось в пределах 31÷35 ат.%. Для данного диапазона концентраций характерны достаточно большая коэрцитивная сила и одноосная магнитная анизотропия, что позволяет рассматривать такие пленки как источник магнитного смещения (иначе – однонаправленной анизотропии) в составе структур с магнитомягкими слоями. Выбор пермаллоя в

качестве материала магнитомягкого слоя обусловлен не только низким уровнем магнитного гистерезиса, но и свойственным ему анизотропным магнорезистивным эффектом.

Эксперимент показал, что петли гистерезиса пленок Fe19Ni81/Tb-Co, измеренные в достаточно сильном поле, имеют ступенчатый вид (рис. 8,а), то есть отражают поэтапное перемагничивание магнитомягкого (Fe19Ni81) и магнитотвёрдого (Tb-Co) слоёв. При этом частная петля слоя пермаллоя существенно смещена по оси полей на величину поля смещения  $H_e$  (рис. 8,б), что говорит о наличии сильного межслойного обменного взаимодействия. Кроме того, слой Fe19Ni81 обнаруживает выраженную одноосную анизотропию в плоскости (сравни кривые 1 и 2 на рис 8,б).

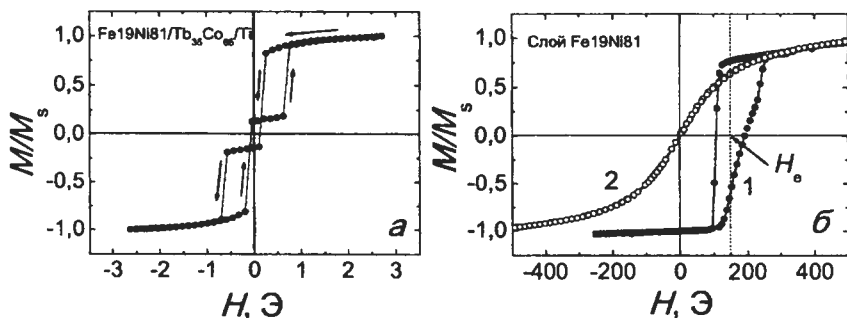


Рис. 8. Петли гистерезиса пленки Fe19Ni81(50)/Tb<sub>35</sub>Co<sub>65</sub>(110), измеренные вдоль ОЛН (а) и (б, кривая 1) и перпендикулярно ОЛН (б, кривая 2) при различных амплитудах магнитного поля

Нами проведено подробное исследование влияния различных факторов (толщин магнитных слоев, немагнитной прослойки, селективного термического воздействия) на величину поля смещения и гистерезисные свойства слоя пермаллоя. Наиболее интересные результаты состоят в следующем

Установлено, что при  $T < T_c$  величина  $H_e$  имеет немонотонную температурную зависимость (рис. 9). При понижении температуры поле смещения плавно растет до  $T \sim 100$  К. Однако при меньших температурах выявляется иная тенденция: стабилизация, а затем и некоторое снижение  $H_e$ , что является признаками соответствующего поведения межслойной связи. В тоже время спонтанная

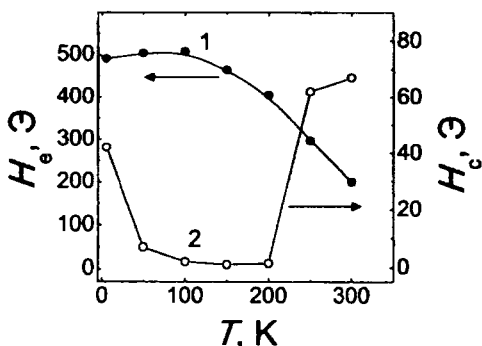


Рис. 9. Зависимости поля смещения (кривая 1) и коэрцитивной силы (кривая 2) плёнки  $Tb_{31}Co_{69}(100)/Fe_{19}Ni_{81}(50)$ , измеренные при перемагничивании слоя пермаллоя вдоль ОЛН

намагниченность аморфного слоя во всем температурном интервале изменяется монотонно, что свидетельствует о монотонном изменении молекулярного поля межслойного взаимодействия. Можно полагать, что в формирование межслойной связи вмешивается флуктуирующая магнитная анизотропия, которая велика именно в области гелиевых температур. Ее конкуренция с обменным взаимодействием может приводить к усилению дисперсии намагниченности в аморфном слое и эффективно уменьшать обменное молекулярное поле.

Весьма необычным представляется немонотонное температурное поведение коэрцитивной силы  $H_c$  слоя пермаллоя (рис. 9). Резкое снижение  $H_c$  при  $T < 200$  К может быть следствием изменения локализации межслойной магнитной границы, образующейся в ходе послойного перемагничивания. При понижении температуры в связи с ростом магнитной анизотропии аморфного слоя она может вытесняться из магнитожёсткого аморфного слоя в магнитомягкий слой пермаллоя. Рост коэрцитивной силы в области низких температур может отражать увеличение планарной неоднородности межслойного взаимодействия, которое в свою очередь является следствием повышения дисперсии магнитной анизотропии аморфного слоя.

На рис. 10 представлены результаты исследования влияния толщины немагнитной прослойки ( $L_T$ ) на закономерности перемагничивания слоя пермаллоя. Как видно,  $H_e$  и  $H_c$  с увеличением  $L_T$  изменяются немонотонно. Причём росту  $H_e$  при введении прослойки минимальной толщины соответствует резкое падение  $H_c$ . И

наоборот, фактическое исчезновение межслойной связи ( $H_c \sim 0$ ) при  $L_{Ti} \geq 0,8$  нм сопровождается скачкообразным увеличением  $H_c$ .

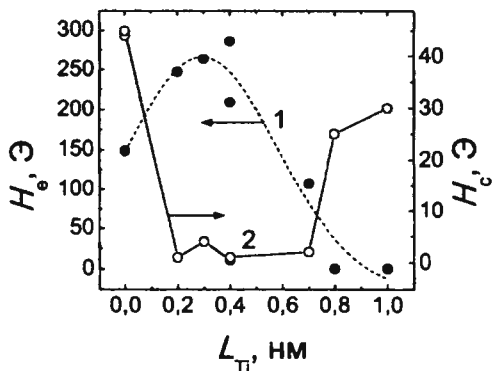


Рис. 10 Зависимости поля смещения  $H_e$  (кривая 1) и коэрцитивной силы  $H_c$  (кривая 2) слоя FeNi в пленке Fe19Ni81(50)/Ti( $L_{Ti}$ )/Tb<sub>35</sub>Co<sub>65</sub>(110) от толщины прослойки титана  $L_{Ti}$

Предлагаемое нами обоснование таких зависимостей  $H_e(L_{Ti})$  и  $H_c(L_{Ti})$  исходит из того, что при малых номинальных толщинах немагнитная прослойка является сплошной и несколько ослабляет локальную межслойную связь. Это способствует уменьшению дисперсии поля связи и соответственно эффективному увеличению поля смещения частной петли гистерезиса. Кроме того, тонкая прослойка, по-видимому, приводит к локализации межслойной магнитной границы в магнитомягком слое, что снижает коэрцитивную силу. Прослойки большей номинальной толщины, возможно, проявляют склонность к коагуляции и образованию не сплошного, а островкового покрытия. В результате усиливается дисперсия межслойной связи в плоскости, что влечёт понижение  $H_e$  и рост  $H_c$ .

Рис. 11 отражает свойства плёнок Fe19Ni81/Tb<sub>35</sub>Co<sub>65</sub> в состояниях, которые формировались путём одночасового отжига слоёв пермаллоя при различных температурах перед нанесением на них аморфных слоёв. Следует указать на некоторое возрастание  $H_e$  и резкое снижение  $H_c$  в пленках, подвергнутых термообработке, по сравнению с неотжигавшимся образцом. Фактически в результате отжига наблюдаются те же изменения в параметрах перемагничивания, которые были обнаружены при введении немагнитной прослойки. Естественно полагать, что и механизмы

изменения свойств в этих случаях близки. Вероятно, в результате отжига пермаллоя происходит некоторая модификация его поверхности, например, адсорбция остаточных газов. Таким образом, возникает ультратонкий немагнитный слой, который играет роль немагнитной прослойки в двухслойной структуре. Эта прослойка может ослаблять межслойную связь и тем самым снижать угловую дисперсию поля магнитного смещения.

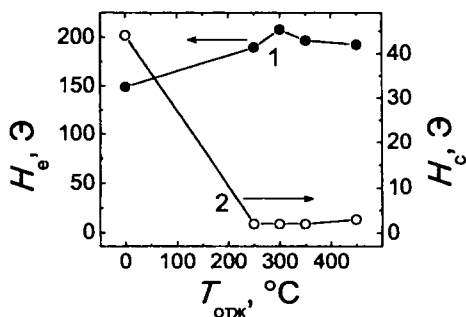


Рис. 11. Зависимости поля смещения  $H_e$  (кривая 1) и коэрцитивной силы  $H_c$  (кривая 2) плёнок  $\text{Fe}_{19}\text{Ni}_{81}(50)/\text{Tb}_{35}\text{Co}_{65}(120)$  от температуры отжига слоя пермаллоя

В заключение следует отметить, что описанная селективная термообработка наряду с уменьшением коэрцитивной силы слоя пермаллоя приводит к существенному увеличению анизотропии магнитоспротивления двухслойной структуры. Так на плёнке  $\text{SiO}_2/\text{Fe}_{19}\text{Ni}_{81}(50 \text{ нм})/\text{Tb}_{35}\text{Co}_{65}(110 \text{ нм})/\text{Ti}(11 \text{ нм})$ , отожженной при  $450^\circ\text{C}$  она достигла 2%. Это позволило рассматривать такие плёнки как эффективные магниторезистивные среды, обладающие внутренним магнитным смещением. На их основе при участии ФГУП «НПО автоматики» изготовлены и испытаны прототипы магниторезистивных сенсоров.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Определены особенности магнитной анизотропии и гистерезисных свойств аморфных пленок R-Co (R = Gd, Tb) вблизи состояния магнитной компенсации. В плёнках Gd-Co определяющими механизмами магнитной анизотропии являются анизотропия формы и «перпендикулярная» анизотропия, которая, по-видимому, обусловлена столбчатой микроструктурой. В плёнках Tb-Co наряду с

этим действует флуктуирующая локальная анизотропия атомов Tb и одноосная наведённая анизотропия, по-видимому, магнитоупругой природы, которая при высоком уровне магнитного гистерезиса задаёт ориентацию намагниченности в плоскости образцов.

2. На основе слоистой плёночной структуры типа Gd-Co/Co создан искусственный ферримагнетик, в котором при определённом сочетании состава аморфных слоёв, соотношения толщины слоёв и толщины немагнитных прослоек реализуется состояние магнитной компенсации. Оно характеризуется отсутствием перпендикулярной анизотропии, повышенным магнитным гистерезисом и возможностью индуцирования магнитным полем спин-ориентационных переходов. Показано, что фазовая T-H-диаграмма такого ферримагнетика при адекватном определении параметра межслойной связи удовлетворительно описывается в рамках модели слабоанизотропного объёмного ферримагнетика.

3. Установлены закономерности формирования однонаправленной анизотропии и гистерезисных свойств в плёнках типа Fe<sub>19</sub>Ni<sub>81</sub>/Tb-Co при варьировании температуры, толщины слоя пермаллоя, толщины немагнитной прослойки, а также селективном отжиге слоя пермаллоя. Обнаружены новые особенности свойств плёнок исследованного типа:

- немонотонная зависимость коэрцитивной силы слоя пермаллоя при изменении температуры в интервале 5÷300 К, которая связывается с зависимостью магнитной анизотропии аморфного слоя от температуры, приводящей к изменению по толщине локализации межслойного магнитного интерфейса;

- немонотонные зависимости поля смещения и коэрцитивной силы от толщины немагнитной прослойки, возможной причиной которых указывается изменение структуры немагнитной прослойки по мере увеличения её номинальной толщины от сплошного ультратонкого состояния к островковому состоянию;

- сильное (более чем на порядок) уменьшение коэрцитивной силы слоя пермаллоя в составе двухслойной структуры после процедуры селективного отжига, которое связывается с образованием в пермаллое поверхностного ультратонкого слоя, приводящего к уменьшению пространственной неоднородности межслойной связи.

4. На основе плёнок Fe<sub>19</sub>Ni<sub>81</sub>/Tb-Co путём оптимизации структурных характеристик и использования селективного отжига пермаллоя

создана функциональная среда, обладающая анизотропией магнитосопротивления, внутренним магнитным смещением и низким гистерезисом. Испытания опытных образцов магнитных сенсоров, изготовленных из такой среды методом фотолитографии, показали их высокую работоспособность.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, определенных ВАК Министерства образования и науки РФ:*

1. Васьковский В.О., Свалов А.В., Балымов К.Г., Курляндская Г.В., Сорокин А.Н.. Индуцированные магнитные фазовые переходы в многослойных пленках типа GdCo/Co // ФТТ.- 2008.- Т.50.- В.8-С.1424-1429
2. Васьковский В.О., Балымов К.Г., Ювченко А.А., Свалов А.В., Сорокин А.Н., Кулеш Н.А., Магниторезистивная среда Fe<sub>19</sub>Ni<sub>81</sub>/Tb-Co с внутренним магнитным смещением // ЖТФ.- 2011.- Т.81.- В.7-С.83-87
3. Балымов К.Г., Васьковский В.О., Свалов А.В., Степанова Е.А., Кулеш Н.А.. Особенности перемангничивания пленок Tb-Co/Fe<sub>19</sub>Ni<sub>81</sub> с однонаправленной анизотропией // ФММ.- 2010.- Т.110.- № 6.- С.550–555
4. Svalov A.V., Vas'kovskiy V.O., Barandiarán J.M., Balymov K.G., Sorokin A.N., Orue I., Larrañaga A., Schegoleva N.N. and Kurlyandskaya G.V., Structure and Magnetic Properties of Gd/Ti Nanoscale Multilayers // Solid State Phenomena.- 2011.- V. 168-169.- P. 281-284

*Тезисы в сборниках с номером ISBN:*

5. Савин П.А., Свалов А.В., Ювченко А.А., Васьковский В.О., Щёголева Н.Н., Балымов К.Г., Магнитные, резистивные свойства и доменная структура многослойных плёнок Co/Si // Сборник трудов XIX международной школы-семинара «Новые магнитные материалы микроэлектроники».- 2004.- Москва.- С.457
6. Васьковский В.О., Савин П.А., Балымов К.Г., Получение и исследование магниторезистивных пленочных структур FeNi/FeMn // Сборник трудов Международной конференции «Новое в магнетизме и магнитных материалах».- 28 июня - 4 июля 2009.- Москва.- С.136-137

## СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глазер А.А., Константинова И.Ю., Потапов А.П., Тагиров Р.И. Температурная зависимость вращающейся анизотропии в закритических пленках сплавов железо-никель // ФММ.-1972.-Т.33.-В.5.-С.946-953
2. Herd S.R. On the nature of perpendicular anisotropy in sputtered Gd-Co thin films // J. Appl. Phys.-1979.-V.50, №3.-P.1645-1647
3. Андреев А.С., Никитин С.А., Магнитные свойства аморфных сплавов редкоземельных металлов с переходными 3d-металлами // Успехи физических наук, -1997.-Т. 167.- № 6.- С. 605-622
4. Patrino G.S., Patrino G.S., Eremin E.V., Panova M.A., Vasil'ev V.N., Vas'kovskii V.O., Svalov A.V., Magnetic resonance in multilayer Gd/Si/Co magnetic films // J. Experim. Theor. Phys.-2006.-V.102.-N.6.-P.131-136
5. LePage J.G., Camley R.E., Surface phase transitions and spin-wave modes in semi-infinite magnetic superlattices with antiferromagnetic interfacial coupling // Phys. Rev. Lett.-1990.-V. 65.-N.9.-P.1152-1155
6. Белов К.П., Звездин А.К., Кадомцева А.М., Левитин Р.З., Ориентационные переходы в редкоземельных магнетиках. Наука, М.-1979.-С.317

Подписано в печать 06.09.11. Формат 60x84/16  
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,4. Тираж 100. Заказ № *981*  
Отпечатано в ИПЦ УрФУ  
г. Екатеринбург, ул. Тургенева, 4

10<sup>2</sup>