

*На правах рукописи*

**Гриценко Кристина Александровна**

**Особенности процессов перемагничивания  
магнитостатически- и обменно- связанных  
тонкопленочных структур на основе пермаллоев**

01.04.11 - физика магнитных явлений

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Калининград – 2018

Работа выполнена в лаборатории новых магнитных материалов Института физико-математических наук и информационных технологий ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет им. И.Канта».

Научный руководитель кандидат физико-математических наук,  
**Родионова Валерия Викторовна**

Официальные  
оппоненты:

**Огнев Алексей Вячеславович**,  
доктор физико-математических наук, доцент,  
ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный  
университет», ведущий научный  
сотрудник кафедры физики низкоразмерных  
структур школы естественных наук

**Семёнова Елена Михайловна**,  
кандидат физико-математических наук,  
ФГБОУ ВО «Тверской государственный  
университет», доцент кафедры физики  
конденсированного состояния

Ведущая организация федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Юго-Западный государственный  
университет»

Защита состоится «14» декабря 2018 года в 12:30 час. на заседании  
диссертационного совета Д 212.263.09 при ФГБОУ ВО  
«Тверской государственный университет» по адресу: 170002, г. Тверь,  
Садовый пер., 35, ауд. 226.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке  
ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет» по адресу:  
170100, г. Тверь, ул. Володарского, 44а и на сайте в сети Интернет:  
<http://dissertations.tversu.ru/>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Е.В. Барабанова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность работы**

Эффект обменного смещения петель гистерезиса активно применяется в приложениях магнитной сенсорики, в том числе для изготовления датчиков на основе гигантского магнитного импеданса и гигантского магнитосопротивления, а также системах памяти (например, [1, 2]). Тем не менее, разработка надежных и простых в управлении функциональных элементов, основанных на эффекте обменного смещения, требует более глубокого понимания фундаментальных аспектов данного явления, которое зависит не только от выбора материалов, но и от методов и технологических параметров изготовления (например, [1, 3]). Прогнозировать магнитные свойства, механизм процесса перемагничивания обменно-связанной системы для новой комбинации материалов ферромагнетик-антиферромагнетик сложно в силу существования большого количества факторов, влияющих на параметры эффекта (например, [4, 5]). Это значительно мотивирует исследования как в области поиска новых материалов с усиленным эффектом обменного смещения, так и в области построения новых теоретических и феноменологических моделей, описывающих эффект обменного смещения в различных структурах (например, [6]). Тенденция к миниатюризации высокотехнологических устройств обуславливает не прекращающийся поиск новых типов материалов [7], на основе которых может быть реализован эффект обменного смещения с оптимальными параметрами для конкретного приложения на меньших размерах.

Таким образом, тема данной диссертационной работы, в которой исследуются особенности процессов перемагничивания и механизмы формирования свойств обменно-связанных тонкопленочных структур на основе пермаллоев различного состава и их связь с параметрами структуры и роста, – актуальна, а сформулированные в ней задачи своевременны.

**Цель работы** заключается в установлении механизмов формирования магнитных свойств тонкопленочных обменно-связанных структур на основе высоко- и низконицелевого пермаллоев.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены **следующие задачи**:

1) Исследовать морфологические особенности интерфейса ферромагнетик-антиферромагнетик в зависимости от последовательности осаждения слоев и состава пермаллоя.

2) Исследовать, определить и проанализировать связь магнитных свойств образцов с последовательностью осаждения слоев, их количеством, толщиной антиферромагнитного слоя и составом пермаллоя.

3) Установить факторы, определяющие особенности процессов перемагничивания магнитостатически- и обменно- связанных тонкопленочных структур, в зависимости от выбора состава пермаллоя.

4) Исследовать магнитные свойства образцов, содержащих два обменно-связанных интерфейса, в диапазоне температур от 80 К до 420 К для выявления роли магнитостатической связи ферромагнитных слоев.

5) Определить влияние неоднородности и величины внешнего магнитного поля, приложенного в плоскости пленки во время ее напыления, на магнитные характеристики структуры.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1) Состав пермаллоя определяет последовательность осаждения слоев двухслойной структуры IrMn-NiFe, при которой наблюдается увеличение межфазной обменной связи.

2) В обменно-связанных структурах с двумя интерфейсами антиферромагнетик-ферромагнетик, изменение механизма перемагничивания образцов, в том числе, последовательности перемагничивания ферромагнитных слоев структуры, в зависимости от толщины антиферромагнитного слоя происходит разным образом для образцов на основе высоко- и низконикелевого пермаллоя вследствие различия природы взаимодействия ферромагнитных слоев указанных структур.

3) Механизм и особенности перемагничивания структуры NiFe/IrMn определяются неоднородностью внешнего магнитного поля, приложенного в плоскости пленки во время магнетронного осаждения, что связано с формированием в ней областей с различным направлением осей однонаправленной анизотропии.

#### **Научная новизна работы**

Проведенные исследования расширяют существующие представления о механизмах перемагничивания и магнитных свойствах обменно-связанных тонкопленочных систем, а именно:

- впервые проведен сравнительный анализ изменения механизмов перемагничивания двухслойных и трехслойных структур NiFe/IrMn, IrMn/NiFe и NiFe/IrMn/NiFe в зависимости от толщины антиферромагнитного слоя для образцов на основе высоко- и низконикелевого пермаллоев, предложена феноменологическая модель, объясняющая обнаруженные особенности;

- впервые приведены экспериментальные данные по изучению магнитных свойств обменно-связанных структур, изготовленных методом магнетронного осаждения в неоднородном магнитном поле, приложенном в плоскости пленки во время ее изготовления, и продемонстрирована возможность получения ступенчатой петли гистерезиса таким образом на двухслойных образцах NiFe/IrMn.



## **Достоверность результатов**

Достоверность полученных соискателем результатов достигается путем применения современных технологий и методов для изготовления тонкопленочных структур, использования современного высокоточного научного оборудования для характеристики их структурных и морфологических свойств, исследования магнитных свойств. Кроме того, достоверность обеспечивалась набором взаимодополняющих экспериментальных методик, воспроизводимостью результатов и согласованием получаемых результатов с имеющимися в литературе данными других научных групп. Численное моделирование было проведено с помощью лицензированной программы *Comsol Multiphysics*. Математическое моделирование – в лицензированной программе *MATLAB*. Представленные в диссертации результаты опубликованы в индексируемых изданиях, неоднократно обсуждались на научных семинарах и докладывались на специализированных конференциях.

## **Практическая значимость работы**

Результаты в части исследования процессов перемагничивания в тонкопленочных структурах с одним интерфейсом, особенности которых проявляются в виде изгибов на восходящей и нисходящей ветвей петли гистерезиса для образцов, изготовленных в сильно градиентном магнитном поле, могут быть использованы для повышения чувствительности и увеличения степени надежности пассивных магнитных меток [8, 10, 12]. Для указанного приложения важна возможность управления и простота контроля процессов перемагничивания магнитно-многофазных структур. В работе показан простой и дешевый путь использования неоднородного магнитного поля, приложенного в процессе роста двухслойной структуры ферромагнетик-антиферромагнетик, для формирования свойств, характеризующихся ступенчатой формой петли гистерезиса, что приведет к обогащению спектра гармоник сигнала, индуцируемого в приемных катушках при перемагничивании этого образца.

Другим практически значимым результатом можно выделить установленные особенности процессов перемагничивания двух ферромагнитных слоев, разделенных слоем антиферромагнетика, и определенные тенденции изменения их магнитных свойств в зависимости от толщины антиферромагнитного слоя. Понимание влияния этих особенностей на эффект обменного смещения в обменно-связанных структурах с двумя интерфейсами позволит выбирать состав пермаллоя и оптимальную толщину антиферромагнетика для прогнозирования и достижения оптимальных магнитных свойств, которые отличаются для различных приложений, использующих эффект обменного смещения.

### **Личный вклад автора**

Постановка цели и задач диссертационного исследования, построение плана проведения экспериментальных работ были выполнены совместно с научным руководителем. Частично исследуемые образцы обменно-связанных тонкопленочных структур были изготовлены непосредственно автором. Изготовление образцов проводилось в рамках стажировок автора диссертации в НИИЯФ МГУ имени М.В. Ломоносова (г. Москва) под руководством д.ф.-м.н., проф. Чеченина Николая Гавриловича. Исследование структурных свойств образцов с помощью просвечивающей электронной микроскопии было выполнено при непосредственном участии автора в ходе выполнения работ по проектам, поддержанным Российским Фондом Фундаментальных Исследований (РФФИ), в Национальном исследовательском технологическом университете «МИСиС» (г. Москва) под руководством к.т.н. Горшенкова Михаила Владимировича. Исследования структурных и морфологических свойств образцов с помощью атомно-силовой микроскопии и рентгеновской дифракции были проведены на базе НТП «Фабрика» ФГАОУ ВО «БФУ им. И. Канта», при участии автора диссертационной работы в организации проведения экспериментальных работ, подготовке образцов, обработке и анализе экспериментальных данных. Лично автором, на базе Лаборатории новых магнитных материалов ИФМНиИТ ФГАОУ ВО «БФУ им. И. Канта» (г. Калининград), проведены исследования магнитных свойств всех образцов тонкопленочных структур методом вибрационной магнитометрии, обработаны и проанализированы полученные результаты. Математическое моделирование проводилось лично соискателем по выбранной по литературным данным модели, численное моделирование – при непосредственном участии в качестве научного руководителя бакалаврской дипломной работы.

### **Апробация результатов и публикации**

Результаты диссертации были представлены лично автором в виде устных и стендовых докладов на следующих международных конференциях: 2018 IEEE 8th International Conference on Nanomaterials: Applications & Properties (NAP-2018, Zatoka, Odessa region, 2018); 9 th Joint European Magnetic Symposia (JEMS-2018, Mainz, Germany, 2018); 8th International Advances in Applied Physics and Materials Science Congress & Exhibition (Oludeniz, Turkey, 2018); International Baltic Conference on Magnetism 2017 (IBCM, Svetlogorsk, Russia, 2017); Moscow International Symposium on Magnetism (MISM, Moscow, Russia, 2017); The International Joint School "Smart Nanomaterials and X-ray Optics 2016: Modeling, Synthesis and Diagnostics" (Kaliningrad, Russia, 2016); International Baltic conference on magnetism: focus on biomedical aspects (IBCM, Svetlogorsk, Russia, 2015); The 20-th International Conference on Magnetism (ICM,

Barcelona, Spain, 2015); The International Joint School: Smart nanomaterials and X-ray Optics (Kaliningrad, Russia, 2014).

Исследования по теме диссертации были поддержаны из средств субсидии, выделенной на реализацию Программы повышения конкурентоспособности ФГАОУ ВО «БФУ им. И. Канта», а также грантами Российского Фонда Фундаментальных Исследований (№17-32-50170 и №16-32-50098), что также свидетельствует об актуальности темы, ее востребованности.

Список публикаций автора, содержащих представляемые к защите результаты исследований, приведен в конце автореферата. Он содержит 12 работ, в том числе, 4 – статьи в журналах, входящих в базы данных WoSc и Scopus, входящих в рекомендованный перечень ВАК.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка используемой литературы, которые изложены на 143 страницах. В тексте диссертации содержится 52 рисунков и 3 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 198 статей.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Введение** дает представление об актуальности темы, личном вкладе автора, списке его публикаций. В нем изложены цель и задачи, новизна и практическая значимость работы, сформулированы подходы к получению достоверных результатов, приведены положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** – литературный обзор, в котором кратко представлена история развития направлений, связанных с эффектом обменного смещения от первых работ на частицах Co/CoO [15, 16], до современных работ по многослойным тонкопленочным структурам [13–15]. В главе также дается представление о современных моделях, описывающих эффект обменного смещения и учитывающих вклад различных факторов в величину обменного смещения и особенности процессов перемагничивания обменно-связанных тонкопленочных структур. Рассматривается влияние процесса изготовления обменно-связанных тонкопленочных структур и их технологических параметров на характеристики интерфейса ферромагнетик–антиферромагнетик и структурные особенности функциональных слоев, далее – влияние сформированных структурных особенностей на упорядочение спинов на интерфейсе и внутри слоев, изменение параметров которых приводит к существенному усилению или ослаблению эффекта и изменению механизмов процессов перемагничивания. В главе дается представление о применимости моделей к различным материалам и их комбинациям, анализируются преимущества и недостатки моделей и материалов. Кроме

того, в главе даётся представление о современных областях использования эффекта обменного смещения, рассматриваются комбинации свойств обменно-связанных тонкопленочных структур, которые необходимы для конкретных приложений, анализируются перспективы дальнейшего развития. В заключении к литературному обзору дается сводная таблица с результатами работ, рассматривающих особенности формирования магнитных свойств комбинации материалов NiFe и IrMn, на основании проведенного анализа опубликованных работ, было сформулировано заключение к литературному обзору, сформулирована цель работы и основные задачи.

**Вторая глава** состоит из описания экспериментальных методик, которые использовались для изготовления, характеристики и исследования образцов, технологических параметров используемых установок и описания изготовленных и исследованных образцов. Тонкопленочные обменно-связанные структуры были изготовлены методом магнетронного напыления. Толщина антиферромагнитного слоя IrMn варьировалась в образцах с низконикелевым пермаллоем от 0 до 50 нм, а в образцах с высоконикелевым пермаллоем от 0 до 10 нм. Толщина ферромагнитных слоев во всех структурах составляла 10 нм, а толщины слоев тантала, нанесенного предварительно на подложку и в качестве пассивирующего слоя, – 30 нм. С помощью энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии был подтвержден необходимый для формирования эффективной обменной связи элементный состав антиферромагнетика и пермаллоев –  $\text{Ir}_{45}\text{Mn}_{55}$ ,  $\text{Ni}_{40}\text{Fe}_{60}$  и  $\text{Ni}_{75}\text{Fe}_{25}$ . Для структурной аттестации образцов были использованы методы рентгеновской дифрактометрии и рефлектометрии, просвечивающей электронной микроскопии, атомно-силовой микроскопии. Результаты исследований представлены в Главе 3. Для исследования процессов перемагничивания образцов в зависимости от порядка осаждения материалов двухслойных структур NiFe/IrMn, в зависимости от толщины антиферромагнитного слоя структур NiFe/IrMn, IrMn/NiFe, NiFe/IrMn/NiFe в диапазоне от 2 нм до 50 нм при фиксированной толщине ферромагнитных слоев (10 нм каждый), и в зависимости от однородности и величины внешнего магнитного поля, приложенного при напылении в плоскости пленки, был использован метод вибрационной магнитометрии. Сравнительный анализ процессов перемагничивания проводился для образцов с ферромагнитными слоями разного состава – высоконикелевого и низконикелевого пермаллоя, результаты его представлены в Главе 3. В качестве дополнительного метода при анализе процессов перемагничивания использовался метод магнитно-силовой микроскопии. Численное моделирование проводилось с

помощью *Comsol Multiphysics*, математическое моделирование – с помощью программы *MATLAB*.

Для удобства анализа и краткости обозначения введены аббревиатуры LNiPy и HNiPy для низко- и высоконикелевого пермаллоев, соответственно.

**Третья глава** содержит описание полученных результатов исследования структурных, морфологических и магнитных свойств изготовленных обменно-связанных структур. В главе анализируется взаимосвязь свойств двухслойных тонкопленочных обменно-связанных структур с порядком осаждения слоев, толщиной антиферромагнитного слоя и составом пермаллоя. Для трехслойных структур с двумя обменно-связанными интерфейсами анализируется влияние магнитостатической связи ферромагнитных слоев на механизмы процессов перемагничивания образцов. В третьей главе выделяются следующие разделы.

**В первом разделе** представлены результаты структурной характеристики образцов, а именно: представлены результаты определения размера зерен ферромагнитных и антиферромагнитного слоев, изготовленных в качестве одиночной пленки, методом атомно-силовой микроскопии и продемонстрировано, что размер зерна низконикелевого пермаллоя в 3 раза больше, чем размер зерна высоконикелевого, а размер зерна антиферромагнитного слоя – существенно меньше зерна ферромагнитных слоев; визуализирован интерфейс и оценено его качество с помощью метода просвечивающей электронной микроскопии и показано, что частичное перемешивание слоев обнаруживается только на интерфейсе NiFe/IrMn, в котором крупнозернистый пермаллой напыляется до слоя антиферромагнетика (типичные ПЭМ-изображения, позволяющие определить особенности интерфейсов, представлены для трехслойных структур на основе разных пермаллоев на рисунке 1, где пунктирными линиями обозначен слой, на котором наблюдается перемешивание слоев); приведены результаты структурного анализа с помощью метода рентгеновской дифрактометрии, что позволило подтвердить необходимую для формирования обменной межфазной связи структуру (ориентация (111) поликристаллических пленок IrMn и NiFe, пример на рисунке 2.).

**Во втором разделе** представлены результаты исследования магнитных свойств двухслойных структур на основе различных пермаллоев в зависимости от порядка осаждения слоев. Изменение магнитных свойств, в том числе, особенностей процессов перемагничивания, проанализировано для толщин антиферромагнитного слоя в диапазоне от 0 нм до 15 нм. Максимальное обменное смещение достигается в образце на основе высоконикелевого пермаллоя IrMn(15 нм)/NiFe и составляет 100 Э. Процессы перемагничивания были

проанализированы как вдоль сформированной в процессе изготовления образцов оси однонаправленной анизотропии, так и перпендикулярно ей. На рисунке 3 представлены типичные петли гистерезиса обменно-связанных двухслойных структур IrMn/NiFe и NiFe/IrMn на основе различных пермаллоев с толщиной антиферромагнитного слоя 4 нм, измеренных в двух взаимно перпендикулярных направлениях в плоскости пленки.

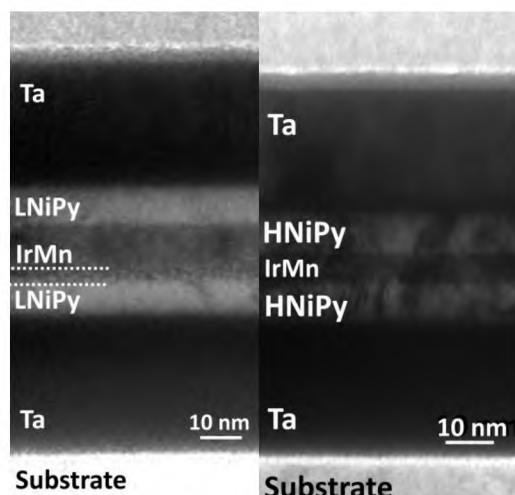


Рис. 1. ПЭМ-изображения трехслойных структур на основе низконикелевого (слева, LNiPy(10 нм)/IrMn(10 нм)/LNiPy(10 нм)) и высоконикелевого (справа, HNiPy(10 нм)/IrMn(5 нм)/HNiPy(10 нм)) пермаллоев. В скобках даны значения толщин соответствующих слоев.

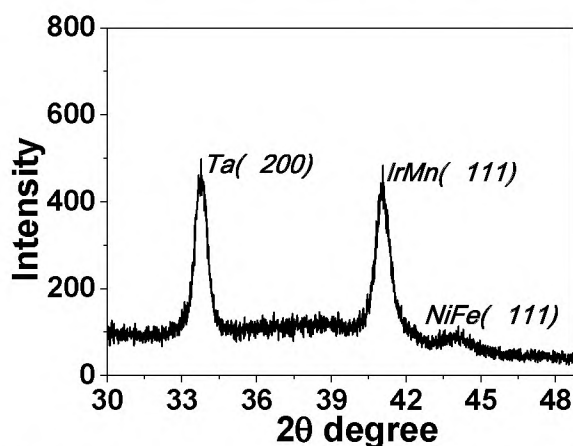


Рис. 2. XRD-спектр для образца HNiPy(10 нм)/IrMn(20 нм).

Анализируя представленные зависимости можно сделать вывод, что энергии анизотропии 4 нм-слоя IrMn достаточно для формирования обменного смещения при осаждении антиферромагнитного слоя на ферромагнитный слой LNiPy. Для HNiPy для двух порядков осаждения слоев обменного смещения не обнаружено. Изотропность свойств двухслойных структур на основе LNiPy в случае осаждения антиферромагнитного слоя перед ферромагнитным, как и отсутствие



эффекта обменного смещения на них, объясняется тем, что необходимая кристаллическая структура антиферромагнетика не сформирована, что, в свою очередь, приводит к разупорядочению его магнитной структуры. Также необходимо отметить увеличение коэрцитивностей двухслойных обменно-связанных структур по отношению к коэрцитивностям одиночных слоев пермаллоев, что связано с наличием дефектов на интерфейсе антиферромагнетик/ферромагнетик [6], что и приводит к увеличению магнитной жесткости ферромагнетика.

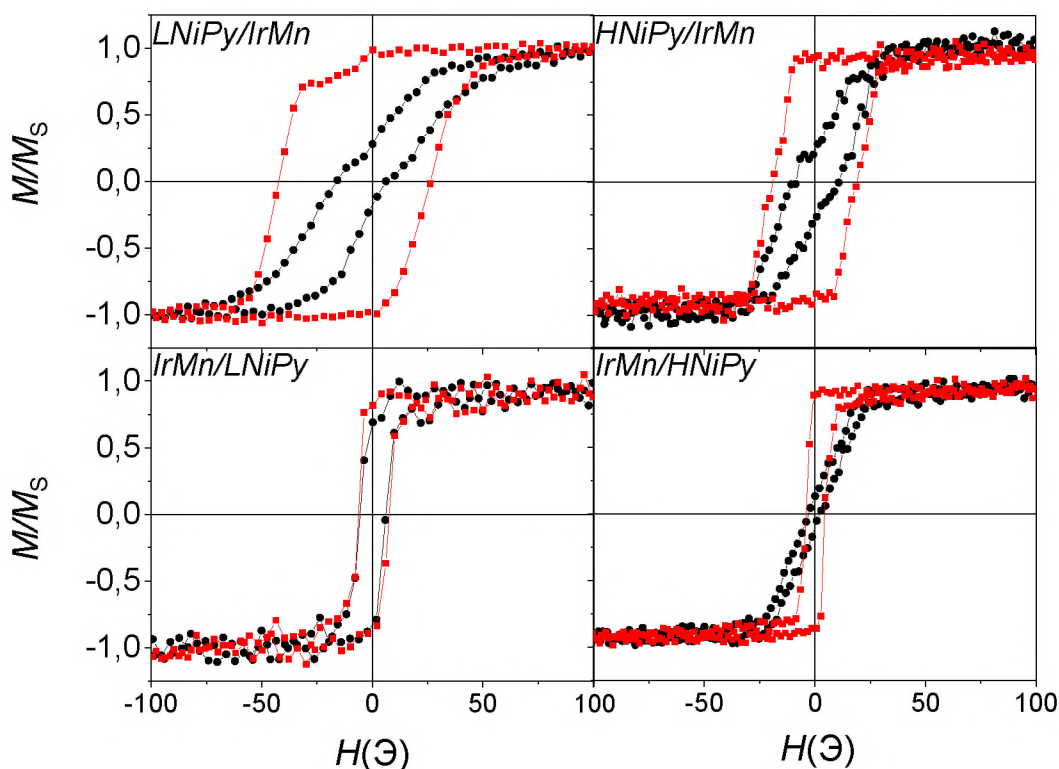


Рис. 3. Петли гистерезиса, полученные при перемагничивании вдоль оси однонаправленной анизотропии (красные линии) и перпендикулярно ей (черные линии) в плоскости пленки, тонкопленочных структур на основе LNiPy и HNiPy с различным порядком осаждения слоев и толщиной антиферромагнитного слоя 4 нм.

Таким образом, анализируя особенности перемагничивания двухслойных обменно-связанных структур, было установлено, что магнитные свойства двухслойных структур NiFe-IrMn определяет совместное влияние порядка осаждения слоев, состава пермаллоя и толщины антиферромагнитного слоя:

- как при осаждении антиферромагнитного материала на ферромагнитный, так и для альтернативного порядка осаждения, увеличение толщины антиферромагнитного слоя приводит к увеличению обменного смещения. При этом, для образцов с HNiPy большая величина обменной связи на интерфейсе наблюдается при осаждении



ферромагнитного материала на антиферромагнитный, а для LNiPy – при альтернативном порядке осаждения слоев;

- величина обменного смещения больше для структур с HNiPy вне зависимости от порядка осаждения слоев IrMn и NiFe;

- тенденцию изменения величины коэрцитивной силы (увеличение или уменьшение) с ростом толщины антиферромагнетика определяет только порядок осаждения материалов. При осаждении антиферромагнитного материала на высоко- или низко- никелевый пермаллой наблюдается уменьшение коэрцитивной силы, в то время как альтернативный порядок осаждения приводит к ее возрастанию с увеличением толщины антиферромагнетика;

- максимальная величина обменного смещения при минимальной величине коэрцитивной силы определена для структур высоконикелевый NiFe/IrMn для всего диапазона толщин антиферромагнитного слоя, от 2 нм до 16 нм.

Для объяснения найденных особенностей предложена феноменологическая модель, учитывающая как механизмы частичного отклонения оси легкого намагничивания высоко- и низконикелевого пермаллоя относительно направления, заданного внешним магнитным полем при осаждении, так и выход магнитного момента из плоскости пленки для низконикелевого пермаллоя.

**В третьем разделе** представлены результаты и анализ исследования процессов перемагничивания трехслойных структур NiFe/IrMn/NiFe на основе высоко- и низконикелевых пермаллоев в диапазоне толщин антиферромагнетика от 2 нм до 10 нм и 50 нм, соответственно. На рисунке 4 представлены петли гистерезиса, демонстрирующие эволюцию магнитных свойств с увеличением толщины антиферромагнитного слоя от 2 нм до 10 нм с шагом 2 нм для трехслойных структур NiFe/IrMn/NiFe на основе высоко- и низконикелевых пермаллоев [A4].

Отметим, что отношение магнитных моментов насыщения ферромагнитных слоев для образцов на основе высоконикелевого пермаллоя одинаковое, поскольку слои имеют одинаковые толщины: перегиб на петлях гистерезиса наблюдается на оси абсцисс. С учетом перемешивания слоев на интерфейсе LNiPy/IrMn, реальная толщина нижнего слоя ферромагнетика меньше, чем верхнего, поэтому перегиб на петлях гистерезиса для образцов, изготовленных из низконикелевого пермаллоя, смещен относительно оси абсцисс.

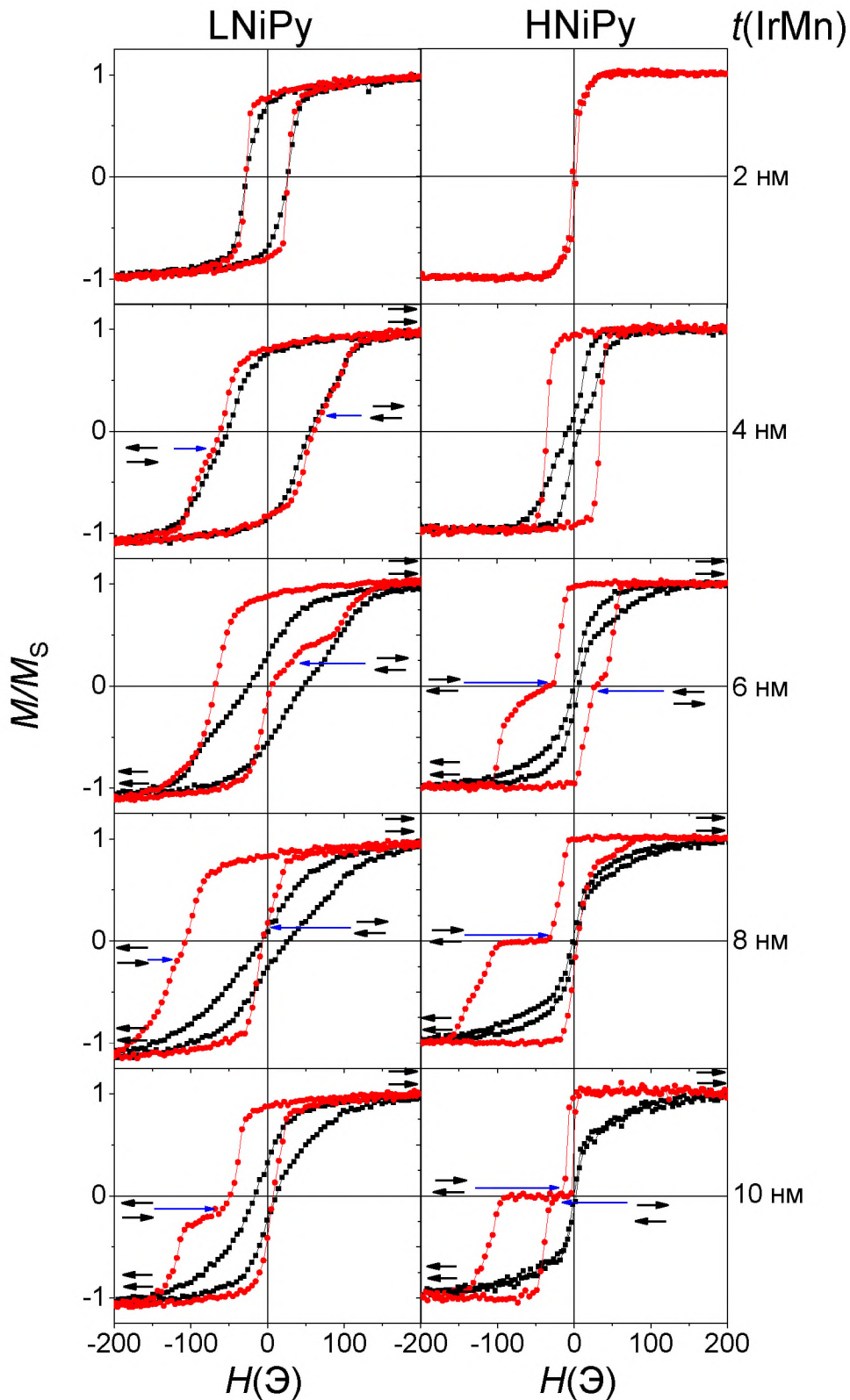


Рис. 4. Петли гистерезиса образцов LNiPy(10 нм)/IrMn( $t$  нм)/LNiPy(10 нм) (левая колонка) и HNiPy(10 нм)/IrMn( $t$  нм)/HNiPy(10 нм) (правая колонка), где  $t$ (IrMn) – толщина антиферромагнитного слоя. Красная и черная линии соответствуют перемагничиванию образца вдоль оси однонаправленной анизотропии и перпендикулярно ей, соответственно, в плоскости пленки.

Изменение механизма перемагничивания тонкопленочных трехслойных обменно-связанных структур при изменении толщины антиферромагнитного слоя определяется вкладом магнитостатического взаимодействия ферромагнитных слоев структуры, которое имеет различную природу для пермаллоев разного состава:

- изменение толщины антиферромагнитного слоя от 4 нм до 50 нм в структурах NiFe/IrMn/NiFe на основе низконикелевого пермаллоя не приводит к изменению механизма перемагничивания образцов, в том числе, к изменению порядка перемагничивания ферромагнитных слоев системы. Магнитостатическая связь ферромагнитных слоев объясняется формированием укрупнённого зерна, что приводит, с одной стороны, к увеличению шероховатости, то есть формированию морфологии интерфейса типа «orange-peel» [16, 17], а, с другой стороны, к отклонению оси легкого намагничивания магнитокристаллографической анизотропии каждого зерна от направления однонаправленной анизотропии [4, 5];

- для структур NiFe/IrMn/NiFe на основе высоконикелевого пермаллоя увеличение толщины антиферромагнитного материала от 2 нм до 10 нм приводит к существенному ослаблению влияния связи ферромагнитных слоев, что приводит к изменению порядка перемагничивания ферромагнитных слоев системы. Связь ферромагнитных слоев системы при малых толщинах антиферромагнитного слоя реализуется за счет взаимодействия доменов, преимущественно посредством распространения которых происходит перемагничивание каждого слоя ферромагнетика;

- для структуры NiFe/IrMn/NiFe на основе низконикелевого пермаллоя с толщиной антиферромагнитного слоя 2 нм особенности роста нижнего ферромагнитного слоя проявились в отсутствии четкого разделения ферромагнитных слоев системы, что выделяет структуру по механизму перемагничивания в линейке низконикелевых образцов. Перемагничивание структуры происходит, как перемагничивание одиночного ферромагнитного слоя.

Найденные особенности также подтверждаются результатами математического моделирования по модели, разработанной авторами статьи [19]. Эта модель позволяет учесть вклад изменения магнитостатической энергии в систему, поэтому была выбрана из рассмотренных в литературном обзоре моделей и адаптирована под изучаемые образцы. На рисунке 5 представлены петли гистерезиса, полученные при моделировании процессов перемагничивания трехслойной структуры на основе низконикелевого пермаллоя с учетом магнитостатической связи ферромагнитных слоев системы ( $k < 0$ ) и без нее ( $k > 0$ ). В модели  $k$  – коэффициент, отвечающий за конкуренцию энергии обменного взаимодействия и магнитостатической энергии внутри

ферромагнитного слоя. Как видно из рисунка 5, петля гистерезиса, учитывающая наличие магнитоэлектрического взаимодействия между ферромагнитными слоями, обладает теми же особенностями, что соответствующая петля гистерезиса на рисунке 4 (петля гистерезиса для структуры на основе низконикелевого пермаллоя с толщиной антиферромагнитного слоя 4 нм), а именно, увеличением наклона ветвей. Для представленного анализа, в том числе, использовался учет изменения дифференциальной восприимчивости образцов при перемагничивании структур. Top и bot – обозначение верхнего и нижнего интерфейсов или верхнего и нижнего ферромагнитных слоев, здесь и далее.

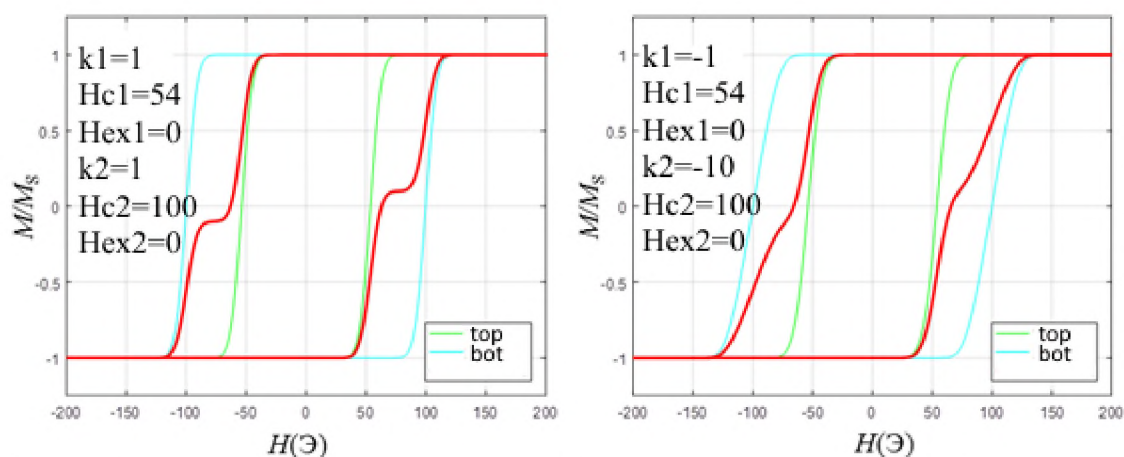


Рис. 5. Петли гистерезиса трехслойной структуры на основе низконикелевого пермаллоя с толщиной антиферромагнетика 4 нм (красная линия), полученные при моделировании процессов перемагничивания с помощью *MATLAB*. Зеленой и голубой линиями обозначен вклад от процесса перемагничивания каждого ферромагнитного слоя по-отдельности.

Экспериментально определены зависимости величины обменного смещения на верхнем и нижнем интерфейсах, а также коэрцитивной силы ферромагнитных слоев системы NiFe/IrMn/NiFe от толщины антиферромагнитного слоя [A2, A12]. Оцененные по петлям гистерезиса величины обменного смещения на интерфейсах в зависимости от толщины антиферромагнитного слоя представлены на рисунке 6. Следует отметить, что величины обменного смещения и коэрцитивной силы на полувысоте верхней и нижней частей ветвей петель гистерезиса выбирались с учетом проанализированного и установленного механизма перемагничивания, то есть, с учетом порядка перемагничивания ферромагнитных слоев [A3]. Установлено, что вне зависимости от порядка осаждения ферромагнитного слоя и его состава, коэрцитивная сила сначала существенно увеличивается, а затем уменьшается с увеличением толщины антиферромагнитного слоя от 2 нм до 10 нм [A6, A10]. Монотонная зависимость величины обменного смещения от толщины антиферромагнитного слоя получена для верхнего



интерфейса системы на основе высоконикелевого пермаллоя [А8]. Как для нижнего интерфейса структуры на основе высоконикелевого пермаллоя, так и для двух интерфейсов структуры на основе низконикелевого пермаллоя, величина обменного смещения имеет немонотонную зависимость с максимумом при толщине антиферромагнитного слоя 8 нм.

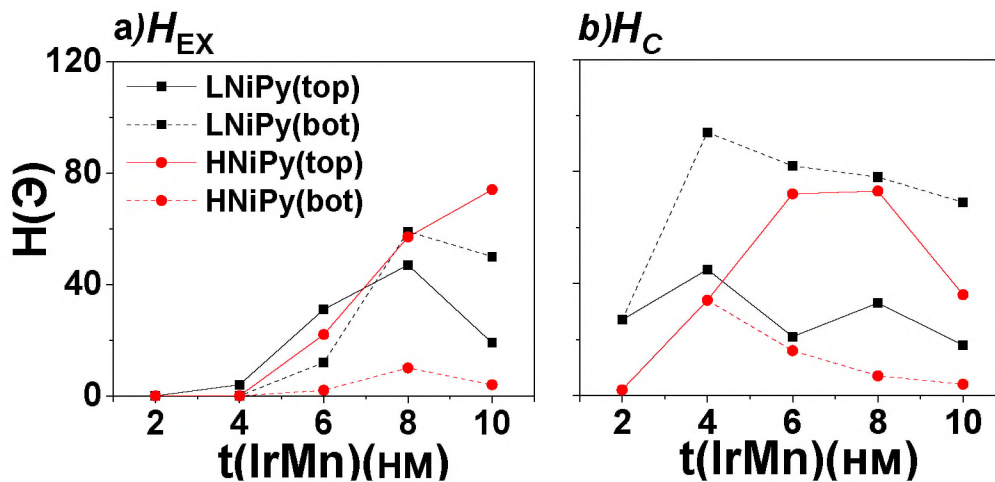


Рис. 6. Зависимость величины обменного смещения (слева) и коэрцитивной силы (справа) от толщины антиферромагнитного слоя для верхнего (top) и нижнего (bot) интерфейсов и верхнего(top) и нижнего(bot) слоев ферромагнетиков, соответственно, для трехслойных структур LNiPy(10 нм)/IrMn( $t$  нм)/LNiPy(10 нм) и HNiPy(10 нм)/IrMn( $t$  нм)/HNiPy(10 нм), где  $t$  – толщина антиферромагнитного слоя. Оценки проведены по петлям гистерезиса, полученным вдоль оси однонаправленной анизотропии.

**В четвертом разделе** приведены результаты исследования магнитных свойств тонкопленочных структур при пониженных и повышенных температурах как для определения температуры блокировки обменного смещения интерфейсов, так и для выявления определяющего вклада в магнитные свойства магнитостатического или обменного взаимодействий.

На рисунке 7 представлены зависимости обменного смещения для верхнего и нижнего интерфейсов в зависимости от температуры для образцов с толщиной антиферромагнитного слоя 4 нм. Причем, механизм перемагничивания сохраняется для пермаллоя каждого состава при понижении температуры, что можно, например, проследить при сравнении петли гистерезиса для образцов с толщиной антиферромагнитного слоя 4 нм (температура 80 К) и 10 нм (температура 300 К) для структур на основе высоко- и низконикелевого пермаллоя (Рис. 4 и Рис. 7). Последовательность перемагничивания ферромагнитных слоев для структур на основе низконикелевого пермаллоя по нисходящей ветви такая же, как по восходящей, в то время как для структур на основе высоконикелевого – отличается.

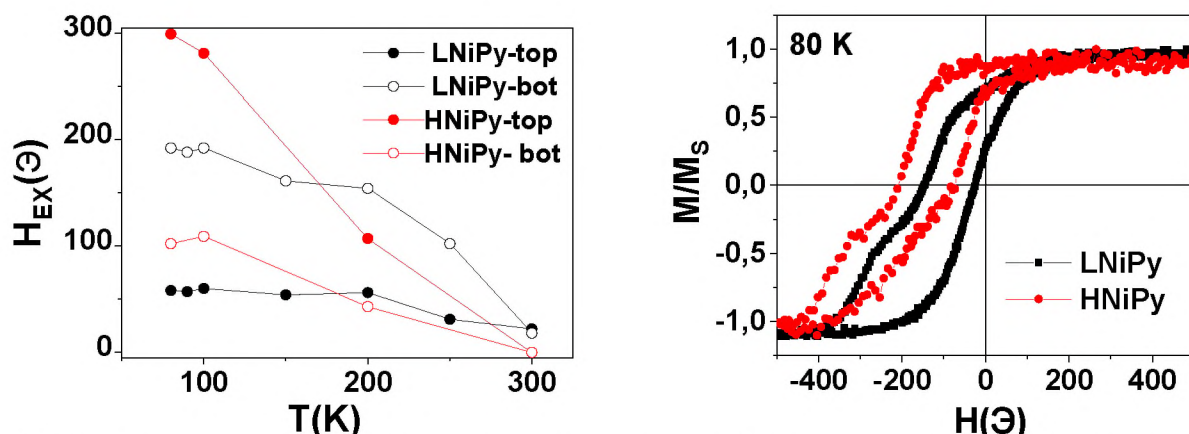


Рис. 7. Температурные зависимости величины обменного смещения (слева) и петли гистерезиса, измеренные при температуре 80 К (справа) вдоль оси однонаправленной анизотропии, для трехслойных образцов NiFe/IrMn/NiFe на основе высоко- и низконикелевого пермаллоев с толщиной антиферромагнитного слоя 4 нм.

Для образцов можно наблюдать одинаковую тенденцию изменения формы петель гистерезиса при увеличении температуры выше комнатной: переход от ассиметричного вида петли к симметричному. При увеличении температуры обменное смещение уменьшается за счет увеличения тепловых флуктуаций в материалах слоев, наряду с этим все более отчетливо проявляется поочередность перемагничивания двух слоев ферромагнетика в каждом из образцов, поскольку магнитостатическая энергия ферромагнитных слоев вдали от температуры Кюри слабо изменяется. Перегиб на петле гистерезиса в этом случае, как и на петлях гистерезиса, полученных при комнатной температуре, объясняется наличием двух ферромагнитных слоев, обладающих разными коэрцитивными силами.

На рисунке 8 представлены петли гистерезиса трехслойных обменно-связанных образцов на основе высоко- и низконикелевых пермаллоев, иллюстрирующие описанные особенности. На графиках отчетливо видно, как восходящая ветвь петли гистерезиса, не обнаруживающая перегибов при комнатной температуре, приобретает ступенчатую форму.

**В пятом разделе** представлены результаты исследования влияния неоднородности магнитного поля, приложенного во время напыления, на магнитные свойства двухслойных структур HNiFe/IrMn.

Визуализация неоднородности магнитного поля постоянных магнитов, помещенных в камеру установки осаждения, полученная с помощью программного пакета *Comsol Multiphysics*, приведена на рисунке 9. Величина магнитного поля между магнитами была измерена с помощью магнитометра Холла РШ-1-10 в различных областях между полюсами магнитов с шагом 2 мм. Результаты представлены в таблице на



рисунке 9. После напыления подложка размером 10 мм на 20 мм была разрезана на 8 образцов, каждый размером 5 мм на 5 мм [A7].

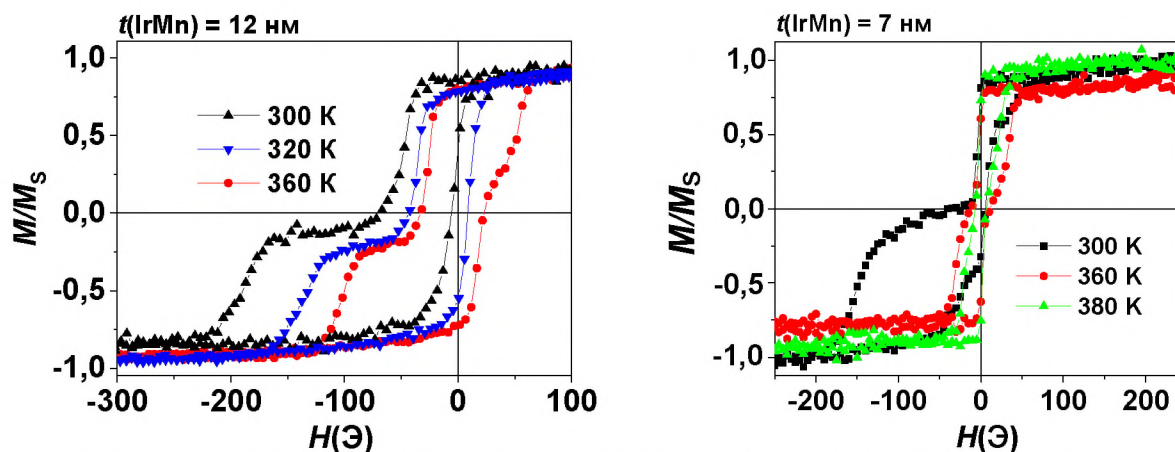


Рис. 8. Петли гистерезиса для образцов NiFe/IrMn/NiFe на основе низко- и высоконикелевых пермаллоев (слева и справа, соответственно) при повышенных температурах.

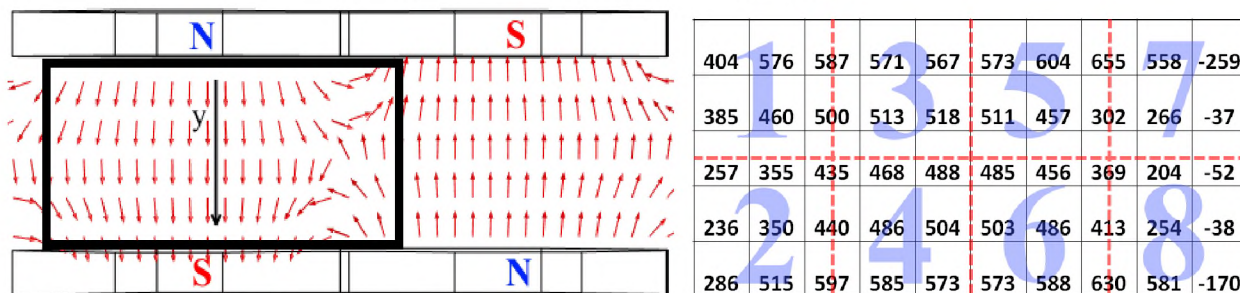


Рис. 9. Схематичное изображение неоднородного магнитного поля между магнитами, полученное с помощью *Comsol Multiphysics* (слева), таблица значений величин магнитного поля, приведенных в Эрстедах, между магнитами для каждой области, измеренных с помощью датчика Холла (справа).

При увеличении градиента магнитного поля при переходе от областей 3, 4 → 6, 5 → 1, 2 можно наблюдать ослабление эффекта обменного смещения вдоль оси, соединяющей полюса магнита,  $y$  (Рис. 9), и проявление его перпендикулярно указанной оси. Полученная особенность объясняется появлением распределения полей локальной анизотропии, формирующихся при появлении неоднородности магнитного поля в плоскости пленки [A1]. Азимутальные зависимости величин обменного смещения представлены на рисунке 10.

На рисунке 11 представлены петли гистерезиса, полученные при различных азимутальных углах (различных углах в плоскости пленки) для образца из области 7 (аналогичные особенности процессов перемагничивания наблюдались и для образца из области 8). Ступенчатая форма петель гистерезиса для двуслойных обменно-связанных структур проявляется из-за того, что магнитное поле в этих двух областях имеет наибольшую неоднородность по сравнению с магнитным полем во всех предыдущих областях [A5]. Более того, магнитное поле меняет знак.



Таким образом, можно предположить, что оси однонаправленной анизотропии направлены в противоположные стороны (в соответствии с направлениями магнитного поля). Это, в свою очередь, привело к формированию двух областей в образце, петли гистерезиса которых смещены влево и вправо относительно оси  $Y$ . Эти области имеют разный размер, о чем свидетельствуют разные величины их магнитных моментов насыщения ( $M_1$ ,  $M_2$  на Рис. 10). В связи с этим в промежуточных угловых направлениях проявляются сложные формы петель гистерезиса, а максимальное обменное смещение для одной из областей определено в направлении, перпендикулярном оси  $y$ . Азимутальные зависимости величины обменного смещения для образцов 7 и 8 представлены на рисунке 10.

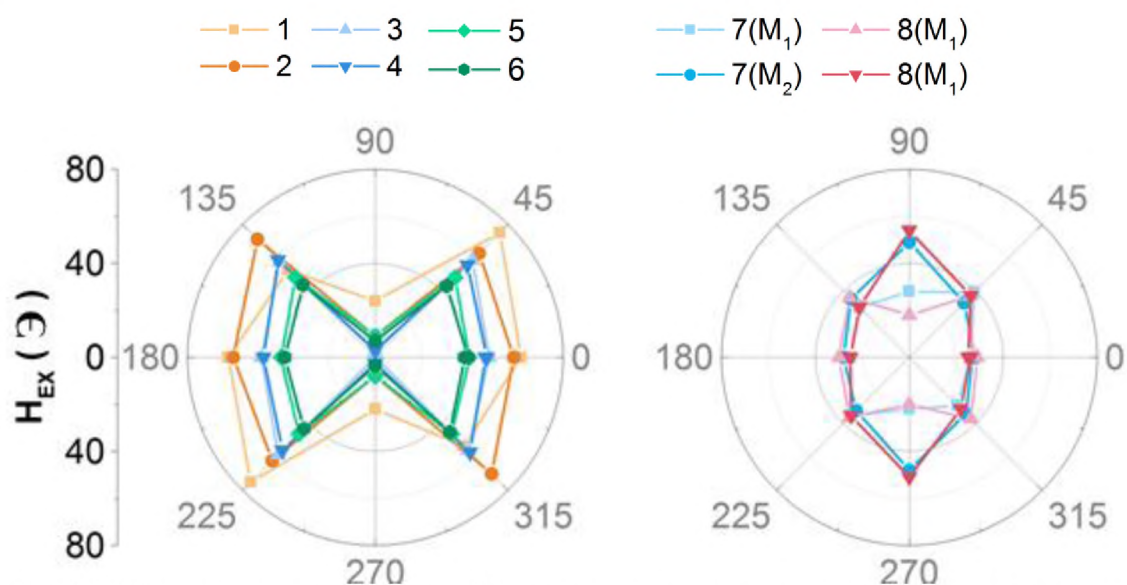


Рис 10. Угловые зависимости обменного смещения и коэрцитивной силы для образцов из разных областей 1-8 (обозначены цифрами, отражены различными цветами).  $M_1$  и  $M_2$  – зависимости для различных областей образца 7.

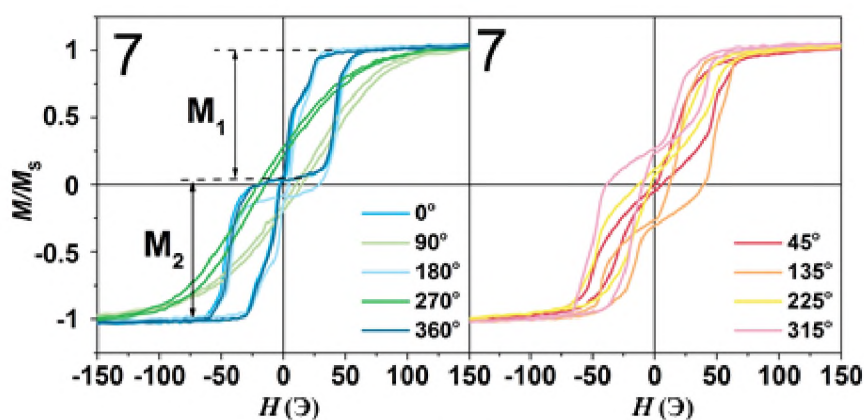


Рис. 11. Петли гистерезиса для образцов HNiPy/IrMn из области 7, полученные при разных азимутальных углах. На графике обозначено отношение удвоенных магнитных моментов насыщения областей с противоположным направлением оси однонаправленной анизотропии.

**В шестом разделе** сформулировано заключение, которое содержит основные результаты, описанные и проанализированные в главе 3 в развернутом, детализированном виде. В нем перечислены найденные особенности магнитостатически- и обменно-связанных структур, дается краткое объяснение установленных зависимостей.

В конце диссертации приводятся **основные результаты и выводы**, а также **список цитированной литературы**.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Определена зависимость морфологии интерфейса ферромагнетик-антиферромагнетик от последовательности осаждения слоев и состава пермаллоя. Установлено, что при осаждении антиферромагнитного IrMn на низконикелевый пермаллой наблюдается частичное перемешивание слоев, связанное с существенно увеличенным размером зерна низконикелевого пермаллоя по сравнению с размером зерна высоконикелевого.

2. Установлено, что магнитные свойства двухслойных структур NiFe-IrMn определяют состав пермаллоя, толщина антиферромагнитного слоя и порядок осаждения слоев [A9]. Для объяснения найденных особенностей предложена феноменологическая модель, учитывающая как механизм частичного отклонения в плоскости пленки оси легкого намагничивания высоко- и низконикелевого пермаллоя относительно направления, заданного внешним магнитным полем при осаждении, так и выход магнитного момента из плоскости пленки для низконикелевого пермаллоя.

3. Обнаружено, что механизм формирования магнитных свойств и особенностей перемагничивания тонкопленочных трехслойных обменно-связанных структур NiFe/IrMn/NiFe, в том числе, последовательность перемагничивания ферромагнитных слоев, определяется конкуренцией магнитостатического взаимодействия ферромагнитных слоев материала и обменного взаимодействия между антиферромагнитным и ферромагнитными слоями. Установлено, что магнитостатическое взаимодействие оказывает большее влияние на свойства тонкопленочных структур с низконикелевым пермаллоем, чем на свойства структур с высоконикелевым, – за счет увеличения зерна ферромагнетика и его намагниченности в первых. Предложены феноменологическая и математическая модели, описывающие обнаруженные особенности.

4. Установлено, что понижение температуры, влекущее за собой усиление вклада обменного взаимодействия ферромагнетик-антиферромагнетик, приводит к реализации механизма перемагничивания, наблюдаемого с ростом толщины антиферромагнитного слоя как для

образцов на основе высоко-, так и для образцов на основе низконикелевого пермаллоя [A11]. Исследования магнитных свойств в расширенном диапазоне температур от 80 К до 420 К позволили определить температуры блокировки обменного смещения для изготовленных тонкопленочных структур, не проявляющих эффект обменного смещения при комнатной температуре (с толщиной антиферромагнитного слоя 2 нм и 4 нм).

5. Обнаружено, что изменение величины и градиента внешнего магнитного поля, приложенного при осаждении образцов, влияет как на величину обменного смещения, так и на механизм перемагничивания двухслойной тонкопленочной структуры NiFe/IrMn. Предложена феноменологическая модель, описывающая найденные особенности. Определены оптимальные параметры градиентного магнитного поля, приложенного при изготовлении образцов, необходимые для использования структуры NiFe/IrMn в качестве пассивной магнитной метки.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### **Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях рекомендованных ВАК:**

A1. Gritsenko С. Inhomogeneous magnetic field influence on magnetic properties of NiFe/IrMn thin film structures / Gritsenko Ch., Omelyanchik A., Berg A., Dzhun I., Chechenin N., Tretiakov O., Rodionova V. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials – 2018 (<https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.10.013>).

A2. Dzhun I.O. FMR investigations of exchange biased NiFe/IrMn/NiFe trilayers with high and low Ni relative content / Dzhun I.O., Babaytsev G. V., Chechenin N.G., Gritsenko С.A., Rodionova V. V. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials – 2017. – p. 1–5 (<https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.11.028>).

A3. Gritsenko С. Exchange bias and coercivity fields as a function of the antiferromagnetic layer thickness in bi- and tri-layered thin-films based on IrMn and NiFe / Gritsenko С., Dzhun I., Babaytsev G., Chechenin N., Rodionova V. // Physics Procedia – 2016. – V. 82 – p. 51–55 (doi: [10.1016/j.phpro.2016.05.010](https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.05.010)).

A4. Gritsenko С. Dependence of the exchange bias on the thickness of antiferromagnetic layer in the trilayered NiFe/IrMn/NiFe Thin-films / Gritsenko С., Dzhun I., Chechenin N., Babaytsev G., Rodionova V. // Physics Procedia – 2015. – V. 75 – p.1066–1071 (doi: [10.1016/j.phpro.2015.12.176](https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.12.176)).

### **Иные публикации:**

A5. Tuning of Exchange Bias in Thin Film Structures Made from NiFe and IrMn/ Ch. Gritsenko, V. Rodionova, A. Berg, G. Babaytsev, I. O. Dzhun,



N. G. Chechenin // Book of Abstracts of 8th International Advances in Applied Physics and Materials Science Congress & Exhibition. — Oludeniz, Turkey, 2018. — P.69.

A6. FMR investigations of exchange biased nife/irmn/nife trilayers with high and low ni relative content / I. O. Dzhun, G. V. Babaizev, N. G. Chechenin, Ch. A. Gritsenko, V.V. Rodionova // Book of abstracts: International Baltic conference on Magnetism, Svetlogorsk, 20-24 August, 2017. — P. 41–41.

A7. Hysteresis loop tuning by configuration of external magnetic field applied during deposition of thin thilms structure composed of NiFe and IrMn layers / Ch. Gritsenko, V.V. Rodionova, G. Babaytsev et al. // Book of Abstracts of Moscow International Symposium on Magnetism (MISM-2017). — Moscow, 2017. — P. 269–269.

A8. Magnetic properties of F/AF(TAF)/F trilayers with low-ni permalloy ferromagnetic layers / I. O. Dzhun, G. V. Babaytsev, N. G. Chechenin, Ch. Gritsenko, V. V. Rodionova // Book of Abstracts of Moscow International Symposium on Magnetism (MISM-2017). — Moscow, 2017. — P. 606–606.

A9. The exchange bias effect in bi- and tri-layered thin films made from NiFe and IrMn / Ch. Gritsenko, I. Dzhun, G. Babaytsev, N. Chechenin, V. Rodionova // Book of Abstracts of The International Joint School "Smart Nanomaterials and X-ray Optics 2016: Modeling, Synthesis and Diagnostics". — Kaliningrad, 2016.

A10. Exchange bias and ciercivity fields as a function of the antiferromag-netic layer's thickness in three-layered NiFe/IrMn/NiFe thin-films / Ch. Gritcenko, I. Dzhun, G. Babaytsev, N. Chechenin, V. Rodonova // Book of Abstracts of Baltic International conference on magnetism: focus on biomedical aspects. — Kaliningrad, 2015. — P. 54.

A11. Dependence of the exchange bias blocking temperature on the thickness of antiferromagnetic layer in the trilayered Si/Ta/NiFe/IrMn/NiFe/Ta thin-films / Ch. Gritsenko, I. Dzhun, N. Chechenin, V. Rodionova // Book of Abstracts of The 20-th International Conference on Magnetism. — Barcelona, 2015.

A12. Anisotropy of magnetic properties of trilayered Si/Ta/NiFe/IrMn/NiFe/Ta thin films / K. Gritcenko, I. Dzhun, N. Chechenin, V. Rodionova // Book of Abstracts Smart Nanomaterials and X-ray Optics 2014. Modeling, Synthesis and Diagnostics. — Kaliningrad, Russia, 2014. — P. 37–37.

#### СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nogués J. Exchange bias / Nogués J., Schuller I.K. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials – 1999. – V. 192 – № 2 – p.203–232.
2. Xu W. New Axial Laminated-Structure Flux Switching Permanent Magnet

- Machine with 6/7 Poles / Xu W., Zhu J., Member S., Zhang Y., Guo Y., Lei G. // IEEE Transactions on Magnetics – 2011. – V. 47 – № 10 – p.2823–2826.
3. Tannous C. Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials / C. Tannous, R. L. Comstock – 2017. – p.1186-1220.
  4. O’Grady K. A new paradigm for exchange bias in polycrystalline thin films / O’Grady K., Fernandez-Outon L.E., Vallejo-Fernandez G. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials – 2010. – V. 322 – № 8 – p.883–899.
  5. Haiwen Xi and Robert M. White Low-frequency dynamic hysteresis in exchange-coupled Ni<sub>81</sub>Fe<sub>19</sub> / Ir<sub>22</sub>Mn<sub>78</sub> bilayers / Haiwen Xi and Robert M. White, Sining Mao, Zheng Gao, Zhijun Yang and E.M. // Physical Review B – 2001. – V. 64 – p.184416.
  6. Radu F. Exchange bias effect of ferro-/antiferromagnetic heterostructures / под ред. S. Bader, H. Zabel. Berlin: Springer, 2008. Вып. 1 – 97–184с.
  7. Lavrentiev V. Evidence of interface exchange magnetism in self-assembled cobalt-fullerene nanocomposites exposed to air / Lavrentiev V., Stupakov A., Lavrentieva I., Motylenko M., Barchuk M., Rafaja D. // Nanotechnology – 2017. – V. 28 – № 12 – p.125704.
  8. Rodionova V. Spectral properties of electromotive force induced by periodic magnetization reversal of arrays of coupled magnetic glass-covered microwires / Rodionova V., Ilyn M., Ipatov M., Zhukova V., Perov N., Perov ) N, Zhukov A. // Additional information on J. Appl. Phys. V C – 2012. – V. 111 – p.7–706.
  9. Fletcher R.R. Remotely interrogated temperature sensors based on magnetic materials / Fletcher R.R., Gershenfeld N.A. // IEEE Transactions on Magnetics – 2000. – V. 36 – № 5 – p.2794–2795.
  10. Ong K.G. Higher-order harmonics of a magnetically soft sensor: Application to remote query temperature measurement / Ong K.G., Grimes D.M., Grimes C.A. // Applied Physics Letters – 2002. – V. 80 – № 20 – p.3856–3858.
  11. W. H. Meiklejohn and C. P. Bean New Magnetic Anisotropy / W. H. Meiklejohn and C. P. Bean // Physical Review Letters – 1957. – V. 105 – № 5 – p.904–913.
  12. W. H. Meiklejohn and C. P. Bean New Magnetic Anisotropy / W. H. Meiklejohn and C. P. Bean // Physical Review – 1956. – V. 102 – № 5 – p.1413–1414.
  13. He Q.L. Tailoring exchange couplings in magnetic topological-insulator/antiferromagnet heterostructures / He Q.L., Kou X., Grutter A.J., Yin G., Pan L., Che X., Liu Y., Nie T., Zhang B., Disseler S.M., Kirby B.J., Ratcliff II W., Shao Q., Murata K., Zhu X., Yu G., Fan Y., Montazeri M., Han X., Borchers J.A., Wang K.L. // Nature Materials – 2017. – V. 16 – № 1 – p.94–100.
  14. Yang Q. Perspectives of voltage control for magnetic exchange bias in multiferroic heterostructures / Yang Q., Zhou Z., Sun N.X., Liu M. // Physics

Letters A – 2017. – V. 381 – № 14 – p.1213–1222.

15. Song C. Recent progress in voltage control of magnetism: Materials, mechanisms, and performance / Song C., Cui B., Li F., Zhou X., Pan F. // Progress in Materials Science – 2017. – V. 87 – p.33–82.

16. Shah V.R. Interface and magnetic characterization of FM/AF/FM multilayers / Shah V.R., Schanzer C., Boeni P., Braun H.-B. // Smart Materials for Ranging Systems – 2006. – V. 226 – p.179–194.

17. R. Shah, C. Schanzer, P. Böni and H.B.B. V. Interface and Magnetic Characterization of FeCoV/NiO/FeCoV Trilayers / R. Shah, C. Schanzer, P. Böni and H.B.B. V. // The Physics of Metals and Metallography – 2006. – V. 101 – № 1 – C.S73–S77.

18. Migliorini A. Spontaneous exchange bias formation driven by a structural phase transition in the antiferromagnetic material / Migliorini A., Kuerbanjiang B., Huminiuc T., Kepaptsoglou D., Muñoz M., Cuñado J.L.F., Camarero J., Aroca C., Vallejo-Fernández G., Lazarov V.K., Prieto J.L. // NATURE MATERIALS – 2018. – V. 17. – p.28-35.

19. Martínez-García J.C. First-order reversal curves analysis in nanocrystalline ribbons / Martínez-García J.C., Rivas M., Lago-Cachón D., García J.A. // Journal of Physics D: Applied Physics – 2014. – V. 47 – № 1 – p.015001.

Технический редактор А.В. Жильцов  
Подписано в печать 12.10.2018. Формат 60 × 84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Усл. печ. л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ №533.  
Тверской государственный университет  
Редакционно-издательское управление  
Адрес: Россия, 170100, г. Тверь, ул. Желябова, 33.  
Тел. РИУ: (4822) 35-60-63.