

На правах рукописи

ЧЕРНЫШОВА Татьяна Александровна

МАГНИТНЫЕ И МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫЕ СВОЙСТВА
СПИНОВЫХ КЛАПАНОВ С СИНТЕТИЧЕСКИМ
ФЕРРИМАГНЕТИКОМ И МИКРООБЪЕКТОВ НА ИХ ОСНОВЕ

Специальность 01.04.11 – физика магнитных явлений

АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург - 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук (ИФМ УрО РАН).

Научный руководитель: **Миляев Михаил Анатольевич** доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории электрических явлений ИФМ УрО РАН

Официальные оппоненты: **Варнаков Сергей Николаевич** доктор физико-математических наук, заместитель директора по научной работе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики имени Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН

Трушин Олег Станиславович кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией исследования процессов формирования многослойных структур Ярославского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технологического института имени К.А. Валиева Российской академии наук

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского г. Симферополь

Защита состоится «29» марта 2019 года в 11:00 часов на заседании диссертационного совета Д 004.003.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук (ИФМ УрО РАН) по адресу: 620108, г. Екатеринбург, ул. С.Ковалевской,18.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФМ УрО РАН и на сайте www.imp.uran.ru.

Автореферат разослан « » января 2019 года

Ученый секретарь диссертационного совета Д 004.003.01
доктор физико-математических наук

Чарикова Т.Б.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Магнитные металлические спиновые клапаны являются искусственными синтезируемыми многослойными наноматериалами, обладающими эффектом гигантского магнитосопротивления. Среди многослойных магниточувствительных материалов, в которых реализуется спин-зависимое рассеяние электронов проводимости, спиновые клапаны выделяются уникальным набором характеристик, удобным для практических приложений. В частности, в отличие от обменно-связанных сверхрешеток, сенсорные элементы на основе спиновых клапанов обладают проходящей через $H = 0$ полевой зависимостью магнитосопротивления, и могут быть использованы для измерения слабых магнитных полей. В сенсорных элементах на основе туннельного магнитосопротивления ток протекает в микрообъектах перпендикулярно слоям наноструктуры, в отличие от спиновых клапанов, где предпочтительно протекание тока в плоскости слоев. Это существенно упрощает и удешевляет процесс изготовления сенсорных элементов на основе спиновых клапанов. Еще одним важным преимуществом спиновых клапанов является их устойчивость к электростатическим разрядам.

Простейший спиновый клапан [1] состоит из разделенных немагнитной прослойкой двух ферромагнитных слоев, намагниченность, одного из которых «закреплена» обменным взаимодействием с соседним слоем антиферромагнетика. В результате такого взаимодействия формируется однонаправленная анизотропия, которой соответствует ось однонаправленной анизотропии (ОА). Вектор намагниченности второго «свободного» слоя легко поворачивается во внешнем магнитном поле. Наведенная при напылении в магнитном поле одноосная анизотропия характеризуется осью легкого намагничивания (ОЛН).

Для увеличения диапазона рабочих температур и повышения магниторезистивной чувствительности в качестве «закрепленного» слоя применяют синтетический ферримагнетик, часто называемый также и синтетическим антиферромагнетиком (САФ) [2, 3]. САФ состоит из двух ферромагнитных слоев, связанных через тонкий слой рутения РККИ взаимодействием. Подобную обменно-связанную структуру вводят также и в состав свободного слоя, что позволяет повысить магниторезистивную чувствительность микрообъектов на основе спиновых клапанов [4].

Спиновые клапаны с параллельным расположением ОА и ОЛН могут быть использованы в цифровых устройствах с двумя логическими состояниями «0» и «1», так как при ОА || ОЛН имеет место резкое гистерезисное изменение магнитосопротивления в малых полях. Для аналоговых измерительных устройств, таких как датчики магнитного поля и тока, такая форма полевой зависимости магнитосопротивления не подходит. В аналоговых сенсорах магнитного поля должна быть

реализована однозначная, а, следовательно, безгистерезисная зависимость сопротивления от магнитного поля, причем середина линейной части этой зависимости должна быть близка к $H = 0$. Проблема состоит в том, что известные способы ослабления гистерезиса магнитосопротивления и уменьшения сдвига низкополевой петли неэффективны и технически сложны в случае спиновых клапанов с САФ. Часто используемым на практике способом ослабления гистерезиса является изготовление микрообъектов, в которых важную роль играет анизотропия формы (микрополосок или меандров). Чувствительность спинового клапана к изменению магнитного поля при этом уменьшается в десятки раз [5]. Другой способ ослабления гистерезиса при сохранении высокой чувствительности связан с приложением магнитного поля под углом к осям анизотропии спинового клапана [6]. Однако, для спинового клапана с САФ такой способ малоэффективен.

Существенное ослабление гистерезиса происходит, если в спиновом клапане формируют взаимно перпендикулярное расположение осей анизотропии ($ОЛН \perp ООА$) посредством, например, термомагнитной обработки [7]. К сожалению, при этом многократно снижается магниторезистивная чувствительность. Для спинового клапана с САФ такой способ технологически неудобен, так при термомагнитной обработке необходимо приложить поле в несколько тысяч эрстед.

Для спиновых клапанов с САФ имеется другая возможность изменения взаимного расположения ООА и ОЛН, связанная с тем, что при определенной (около 1000 Э) величине магнитного поля, приложенного вдоль ОЛН, САФ переходит в спин-флоп состояние [8]. Переход САФ в спин-флоп состояние отмечен в ряде публикаций. В то же время, отсутствуют работы, в которых исследуется возможность использования спин-флоп состояния для термомагнитной обработки и получения безгистерезисной полевой зависимости магнитосопротивления. Получение безгистерезисного перемагничивания в сложных микрообъектах на основе спиновых клапанов также является сложной задачей. Особенно это касается меандров, в которых формирование конфигурации $ОЛН \perp ООА$ приводит лишь к незначительному ослаблению гистерезиса [9].

Интересной возможностью, расширяющей область практического применения спиновых клапанов, является введение в его состав слоя редкоземельного металла. Двуслойная структура редкоземельный/переходный металл является синтетическим ферримагнетиком [10, 11]. Изучение характерных свойств и поведения такой структуры, в составе спинового клапана, представляет интерес не только с точки зрения синтеза материалов, сочетающих магнитную и температурную чувствительность, но и для исследования магнитных свойств нанослоя гадолиния. Термочувствительный псевдо спиновый клапан на основе сплава $CoGd$ был предложен в работе [12], однако в доступных публикациях отсутствует

информация об обменно-связанных спиновых клапанах, имеющих в своем составе слой антиферромагнетика и слой гадолиния.

Цель диссертационной работы: установление взаимосвязи между особенностями наведенной магнитной анизотропии и магнитотранспортными свойствами спиновых клапанов с различными синтетическими ферримагнетиками и разработка методов получения безгистерезисных спиновых клапанов с функциональными характеристиками, представляющими интерес для практических приложений.

Задачи исследования:

1. Провести экспериментальные исследования низкотемпературных особенностей магнитотранспортных свойств спиновых клапанов с синтетическим ферримагнетиком $Gd/Co_{90}Fe_{10}$.
2. Отработать варианты термомагнитной обработки, позволяющие целенаправленно изменять взаимное расположение осей анизотропии в плоскости слоев и минимизировать низкополевой гистерезис в спиновых клапанах с синтетическим ферримагнетиком $Co_{90}Fe_{10}/Ru/Co_{90}Fe_{10}$ и в микрообъектах на их основе.
3. Изучить возможность управления полем переключения спиновых клапанов с помощью изменения магнитного порядка в обменно-связанной структуре $Ni_{80}Fe_{20}/Ru/Ni_{80}Fe_{20}$, входящей в состав свободного слоя.
4. Разработать рекомендации по получению микрообъектов на основе спиновых клапанов, обладающих высокой чувствительностью в сочетании с безгистерезисным изменением магнитосопротивления в области слабых магнитных полей.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Для спиновых клапанов с синтетическим ферримагнетиком $Gd/CoFe$ в свободном слое установлено, что вблизи температуры компенсации переключение между магнитными состояниями, характеризуемыми различным электросопротивлением, может происходить как при изменении напряженности магнитного поля, так и при изменении температуры.
2. Показано, что управление спин-флоп состоянием в синтетическом антиферромагнетике $CoFe/Ru/CoFe$, входящем в состав спиновых клапанов, позволяет изменять в широких пределах направление оси однонаправленной анизотропии с помощью специально разработанной термомагнитной обработки. Данный подход дает возможность целенаправленно изменять функциональные характеристики спиновых клапанов различных композиций.
3. Установлено, что включение обменно-связанной структуры $NiFe/Ru/NiFe$ в состав свободного слоя спинового клапана позволяет

управлять сдвигом низкополевой петли гистерезиса относительно нулевого магнитного поля путем изменения толщины слоя Ru.

Научная и практическая значимость работы. Предложены методы управления наведенной анизотропией, температурной и магниторезистивной чувствительностью, сдвигом и шириной низкополевой петли гистерезиса спиновых клапанов различных композиций. Разработаны режимы термомагнитной обработки, которые позволяют получить спиновые клапаны и микрообъекты на их основе, сочетающие высокие значения магнитосопротивления, нечетность полевых зависимостей магнитосопротивления, высокую чувствительность в области слабых магнитных полей и практически отсутствующий гистерезис. Полученные варианты спиновых клапанов с оптимизированными характеристиками могут быть использованы для изготовления высокочувствительных магнитных сенсоров.

Методы исследования. Исследования выполнены с использованием комплекса экспериментальных методик и технологий. Они включают: приготовление магнитных металлических наноструктур методом магнетронного напыления, изготовление микрообъектов с использованием литографического оборудования, проведение измерений магнитных и магниторезистивных свойств с помощью вибрационной магнитометрии, оптимизацию функциональных характеристик магниточувствительных материалов с помощью специально разработанной термомагнитной обработки, изучение структурных свойств методами рентгеновской дифракции и просвечивающей микроскопии.

Основные результаты и положения, выносимые на защиту:

1. В спиновых клапанах с синтетическим ферримагнетиком Gd/CoFe в свободном слое в фиксированном магнитном поле при изменении температуры вблизи температуры компенсации происходит переключение между магнитными состояниями, характеризуемыми максимальным и минимальным сопротивлением. Температура переключения контролируется толщиной слоя Gd.

2. При формировании «скрещенной» конфигурации осей магнитной анизотропии с помощью термомагнитной обработки в поле, соответствующему спин-флоп состоянию синтетического антиферромагнетика CoFe/Ru/CoFe, в спиновом клапане формируются две магнитные фазы с противоположным направлением осей однонаправленной анизотропии. При отклонении магнитного поля на угол 5° от любого из направлений анизотропии в процессе термомагнитной обработки нарушается энергетическая эквивалентность двух состояний и

формируется однофазное состояние, характеризуемое резким изменением сопротивления вблизи нулевого магнитного поля и слабым гистерезисом магнитосопротивления.

3. Варьирование толщины слоя рутения в обменно-связанной структуре NiFe/Ru/NiFe, входящей в состав свободного слоя спинового клапана, изменяет положение низкополевой петли гистерезиса. В исследованных спиновых клапанах наименьший сдвиг петли гистерезиса относительно нулевого магнитного поля реализуется при толщине слоя рутения $t_{Ru} = 14\text{\AA}$, соответствующей ферромагнитному обменному взаимодействию между слоями NiFe.

4. Использование перехода синтетического антиферромагнетика в спин-флоп состояние при термомагнитной обработке является эффективным способом получения безгистерезисных высокочувствительных спиновых клапанов и микрообъектов на их основе для практических приложений.

5. Для спиновых клапанов различных композиций и микрообъектов на их основе предложены конкретные варианты термомагнитной обработки для получения высокой чувствительности и слабого гистерезиса на магниторезистивной кривой вблизи нулевого магнитного поля.

Степень достоверности результатов. Представленные в работе экспериментальные исследования были проведены с использованием современных аттестованных приборов, апробированных методик и эталонных образцов. Полученные результаты не противоречат экспериментальным и теоретическим данным других исследователей, опубликованным в открытой печати.

Апробация результатов. Результаты, включенные в диссертацию, были представлены и обсуждены на всероссийских и международных конференциях: Euro-Asian Symposium «Trend in MAGnetism» EASTMag-2016, Красноярск, 15-19 августа 2016 г., XVII Всероссийской школе-семинаре по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-17) – Екатеринбург, 12 - 22 ноября 2016 г., XXI Международном симпозиуме «Нанозифика и нанозлектроника» - Нижний Новгород, 13-16 марта 2017 г., Moscow International Symposium on Magnetism (MISM)-Москва, 1-5 июля 2017 г, 13th International Workshop on Magnetism & Superconductivity at the Nanoscale - Coma-Ruga, Spain, 2-7 июля 2017г., XXII Международном симпозиуме «Нанозифика и нанозлектроника» - Нижний Новгород, 12-15 марта 2018 г.

Материалы диссертации опубликованы в 17 печатных работах: в 9 статьях, из них 6 - в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК, и в 8 сборниках тезисов докладов всероссийских и международных научных конференций и симпозиумов.

Личный вклад автора. Основные результаты, представленные в диссертации, получены автором совместно с группой сотрудников лаборатории электрических явлений ИФМ УрО РАН. Постановка задач проводилась Т.А. Чернышовой совместно с научным руководителем М.А. Миляевым. Изготовление образцов методом магнетронного напыления проведено сотрудниками лаборатории электрических явлений ИФМ УрО РАН Л.И. Наумовой и В.В. Проглядо при участии автора. Личный вклад автора заключается в проведении измерений намагниченности и магнитосопротивления многочисленных серий экспериментальных образцов на вибрационном магнитометре, в проведении измерений электросопротивления при разных температурах и в отработке и оптимизации методики термомагнитной обработки образцов на автоматизированной установке, сконструированной на базе электромагнита и криостата при участии автора. Автором лично проведены обработка и анализ экспериментальных данных. Обсуждение полученных результатов и подготовка публикаций проводились автором совместно с Л.И. Наумовой и М.А. Миляевым. Результаты исследований докладывались диссертантом на всероссийских и международных конференциях.

Соответствие диссертации паспорту специальности. Содержание диссертации соответствует пункту 3 «Исследование изменений различных физических свойств вещества, связанных с изменением их магнитных состояний и магнитных свойств» и пункту 5 «Разработка различных магнитных материалов, технологических приёмов, направленных на улучшение их характеристик, приборов и устройств, основанных на использовании магнитных явлений и материалов» паспорта специальности 01.04.11 – Физика магнитных явлений.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка условных обозначений и списка используемой литературы. Общий объем диссертации составляет 149 страниц, в тексте содержится 4 таблицы, 99 рисунков. Список литературы содержит 156 наименований на 12 страницах.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель и задачи исследования, аргументирована научная новизна и показана практическая значимость полученных результатов, изложены положения, выносимые на защиту, и кратко описана структура диссертации.

В первой главе приводится краткое изложение основных экспериментальных и обзорных статей, посвященных физическим

принципам, объясняющим магнитные и магниторезистивные свойства обычных спиновых клапанов и спиновых клапанов с синтетическими ферри(антиферро-)магнетиками. Рассматривается взаимодействие между ферромагнитными слоями и обменное взаимодействие, возникающее на границе между ферромагнитным и антиферромагнитным слоем, влияние микроструктуры слоев на свойства спиновых клапанов. Особое внимание уделяется магнитной анизотропии и взаимной ориентации осей анизотропии в спиновом клапане: оси легкого намагничивания и оси однонаправленной анизотропии. Описаны особенности воздействия на однонаправленную анизотропию с использованием спин-флуп состояния САФ и термомагнитной обработки.

Во второй главе описана методика синтеза многослойных металлических наноструктур при помощи магнетронного напыления, методика контроля шероховатости подложек и измерения скорости напыления при помощи оптической интерферометрии. Приведено описание методов измерения полевых зависимостей намагниченности и магнитосопротивления на вибрационном магнитометре, методов термомагнитной обработки на установке температурных измерений сопротивления. Описаны методы исследования микроструктуры слоев при помощи рентгеновской дифрактометрии и просвечивающей электронной микроскопии. А также показаны методы синтеза микрообъектов из пленочных наноструктур с помощью литографического оборудования.

В третьей главе приведены результаты исследования свойств спиновых клапанов композиции $\text{Si}/\text{Ta}(50)/\text{Gd}(t_{\text{Gd}})/\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}(40)/\text{Cu}(32)/\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}(40)/\text{Fe}_{50}\text{Mn}_{50}(150)/\text{Ta}(50)$ с обменно-связанной парой Gd/CoFe в свободном слое. Толщина слоев, здесь и далее приведены в \AA . Они были выбраны таким образом, чтобы магниторезистивная кривая имела характерную для спинового клапана форму и наблюдалось наибольшее магнитосопротивление. Толщина слоя Gd принимала значения $t_{\text{Gd}} = 0, 30, 50, 100, 150, 200$ и 300\AA .

Для исследованных образцов формы полевых зависимостей намагниченности и магнитосопротивления при комнатной температуре являются типичными для обычных спиновых клапанов. В частности, на кривых перемагничивания у них наблюдаются две петли гистерезиса, соответствующие перемагничиванию свободного и закрепленного ферромагнитных слоев (рис.1). Величина намагниченности свободного слоя (высота низкополевой петли гистерезиса) для образцов с $t_{\text{Gd}}=30, 50, 100$ и 150\AA почти равны друг другу, а для образца без Gd было получено наибольшее значение намагниченности. Причина этого различия заключается в том, что слой Gd является парамагнитным при 20°C , за исключением тонкой области вблизи границы слоев Gd и сплава CoFe , в которой сохраняется ферромагнитное упорядочение. Из-за наличия антиферромагнитного обменного взаимодействия на границе $\text{Gd}-\text{CoFe}$

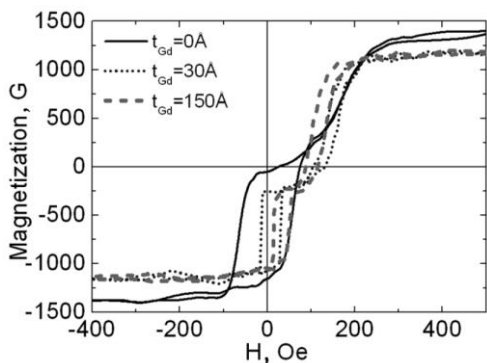


Рис.1. Полевые зависимости намагниченности спиновых клапанов с $t_{\text{Gd}}=0, 30$ и 150 \AA (сплошная, пунктирная и штриховая линии, соответственно).

инвертированный. Величина магнитосопротивления в спиновом клапане зависит от угла между магнитными моментами слоев сплава CoFe, в составе свободного и закрепленного слоев. Сопротивление спинового клапана будет минимальным, если моменты CoFe в свободном и закрепленном слоях сонаправлены и максимальным, если они противоположны.

На рис.2 показаны полевые зависимости магнитосопротивления образца с $t_{\text{Gd}} = 100 \text{ \AA}$, измеренные в начале и конце температурного интервала, в котором происходит инверсия формы магниторезистивной кривой. Видно, что в области слабого магнитного поля при понижении температуры от $T=163 \text{ K}$ (1) до $T=143 \text{ K}$ (2) наблюдается переход от максимальной к минимальной величине магнитосопротивления.

Для объяснения наблюдаемых изменений мы предполагаем, что перемagnичивание свободного слоя Gd/CoFe и закрепленного слоя CoFe происходит путем когерентного вращения намагниченности. Также принимаем во внимание, что спин-зависимое рассеяние электронов проводимости в слое Gd, являющимся $4-f$ металлом, мало, поэтому изменение направления его магнитного момента не оказывает влияния на электросопротивления спинового клапана. Магнитный момент слоя Gd возрастает по мере того, как температура уменьшается, и становится равным магнитному моменту слоя CoFe при температуре компенсации (T_{comp}) синтетического ферромагнетика. Тогда сумма магнитного момента обменной пары Gd/CoFe близка к нулю, ориентации магнитных моментов CoFe и Gd относительно приложенного магнитного поля не зависят от напряженности поля, а значение $(\Delta R/R_s)_{\text{max}}$ близко к нулю при температуре компенсации. С дальнейшим уменьшением температуры до $T=143 \text{ K}$ магнитный момент слоя Gd превышает магнитный момент слоя CoFe и ориентируется вдоль магнитного поля. В этом случае магнитные моменты

магнитный момент в этой области слоя Gd направлен антипараллельно по отношению к магнитному моменту слоя CoFe, что объясняет наблюдаемое на эксперименте уменьшение намагниченности спиновых клапанов.

Установлено, что в определенном интервале температур вид магниторезистивных кривых для спиновых клапанов со слоем Gd меняется на

CoFe в свободном и закреплённом слоях становятся параллельны друг другу в слабых магнитных полях, на полевой зависимости магнитосопротивления наблюдается минимум.

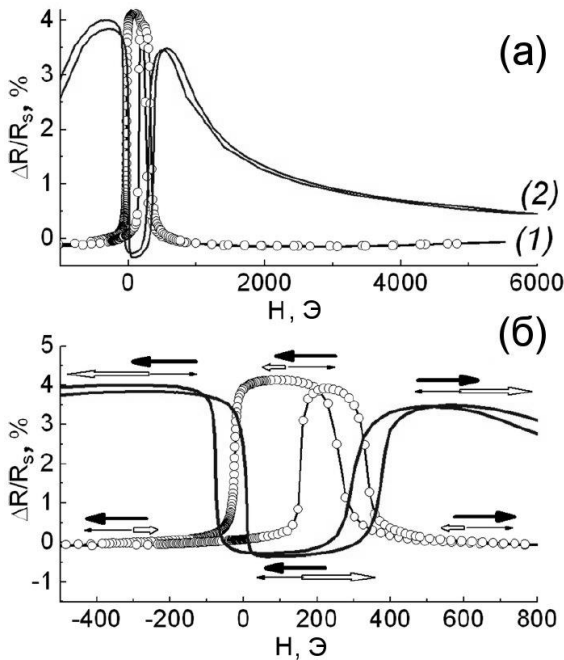


Рис.2. Полевые зависимости магнитосопротивления для спинового клапана с $t_{\text{Gd}} = 100 \text{ \AA}$, измеренные при $T=163 \text{ K}$ (открытые символы, (1)) и при $T=143 \text{ K}$ (сплошная линия, (2)) (а). Низкополевые части зависимостей $(\Delta R/R_s)(H)$. Направления магнитных моментов закреплённого слоя CoFe, и слоев CoFe и Gd в составе свободного слоя показаны схематично толстыми, тонкими и пустыми стрелками, соответственно (б).

Из рис. 2(б) видно, что при фиксированной величине магнитного поля, например, $H = 200 \text{ Э}$, должен происходить переход с изменением ориентации результирующей намагниченности пары слоев Gd/CoFe, сопровождаемый изменением сопротивления спинового клапана. Проведенные исследования температурных зависимостей сопротивления в поле $H = 200 \text{ Э}$ показали наличие в исследованных спиновых клапанах переходов между состояниями с низким и высоким электросопротивлением, а также наличие температурного гистерезиса.

Для спиновых клапанов с разной толщиной слоя гадолиния петля температурного гистерезиса на зависимости $R(T)$ наблюдалась в разных интервалах температур. Чем больше толщина слоя Gd, тем выше температура, при которой происходят изменения в магнитном состоянии спинового клапана.

На рис. 3 показаны петли температурного гистерезиса сопротивления, полученные для образцов с разными толщинами слоя гадолиния, перестроенные с вычетом обычной линейной температурной зависимости и нормированные на минимальное за весь цикл изменение

сопротивления. По положению середины петель (рис.3) можно судить о температуре компенсации синтетического ферритмагнетика Gd/CoFe. На рис.4 построена зависимость температуры компенсации, от толщины слоя гадолиния в спиновом клапане. Определенная таким образом величина T_{comp} будет равна температуре компенсации в случае, если магнитные моменты Gd и CoFe равны по величине, противоположны по направлению и не выходят из плоскости пленки. Как видно, изменение t_{Gd} от 50 до 200 Å приводит к возрастанию величины T_{comp} . Однако, при дальнейшем увеличении толщины слоя Gd до 300 Å T_{comp} не возрастает, а наоборот, несколько уменьшается. Возможной причиной этого является происходящие изменения в кристаллической структуре слоя гадолиния с увеличением его толщины. Для проверки данного предположения были проведены исследования структуры спиновых клапанов.

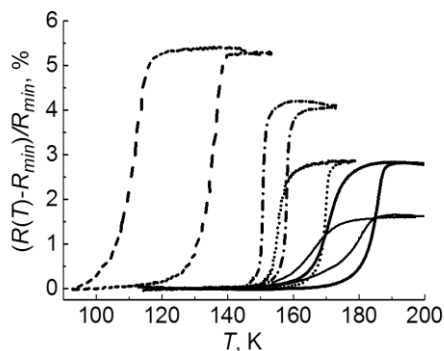


Рис.3. Петли температурного гистерезиса сопротивления, измеренные в магнитном поле 200 Э для спиновых клапанов с t_{Gd} : 50 Å (штриховая), 100 Å (штрихпунктирная), 150 Å (пунктирная), 200 Å (жирная) и 300 Å (тонкая линия).

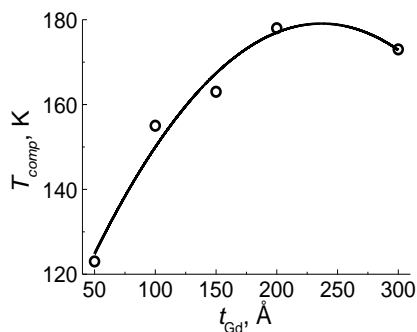


Рис.4. Зависимость температуры, при которой проекция намагниченности пары Gd/CoFe на плоскость пленки равна нулю, от толщины слоя гадолиния.

На дифрактограммах, приведенных на рис.5, для всех спиновых клапанов имеется пик (200) Si от подложки. При толщине $t_{\text{Gd}} = 300$ Å присутствуют отдельные пики, как от ГПУ, так и от ГЦК структуры. При меньших толщинах слоя гадолиния (50 до 150 Å) рефлексы (111) ГЦК и (0002) ГПУ видны как единый пик, который смещается в сторону больших углов 2θ при увеличении t_{Gd} . Это говорит о том, что с увеличением толщины слоя Gd соотношение между ГПУ и ГЦК фазами гадолиния меняется в сторону увеличения количества гексагональной фазы. Интенсивность отдельного пика (111) ГЦК, измеренного для $t_{\text{Gd}} = 300$ Å, позволяет предположить, что рост кубической фазы происходит вплоть до толщины слоя гадолиния $150 \text{ Å} < t_{\text{Gd}} \leq 300 \text{ Å}$. В данном интервале толщин

формируется также и полноценная ГПУ фаза гадолиния, и согласно исследованиям текстуры, формируется также аксиальная текстура $\langle 0002 \rangle$, ось которой перпендикулярна плоскости пленки. Для объемного гадолиния направление $[0001]$ является осью легкого намагничивания. При увеличении толщины слоя Gd, например, до $t_{Gd} = 300 \text{ \AA}$, в части кристаллитов формируется ГПУ фаза, и в них становится значимым вклад от магнитокристаллической анизотропии, благодаря которой ОЛН отклоняется от плоскости пленки на некоторый угол. При этом проекция результирующего магнитного момента слоя Gd на плоскость пленки уменьшается, что объясняет обнаруженное на эксперименте уменьшение температуры компенсации для пары слоев Gd/CoFe.

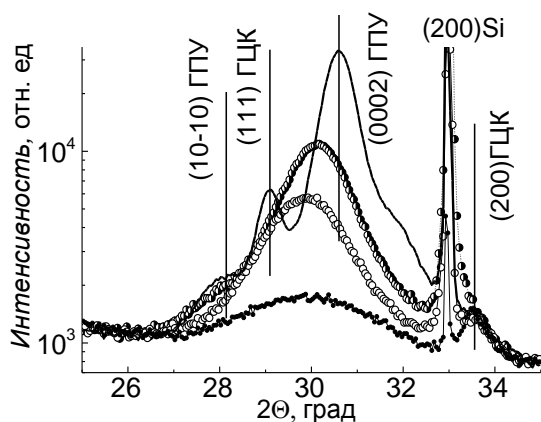


Рис. 5. Дифрактограммы спиновых клапанов, с t_{Gd} : 50 Å (темные символы), 100 Å (светлые символы), 150 Å (наполовину темные символы), и 300 Å (линия), полученные в излучении Cu Kα.

магнитными состояниями, характеризующимися максимальным и минимальным сопротивлением. Температура переключения зависит от толщины слоя Gd.

В четвертой главе исследованы свойства макроскопических по размерам спиновых клапанов с синтетическим ферромагнетиком – обменно-связанной трехслойной структурой CoFe/Ru/CoFe, в которой толщина слоев CoFe различна. В литературе для подобной трехслойной наноструктуры часто используют термин «синтетический антиферромагнетик» безотносительно к толщине ферромагнитных слоев. Целью данных исследований была разработка эффективных способов управления взаимным расположением осей анизотропии (ОЛН в свободном

Таким образом, исследованы низкотемпературные особенности магнитотранспортных свойств спиновых клапанов с синтетическим ферромагнетиком Gd/CoFe. Показано, что в фиксированном магнитном поле в спиновых клапанах с Gd/CoFe при изменении температуры вблизи температуры компенсации в свободном слое происходит переключение между

слое и ООА в закреплённом слое) и получение в спиновых клапанах состояния со скрещенной конфигурацией осей анизотропии, для которой характерным является почти безгистерезисное изменение магнитосопротивления в слабых магнитных полях. Для этой цели был приготовлен спиновый клапан стекло//Ta(50)/Ni₈₀Fe₂₀(30)/Co₉₀Fe₁₀(35)/Cu(28)/Co₉₀Fe₁₀(35)/Ru(8)/Co₉₀Fe₁₀(30)/Fe₅₀Mn₅₀(100)/Ta(20) с синтетическим ферримагнетиком в составе закреплённого слоя и использованы два вида термомагнитной обработки (ТМО).

Способность САФ переходить в спин-флоп состояние при определенном значении магнитного поля использовалась при первом типе ТМО. На рис. 6 приведена полевая зависимость магнитосопротивления спинового клапана, измеренная при температуре 180 °С, превышающей температуру блокировки в случае использования антиферромагнетика FeMn. При указанной температуре полевая зависимость магнитосопротивления становится симметричной по отношению к $H = 0$ (рис. 6). Максимумы сопротивления, обусловленные антипараллельной взаимной ориентацией намагниченностей слоев CoFe в САФ,

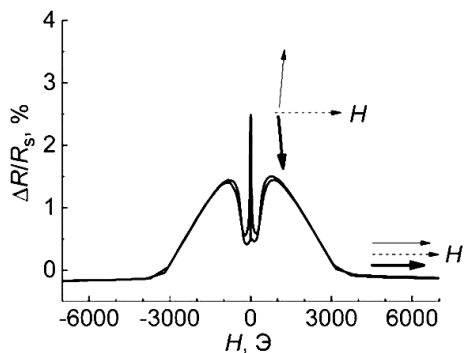


Рис. 6. Полевая зависимость магнитосопротивления спинового клапана. Стрелки показывают схематично направления намагниченностей слоев CoFe в САФ.

наблюдаются в магнитном поле $|0.7|$ кЭ. В данном поле вектора намагниченностей этих слоев отклонены от ОЛН и магнитного поля на угол, близкий к 90° , то есть САФ находится в спин-флоп состоянии. Последующее охлаждение спинового клапана в поле $H_{sf} = |0.7|$ кЭ приводит к формированию новой ООА, направленной взаимно перпендикулярно ОЛН. Однако, если поле приложено строго параллельно исходной ООА, то после ТМО в спиновом клапане формируется две оси

однаправленной анизотропии, противоположные друг другу по направлению и перпендикулярные ОЛН (рис. 7). На магниторезистивной кривой для спинового клапана в этом случае присутствует две высокополевых петли гистерезиса магнитосопротивления (сплошная линия на рис.7). Это возможно, если при ТМО в одних участках образца поворот намагниченности слоя CoFe, соседнего с FeMn, происходил по часовой стрелке, а в других — против. Разбиение образца на такие области привело

к закономерному уменьшению величины максимального магнитосопротивления и изменению формы кривой.

Чтобы избежать энергетической эквивалентности двух состояний, перед проведением ТМО образец был повернут так, чтобы приложенное магнитное поле H_{sf} было отклонено от ОЛН и исходной ООА на 5° . Полевая зависимость магнитосопротивления, полученная после изменения положения образца, показана на рис.7 штриховой линией. В данном случае величина максимального магнитосопротивления не уменьшилась по сравнению с исходной. На зависимости присутствует только одна высокополевая петля гистерезиса, что указывает на формирование однофазного состояния по всей площади образца с одним направлением новой ООА, причем $ООА \perp ОЛН$.

На рис. 8 штриховой и сплошной линией показаны низкополевые части магниторезистивных кривых для случаев коллинеарной и «почти скрещенной» конфигурации осей анизотропии в спиновом клапане. Во втором случае перемагничивание свободного слоя происходит практически без гистерезиса – $H_c = 0.3$ Э на полувысоте наклонного участка кривой.

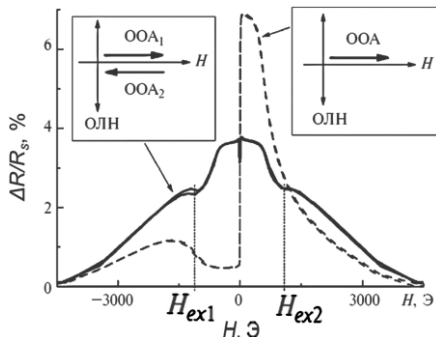


Рис.7. Полевые зависимости магнитосопротивления спинового клапана после ТМО в поле H_{sf} , приложенном параллельно ОЛН (сплошная линия), и с отклонением от ОЛН на 5° (штриховая линия).

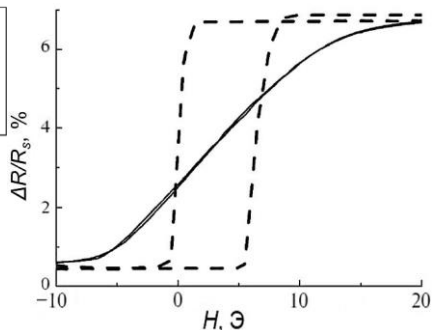


Рис.8. Низкополевые петли гистерезиса магнитосопротивления спинового клапана с конфигурацией $ООА \parallel ОЛН$ (штриховая линия) и $ООА \perp ОЛН$ (сплошная линия).

Второй способ ТМО отличается тем, что при охлаждении спинового клапана с САФ магнитное поле, превышающее поле магнитного насыщения (9 кЭ), прикладывалось перпендикулярно ОЛН. После данной ТМО ширина низкополевой петли гистерезиса уменьшилась до 0.1 Э лишь при дополнительном отклонении магнитного поля от ООА при измерении на 10° , что в добавление уменьшает гистерезис. При этом полученные значения чувствительности оказались неодинаковыми для двух видов ТМО (рис. 9). Показано, что эти различия связаны с тем, что ТМО в поле,

приложенном параллельно ОЛН, могут быть связаны с повышением поля наведенной одноосной анизотропии в свободном слое.

Для оценки изменения поля наведенной анизотропии H_a , происходящего при ТМО, структура, аналогичная свободному слою спинового клапана, стекло//Ta(50)/Ni₈₀Fe₂₀(20)/Co₉₀Fe₁₀(55)/Ta(20), нагревалась при температуре 180°C в течение 1 часа: (а) - в поле, приложенном параллельно ОЛН; (б) - в поле, приложенном перпендикулярно ОЛН. На рис. 10 показаны петли магнитного гистерезиса для данной структуры, измеренные вдоль оси легкого и трудного намагничивания. На рис. 10 также показан способ оценки величины поля наведенной анизотропии по полученным экспериментальным данным: видно, что после ТМО при $\mathbf{H} \parallel$ ОЛН поле наведенной анизотропии больше (а), чем после ТМО при $\mathbf{H} \perp$ ОЛН (б).

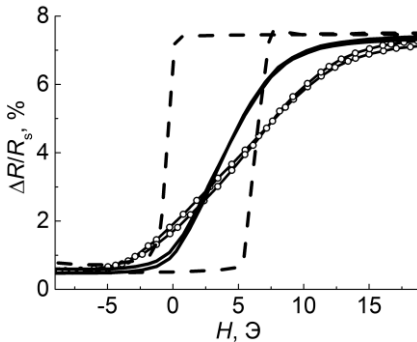


Рис.9. Низкополевые петли магнитосопротивления для спинового клапана с конфигурацией ООА \parallel ОЛН (штриховая линия) и ООА \perp ОЛН, сформированной при ТМО в магнитном поле, приложенном вдоль (светлые символы) и перпендикулярно ОЛН (линия).

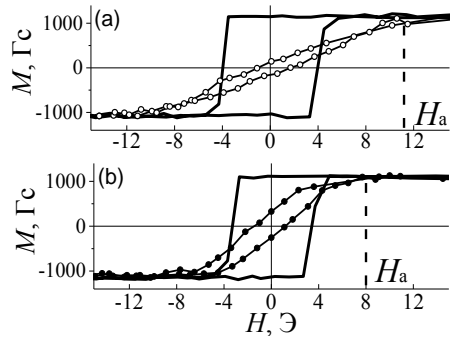


Рис.10. Петли гистерезиса намагничённости свободного слоя спинового клапана, измеренные вдоль (линии) и перпендикулярно (линии с символами) ОЛН, после ТМО в магнитном поле, приложенном вдоль (а) и перпендикулярно ОЛН (б).

На рис. 8, 9 линейная часть безгистерезисной полевой зависимости магнитосопротивления сдвинута относительно $H = 0$. Для сенсоров слабых магнитных полей, необходимо, чтобы зависимость $\Delta R/R_s(H)$ была расположена симметрично относительно значения $H = 0$. Для этого изготавливают микрообъекты в виде узких полосок с шириной в несколько микрон, при этом чувствительность материала к магнитному полю уменьшается в десятки раз. В данной работе предложен иной способ управления сдвигом низкополевой петли гистерезиса, не приводящий к

снижению чувствительности. Он связан с использованием синтетического ферримагнетика в составе свободного слоя.

В спиновых клапанах композиции стекло//Ta(50)/Ni₈₀Fe₂₀(30)/Ru(*t*_{Ru})/Ni₈₀Fe₂₀(15)/Co₉₀Fe₁₀(35)/Cu(25)/Co₉₀Fe₁₀(35)/Ru(8)/Co₉₀Fe₁₀(30)/Fe₅₀Mn₅₀(100)/Ta(20) толщина слоя рутения в свободном слое принимала значения: *t*_{Ru}=8, 10, 11, 12, 14 Å. Толщина слоя Ru определяет интенсивность и знак межслойного обменного взаимодействия в структуре NiFe/Ru/NiFe, что позволяет изменять тип магнитного упорядочения с антиферромагнитного (при *t*_{Ru} = 8 Å) на ферромагнитное (при *t*_{Ru} = 14 Å) и, соответственно, изменять эффективный магнитный момент данной структуры. Чем магнитный момент больше, тем в меньшем поле произойдет поворот намагниченности, и тем меньше будет сдвиг низкополевой петли гистерезиса. Данное предположение подтверждается полученными результатами, представленными на рис. 11. Из рис. 12 также видно, что уменьшение сдвига низкополевой петли гистерезиса (*H*_г) сопровождается возрастанием магниторезистивной чувствительности (*S*).

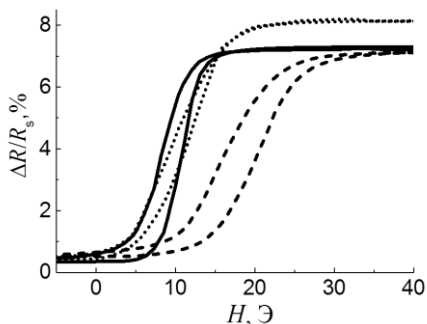


Рис.11. Низкополевые петли магнитосопротивления для спиновых клапанов с *t*_{Ru}: 8 Å (штриховая), 11 Å (пунктирная) и 14 Å (сплошная линии).

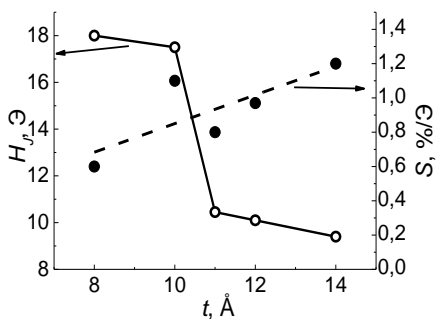


Рис.12. Зависимость сдвига петли гистерезиса (светлые символы) и магниторезистивной чувствительности спинового клапана (темные символы) от *t*_{Ru}.

В пятой главе описаны свойства микрообъектов, изготовленных методами литографии из спиновых клапанов. Описанные выше способы оптимизации функциональных характеристик спиновых клапанов в образцах макроскопических размеров были использованы для решения аналогичных задач в микрополосках разной ширины и меандрах, отличающихся формой изгибов.

Для выяснения особенностей влияния анизотропии формы на магниторезистивную чувствительность из пленки спинового клапана стекло//Ta(50)/Ni₈₀Fe₂₀(30)/Co₉₀Fe₁₀(35)/Cu(28)/Co₉₀Fe₁₀(35)/Ru(8)/Co₉₀Fe₁₀(25)/Fe₅₀Mn₅₀(100)/Ta(20) были приготовлены полоски длиной 8 мм

и шириной $w=20, 40, 70, 85$ и 100 мкм. Полоски формировались таким образом, чтобы ОЛН была направлена вдоль полосы. В полосках двумя режимами ТМО сформирована конфигурация осей анизотропии: $OOA \perp OLN$. Установлено, что для всех образцов наблюдается близкий к линейному рост чувствительности при увеличении ширины полосы (рис.13). В результате ТМО в поле H_{sf} , приложенном параллельно ОЛН, значения чувствительности оказались ниже, чем после ТМО в поле 9 кЭ, приложенном перпендикулярно ОЛН. Из рис. 14 видно, что сдвиг петли гистерезиса от положения $H = 0$ увеличивается с ростом ширины полосы, независимо от режима ТМО. Видно также, что с увеличением w наклонный участок зависимости $\Delta R/R_s(H)$ становится более крутым.

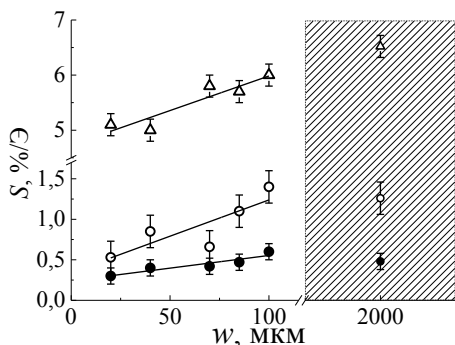


Рис.13. Зависимости магниторезистивной чувствительности от ширины полосы спиновых клапанов с конфигурацией $OOA \parallel OLN$ (треугольники) и $OOA \perp OLN$ анизотропии, сформированной ТМО при $H_{sf} \parallel OLN$ (темные символы) и $H \perp OLN$ (светлые символы).

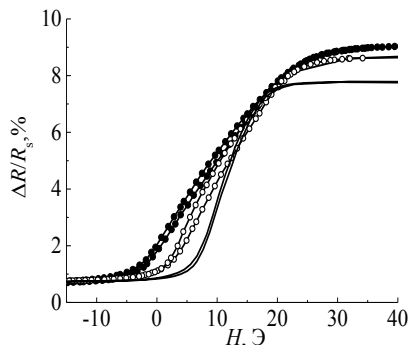


Рис.14. Низкополевые петли магнитосопротивления, измеренные после ТМО в поле H_{sf} для полосок $w=20$ мкм (линия с темными символами), 70 мкм (линия со светлыми символами) и 100 мкм (сплошная линия).

Для интерпретации зависимостей $S(w)$ приведены оценки величины эффективного поля анизотропии, которое в данном случае складывается из наведенной анизотропии и анизотропии формы: $H_{eff} = 2 K_u / M_s + 4\pi M_s t / w$, где K_u – константа анизотропии; M_s – намагниченность в поле насыщения. При увеличении ширины полосы от 20 до 100 мкм вклад от анизотропии формы уменьшается от 4.1 до 0.8 Э. Уменьшение эффективного поля анизотропии в свободном слое приводит к уменьшению интервала магнитного поля, в котором происходит переключение намагниченности, что означает также возрастание магниторезистивной чувствительности.

Аналогичная тенденция зависимости сдвига низкополевой петли гистерезиса и магниторезистивной чувствительности была получена для микрополосок меньших геометрических размеров (длиной 60 мкм и шириной $w = 4, 8, 16, 20, 60$ и 80 мкм), изготовленных из спиновых клапанов с обменно-связанной структурой NiFe/Ru/NiFe в свободном слое: стекло//Ta(50)/Ni₈₀Fe₂₀(30)/Ru(14)/Ni₈₀Fe₂₀(15)/Co₉₀Fe₁₀(35)/Cu(25)/Co₉₀Fe₁₀(35)/Ru(8)/Co₉₀Fe₁₀(30)/FeMn(100)/Ta(20). На рис. 15 показано, что снижение магниторезистивной чувствительности с уменьшением ширины микрообъекта, обусловленное анизотропией формы, сопровождается сдвигом низкополевой петли гистерезиса в направлении к $H = 0$.

На рис.16 представлены низкополевые части магниторезистивных кривых для микрообъектов шириной 4, 8 и 80 мкм. Оптимальным сочетанием характеристик обладает микрополоска шириной 8 мкм

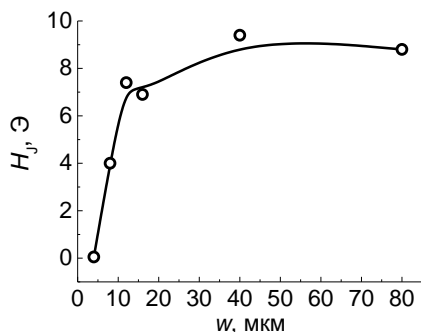


Рис.15. Зависимость значений поля смещения низкополевой петли гистерезиса от ширины микрополоски.

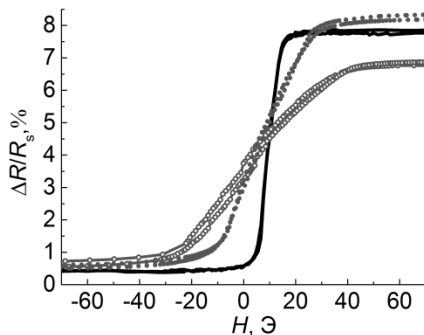


Рис.16. Низкополевые части магниторезистивных кривых для микрополосок с $w = 4$ мкм (светлые символы), 8 мкм (пунктирная линия) и 80 мкм (линия).

Меандр является часто используемой в микроэлектронике формой сенсорного элемента, так как позволяет изготовить датчик, обладающий достаточно большим электросопротивлением. В меандрах, изготовленных из спиновых клапанов стекло//Ta(50)/Ni₈₀Fe₂₀(25)/Ru(t_{Ru})/Ni₈₀Fe₂₀(35)/Co₉₀Fe₁₀(35)/Cu(t_{Cu})/Co₉₀Fe₁₀(35)/Ru(8)/Co₉₀Fe₁₀(30)/Fe₅₀Mn₅₀(100)/Ta(50), была сформирована конфигурация ООА⊥ОЛН. ОЛН была направлена вдоль полосок. Известно, что увеличение толщины слоя меди приводит к уменьшению сдвига низкополевой петли гистерезиса от $H=0$ и уменьшению наклона петли [13], поэтому были взяты несколько толщин: $t_{Cu} = 28, 32$ и 36 Å.

Показано, что для образцов с разной толщиной медного слоя условие $H_j \approx 0$ реализуется при разных значениях ширины полос меандра (рис. 17).

Для меандра с шириной полосы 10 мкм чувствительность составила 0.60%/Э.

Полученные $\Delta R/R_s(H)$ зависимости являются гистерезисными. В ряде публикаций [9] отмечается, что перемагничивание в наноструктурах в форме меандра происходит посредством смещения доменных стенок и является гистерезисным при любом направлении магнитного поля по отношению к осям анизотропии в спиновом клапане.

Нами найден режим ТМО, позволяющий реализовать безгистерезисное перемагничивание в сенсорном элементе, имеющем

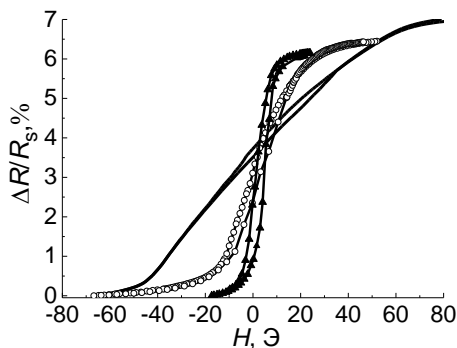


Рис.17. Полевые зависимости магнитосопротивления спиновых клапанов с $t_{Ru} = 12 \text{ \AA}$, изготовленных в форме меандров с шириной полос $w = 2 \text{ мкм}$ и $t_{Cu} = 28 \text{ \AA}$ (линия), $w = 6 \text{ мкм}$ и $t_{Cu} = 32 \text{ \AA}$ (светлые символы) и $w = 10 \text{ мкм}$ и $t_{Cu} = 36 \text{ \AA}$ (темные символы).

в разных полях.

Разработанные методы оптимизации магнитотранспортных и гистерезисных свойств сенсоров на основе описанных спиновых клапанов были использованы для реализации безгистерезисного перемагничивания меандров, изготовленных из спинового клапана другой композиции. На рис. 19 приведена низкополевая часть магниторезистивной кривой после ТМО для такого спинового клапана, обладающего следующими характеристиками: величина максимального магнитосопротивления $\Delta R/R_s(H) = 10 \%$, $R = 0.25 \text{ кОм}$ магниторезистивная чувствительность 0.46 %/Э и практически отсутствующий гистерезис $H_c < 0.1 \text{ Э}$.

Для сравнения у элементов субмикронных размеров чувствительность 0.28–0.37 %/Э была получена лишь при использовании специальных концентраторов, усиливающих магнитный поток [14].

форму меандра. Три вида меандров с $w = 10 \text{ мкм}$ отличались между собой длиной полос и формой U-изгибов. При ТМО использовали поле, превышающее по величине поле спин-флоп состояния САФ (H_{sf}): в интервале: $-0.5 \text{ кЭ} \geq H \geq -1.1 \text{ кЭ}$ безгистерезисное перемагничивание было получено для всех трех типов меандров, что соответствует углу ε , между ООА и ОЛН $110^\circ \geq \varepsilon \geq 130^\circ$. На рис. 18 показаны низкополевые петли гистерезиса магнитосопротивления спинового клапана, после ТМО

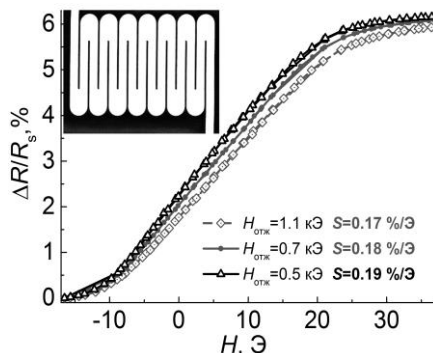


Рис. 18. Низкополевые части магниторезистивных кривых для меандров с длиной полосы 120 мкм и U-изгибом шириной 30 мкм после ТМО в разных полях. Для каждой зависимости $\Delta R/R_s(H)$ указаны значения магниторезистивной чувствительности.

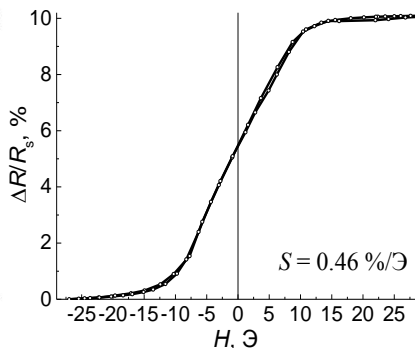


Рис. 19. Полевая зависимость магнитосопротивления спинового клапана
 $\text{Ta}/(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{60}\text{Cr}_{40}/\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{10}/\text{Cu}/$
 $/\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{10}/\text{Ru}/\text{Co}_{70}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{10}/\text{FeMn}/\text{Ta}$ в форме меандра с шириной полос $w=30$ мкм.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Проведены исследования магнитных и магниторезистивных свойств и структуры спиновых клапанов на основе антиферромагнетика $\text{Fe}_{50}\text{Mn}_{50}$ и различных синтетических ферримагнетиков: $\text{Gd}/\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$, $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Ru}/\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$, $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Ru}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$. Изучено влияние композиции спиновых клапанов и особенностей наведенной магнитной анизотропии на их функциональные характеристики.

2. Показано, что использование слоя гадолиния в свободном слое Gd/CoFe приводит к появлению температуры компенсации, зависящей от толщины слоя Gd . Спиновые клапаны со свободным слоем Gd/CoFe испытывают переход между состояниями с низким и высоким сопротивлением при изменении температуры вблизи температуры компенсации при фиксированной напряженности магнитного поля. При нагреве и охлаждении образцов на температурной зависимости сопротивления вблизи температуры компенсации наблюдается гистерезис.

3. При формировании «почти скрещенной» конфигурации осей магнитной анизотропии с помощью термомагнитной обработки в поле, соответствующему спин-флоп состоянию синтетического антиферромагнетика $\text{CoFe}/\text{Ru}/\text{CoFe}$, в спиновом клапане формируется однофазное состояние с выделенным направлением оси однонаправленной анизотропии. Данное состояние характеризуется резким изменением сопротивления вблизи нулевого магнитного поля и малым гистерезисом магнитосопротивления.

4. Установлено, что изменение толщины слоя рутения с 8 до 14 Å в обменно-связанной структуре NiFe/Ru/NiFe, входящей в состав свободного слоя спинового клапана, уменьшает поле переключения свободного слоя и приводит к увеличению чувствительности.

5. Найден способ термомагнитной обработки, позволяющий корректировать угол между осями магнитной анизотропии и их направление с учетом формы микрообъекта, что позволяет реализовать безгистерезисный механизм перемагничивания свободного слоя в меандрах, изготовленных на основе спиновых клапанов.

6. На основе развитых методов оптимизации функциональных характеристик спиновых клапанов с синтетическим ферритмагнетиком были изготовлены сенсорные элементы в виде меандров с магнитосопротивлением 10%, гистерезисом около 0.1 Э, чувствительностью 0.46 %/Э и линейным изменением магнитосопротивления в диапазоне магнитного поля ± 10 Э.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1. Anhyseretic magnetic reversal of meander-shaped spin valve with synthetic antiferromagnet / Т. Chernyshova, L. Naumova, A. Pavlova, I. Maksimova, M. Milyaev, V. Proglyado, E. Patrakov, V. Ustinov // Sensors and actuators.: A. Physical. – 2019. – V.285. – P. 73-79.

2. Микроструктура и магнитные свойства нанослоя гадолия в термочувствительном спиновом клапане / Л.И. Наумова, М.А. Миляев, Т.П. Криницина, В.В. Макаров, М.В. Рябухина, Т.А. Чернышова, И.К. Максимова, В.В. Проглядо, В.В. Устинов // ФММ. - 2018. –Т.119. - №9.- С.867-875.

3. Спиновые клапаны с управляемым смещением низкосолевой петли гистерезиса и высокочувствительные сенсорные элементы на их основе / Т.А. Чернышова, М.А. Миляев, Л.И. Наумова, И.К. Максимова, А.Ю. Павлова, Е.И. Патраков, Н.С. Банникова, В.В. Проглядо, В.В. Устинов // ФММ. - 2018. –Т. 119. - №6.- С. 561-566.

4. Magnetization reversal and inverted magnetoresistance of exchange-biased spin valves with a gadolinium layer / M. Milyaev, L. Naumova, T. Chernyshova, V. Proglyado, I. Kamensky, T. Krinitsina, M. Ryabukhina, V. Ustinov // J. Appl. Phys.- 2017. - V. 121. - P. 123902-1239906.

5. Управление смещением низкосолевой петли гистерезиса спиновых клапанов / Т.А.Чернышова, М.А.Миляев, Л.И.Наумова, В.В.Проглядо, И.К.Максимова, А.Ю.Павлова, Д.В.Благodatков, В.В.Устинов // ФММ. - 2017. - Т.118. - №12. - С.1277-1283.

6. Магниторезистивная чувствительность и одноосная анизотропия микрополосок спиновых клапанов с синтетическим антиферромагнетиком / Т.А. Чернышова, М.А. Миляев, Л.И. Наумова, В.В. Проглядо, Н.С.

Банникова, И.К. Максимова, И.А. Петров, В.В. Устинов // ФММ. - 2017. –Т. 118. - №5. - С.439-445.

7. Магнитная анизотропия и гистерезис в двойных спиновых клапанах/ М.А. Миляев, Л.И. Наумова, Т.А. Чернышова, В.В. Проглядо, И.Ю. Каменский, Н.С. Банникова, В.В. Устинов // Естеств. и техн. науки. - 2016. - №11. – С.20-24.

8. Безгистерезисные спиновые клапаны с синтетическим антиферромагнетиком и управляемой магниторезистивной чувствительностью/ Л.И. Наумова, М.А. Миляев, Т.А. Чернышова, В.В. Проглядо, Н.С. Банникова, Т.П. Криницина, В.В. Устинов // Естеств. и техн. науки. – 2015.- № 10. - С.92-96.

9. Формирование спин-флоп фазы в спиновых клапанах с синтетическим антиферромагнетиком / Л.И. Наумова, М.А. Миляев, Т.А. Чернышова, В.В. Проглядо, Н.С. Банникова, Т.П. Криницина, В.В. Устинов // Наноинженерия. -2015. - № 12. –С.15-19.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Magnetotransport properties of magnetically soft spin-valve structures / V. Dieny, V.S. Speriosu, S. Metin, S.S.P. Parkin, B.A. Gurney, P. Baumgart, D.R. Wilhoit // J.Appl.Phys. - 1991. - V.69. - P.4774(1-9).

2. Spin Valves with Synthetic Ferrimagnets / V.S. Speriosu, B.A. Gurney, D.R. Withoit, L.B. Brown // IEEE International Magnetics Conference (INTERMAG).-1996. –Digest AA-04.

3. PtMn spin valve with synthetic ferrimagnet free and pinned layers / M. Saito, N. Hasegawa, K. Tanaka, Y. Ide, F. Koike, T. Kuriyama // J. Appl. Phys. - 2000. - V.87. – P.6974-6976.

4. Veloso, A. Spin valve sensors with synthetic free and pinned layers / A. Veloso, P. P. Freitas // J.Appl.Phys. - 2000. - V.87(9) - P. 5744-5746.

5. Effective anisotropy field in the free layer of patterned spin-valve resistors / Zh. Qian, R. Bai, Ch. Yang, Q. Li, Yuch. Sun, D. Huo, L. Li, H. Zhan, J. Zhu // J. Appl. Phys. – 2011. - V.109. - P.103904 (1-5).

6. Безгистерезисное перемагничивание спиновых клапанов с сильным и слабым межслойным взаимодействием / Л.И. Наумова, М.А. Миляев, Н.Г. Бебенин, Т.А. Чернышова, В.В. Проглядо, Т.П. Криницина, Н.С. Банникова, В.В. Устинов // ФММ. – 2014. - Т.115(4). - С.376-383.

7. Magnetoresistance in Ni80Fe20/Cu/Ni80Fe20/Fe50Mn50 spin valves with low coercivity and ultrahigh sensitivity / H.G.S.M. Rijks, W.J.M. de Jonge, W. Folkerts, J.C.S. Kools, R. Coehoorn // Appl. Phys. Lett. - 1994. - V.65 (7). - P.916-918.

8. On the control of spin flop in synthetic antiferromagnetic films / B. Negulescu, D. Lacour, M. Hehn, A. Gerken, J. Paul, C. Duret // J. Appl. Phys. - 2011.- V.109. – P.103911 (1-9).

9. Magnetization Processes in Spin-Valve Meanders for Sensor Applications / R. Schäfer, D. Chumakov, O. Haas, L. Schultz, W. Maass, K-U. Barholz, R. Mattheis // *IEEE Trans. on Magn.* - 2003. - V.39(4). - P. 2089-2097.
10. Morishita, T. Magnetism and structure of compositionally modulated Fe–Gd thin films / T. Morishita, Y. Togami, K. Tsushima // *J. Phys. Soc. Jpn.* – 1985. - V.54. - P.37-40.
11. Спиновые клапаны на основе аморфных ферримагнитных пленок Gd-Co / А.В. Свалов, Г.В. Курляндская, К.Г. Балымов, В.О. Васьковский // *ФММ.* – 2016. - Т.117(9). - С.907-913.
12. Svalov, A.V. Thermo-sensitive spin-valve based on layered artificial ferrimagnet / A.V. Svalov, G.V. Kurlyandskaya, V.O. Vaskovsky // *Appl.Phys.Lett.* – 2016. - V.108. - P.063504 (1-4).
13. Kools, J.C.S. Exchange-Biased Spin-Valves for Magnetic Storage / J.C.S. Kools // *IEEE Trans. on Magn.* – 1996. – V.4(32). - P.3165-3184.
14. Ultra-Compact 100 × 100 μm² footprint hybrid device with spin-valve nanosensors / D.C. Leitao, P. Coelho, J. Borme, S. Knudde, S. Cardoso, P.P. Freitas // *Sensors.* – 2015. – V.15. - P.30311 (1-8).

Отпечатано на Ризографе ИФМ УрО РАН тир. 100 зак. № 61
Объем 1 печ. л. Формат 60x84 1/16
620108, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18