

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ПРОБЛЕМ ХИМИЧЕСКОЙ
ФИЗИКИ И МЕДИЦИНСКОЙ ХИМИИ РАН

На правах рукописи

БАХМЕТЬЕВ МАКСИМ ВЛАДИМИРОВИЧ

**СТРУКТУРНАЯ И ХИМИЧЕСКАЯ ИНЖЕНЕРИЯ МЕЖСЛОЙНОГО
ИНТЕРФЕЙСА В СЕНСОРАХ NiFe/IrMn И МАГНИТНАЯ
РЕЛАКСАЦИЯ В УСТРОЙСТВАХ С АНОМАЛЬНЫМ ЭФФЕКТОМ
ХОЛЛА**

04.06.01 – Химические науки

02.00.04 – Физическая химия

Научный доклад

**об основных результатах научно-квалифицированной практики
(диссертации)**

Научный Руководитель  / профессор, д.ф.-м.н., г.н.с.

Моргунов Роман Борисович

Рецензент  / к.ф.-м.н., научный сотрудник

Куницына Екатерина Игоревна

Рецензент  / к.х.н., зав. лабораторией

Кареев Иван Евгеньевич

Черноголовка, 2023

Актуальность работы

Одной из проблем химической физики является установление роли химического состояния поверхностей и интерфейсов, в частности гибридизации орбитальных моментов атомов и спиновой динамики в формировании магнитных свойств наноструктур. Особенную остроту эти проблемы приобретают в наноразмерных устройствах, состоящих из сверхтонких плёнок различного химического состава, в которых наблюдается образование различных фаз, возникновение химических соединений на интерфейсе, гибридизация атомных орбиталей. Все эти факторы влияют на функционирование элементов спинтроники и нанoeлектроники.

Одними из элементов спинтроники и нанoeлектроники являются датчики Холла и сенсоры анизотропного магнитосопротивления (АМС). Сенсоры АМС могут, например, использоваться в биологических и медицинских применениях для обнаружения магнитомеченных клеток в микрофлюидной технике. Такие сенсоры демонстрируют преимущества в повышенной надёжности, стабильной работе при различных температурах, по отношению сигнал/шум, могут быть выше отношения сенсоров гигантского магнитного сопротивления. В качестве активных элементов датчиков Холла [1] и сенсоров АМС [1] широко применяют магнитные тонкоплёночные структуры, которые могут состоять из ферромагнетика (ФМ) и антиферромагнетика (АФМ), либо из двух ферро- или двух антиферромагнетиков с разным обменным взаимодействием ФМ1-ФМ2 или АФМ1-АФМ2. В диссертации рассмотрены структуры ФМ-АФМ, поскольку в них обменное взаимодействие, реализуемое протеканием волновых функций электронов на интерфейсе, приводит к сдвигу центра петли гистерезиса вдоль поля, приложенного при охлаждении от температуры Нееля. Это создаёт условия для постоянной стабильной и всегда одинаковой намагниченности гетероструктуры в исходном состоянии в нулевом магнитном поле. Сдвиг петли гистерезиса, называемый эффектом обменного смещения, устанавливает интервал полей, в котором используются датчики Холла и

сенсоры АМС, делая устройства независимыми от числа и номера завершения измерительных циклов [2]. Обменное смещение зависит от совершенства интерфейса ФМ/АФМ, толщин ФМ и АФМ слоёв, кристалличности этих слоёв и от используемых материалов ФМ и АФМ. Поэтому в настоящее время изготавливают магнитные структуры, в которых обменное смещение превышает коэрцитивную силу [2]. Среди большого разнообразия систем с обменным смещением магнитная структура NiFe/IrMn имеет самое большое соотношение между обменным смещением и коэрцитивной силой [3], поэтому в диссертации была выбрана эта структура.

Для увеличения чувствительности, структурной и химической инженерии межслойного интерфейса в сенсорах NiFe/IrMn, в интерфейс между NiFe и IrMn добавляют спейсерный слой (Spacer Layer, SL), который уменьшает обменное взаимодействие между NiFe и IrMn [4]. При напылении ультратонких плёнок создаётся интерфейс, неоднородность которого составляет $\sim 0.1\text{--}1$ нм. В диссертации в качестве спейсера были выбраны два типа материалов Cu и Ta с разным спин-орбитальным взаимодействием. В зависимости от выбранного материала SL, времени и скорости осаждения при напылении на поверхность NiFe, происходит заполнение неидеально ровной поверхности и образование островковой структуры SL. Исследования тонкоплёночных структур с SL является методом решения одной из проблем химической физики, связанной с установлением электронного состояния интерфейсов различных материалов. Кластеры SL позволяют регулировать протекание волновых функций и контролируемо смешивать волновые функции NiFe и IrMn. Таким образом, в диссертации исследуется физико-химическая конкуренция адсорбции, диффузии, гибридизации электронных волновых функций, гетерогенная кинетика образования фаз на интерфейсе в структурах NiFe/Cu/IrMn и NiFe/Ta/IrMn.

Намагниченность упомянутых выше устройств с тонкими плёнками ФМ-АФМ переключается внешним магнитным полем. Такие устройства ограничены пределом плотности записи и высокими затратами энергии на

запись бита информации. Поэтому было предложено использовать устройства, переключение намагниченности которых происходит при пропускании спин-поляризованного тока вдоль многослойных тонких плёнок. Передача магнитного момента электронов проводимости ионом остова стимулирует перемагничивание ферромагнетика и называется спин-орбитальным крутящим моментом (Spin-Orbit Torque, SOT). Структуры с одним ферромагнитным слоем ФМ/SL (где SL слой диамагнитного переходного металла ТМ с высоким спин-орбитальным взаимодействием Pt, Ir и т.п.) обеспечивают возможность записи с помощью спин-поляризованного тока [5]. В диссертации исследованы сравнительно редкие в литературе структуры ФМ/ТМ/ФМ с перпендикулярной анизотропией и двумя ферромагнитными слоями, потому что они обладают расширенным функционалом и большим числом логических состояний. Двухслойные структуры называются синтетическими ферромагнетиками (СФ) и часто проявляют замедленную магнитную релаксацию при переключении намагниченности. Этот вид релаксации связан с термоактивированными процессами нуклеации зародышей намагниченности или с движением доменных стенок, что в новых экзотических условиях двухслойных тонких плёнок несёт фундаментальные знания об этих процессах. Поэтому в диссертации приведены исследования магнитной релаксации в структурах GdFeCo/Ir/GdFeCo, проявляющих SOT.

Цель и задачи диссертационной работы:

Цель работы заключалась в установлении связи между структурными модификациями слоёв NiFe и IrMn, структурным и химическим состоянием спейсерного слоя Cu или Ta и магнитными и электрическими свойствами образцов NiFe/Cu/IrMn и NiFe/Ta/IrMn. Кроме того, в структурах GdFeCo/Ir/GdFeCo со спейсером Ir, проявляющих SOT, целью работы было обнаружение Холловского отклика на медленную магнитную релаксацию.

Основные задачи состояли в следующем:

- 1) Экспериментальное установление влияния материала спейсерного слоя и его эффективной толщины на эффект обменного смещения,

коэрцитивную силу и электрическое сопротивление в структурах NiFe/Cu/IrMn и NiFe/Ta/IrMn.

2) Создание модели, описывающей постепенное напыление Cu или Ta на поверхность NiFe и перколяционный переход отдельных островков к сплошному заполнению спейсера с учётом адгезии атомов Ta и Cu к слоям NiFe/IrMn, а также адгезии Cu-Cu и Ta-Ta.

3) Анализ угловых зависимостей обменного смещения и коэрцитивной силы в зависимости от текстуры и морфологии зёрен в слоях NiFe и IrMn, а также оценка обменного смещения от толщины и его зависимости от толщины спейсерного слоя в NiFe/Cu/IrMn и NiFe/Ta/IrMn.

4) Поиск влияния типа и толщины спейсера на Бриллюэновское рассеяние света на тепловых спиновых волнах в структурах NiFe/Cu/IrMn.

5) Разработка универсального алгоритма подавления ошибки в измерении коэрцитивной силы, связанной с неопределённостью ориентации образца в магнитном поле при малых углах между образцом и полем в структурах с обменным смещением.

6) Измерение и анализ зависимостей электрического сопротивления, обменного смещения и коэрцитивной силы от толщины спейсерного слоя для обнаружения перколяционного порога.

7) Создание экспериментальных условий для обнаружения температурного гистерезиса и установления его природы в NiFe/IrMn.

8) Получение и анализ угловой зависимости аномального эффекта Холла, выделение компонент сопротивления, связанного с разными механизмами передачи углового вращательного момента ионам кристаллической решётки, а также создание условий для наблюдения медленной релаксации сопротивления Холла в структуре GdFeCo/Ir/GdFeCo, проявляющей SOT.

Научная новизна.

1) Моделирование процесса возникновения островковой структуры в NiFe/Cu/IrMn и NiFe/Ta/IrMn предсказывает сплошное покрытие спейсером

интерфейса NiFe/IrMn при правильном подборе отношений коэффициентов адгезии атомов Ta и Cu к слоям NiFe/IrMn, а также адгезии Cu-Cu и Ta-Ta. Предсказанные перколяционные пороги совпадают с экспериментально определёнными эффективными толщинами спейсеров Cu (1.3 нм) и Ta (0.2 нм), при которых возникает резкое изменение коэрцитивной силы и поля обменного смещения NiFe/Cu/IrMn и NiFe/Ta/IrMn.

2) Введение спейсера Cu между слоями NiFe и IrMn приводит к сужению распределения зёрен по размерам в слое IrMn, увеличению среднего размера зёрен примерно в 1.5 раза и уменьшению как одноосной, так и однонаправленной констант анизотропии в 8 раз, что изменяет энергетические барьеры перемагничивания структуры NiFe/Cu/IrMn.

3) В структурах NiFe/Cu/IrMn и NiFe/Ta/IrMn наблюдается изменение симметрии угловой зависимости резонансного поля ФМР при достижении эффективной толщины слоя Cu 0.5 нм и слоя Ta 0.1 нм, соответственно. В интервале углов $0-360^\circ$ при толщинах больших критической вместо одного максимума наблюдается два максимума. Это связано с тем, что намагниченность зёрен малых размеров ($d < 1$ мкм), которые появляются при больших толщинах спейсера, вращается с частотой большей 10 ГГц (частота ФМР) и что даёт два пика на угловой зависимости. Намагниченность крупных зёрен ($d > 1$ мкм) вращается с частотой меньшей 10 ГГц и даёт один пик на угловой зависимости. Крупные зёрна преобладают в образцах с толщиной спейсера меньше пороговой.

4) Смена островковой структуры меди на сплошной слой Cu приводит к уменьшению ширины линии BLS, потому что ослабляет флуктуации плотности энергии обменного взаимодействия между атомами слоёв NiFe и IrMn и делает структуру NiFe/Cu/IrMn более однородной. Сдвиг резонансных частот рассеяния спиновых волн Стоксовой и анти-Стоксовой линий при инверсии внешнего магнитного поля происходит из-за поля обменного смещения. С ростом толщины Cu сдвиг уменьшается и полностью исчезает при полном покрытии слоя Cu интерфейса NiFe/Cu/IrMn.

5) Зависимость электрического сопротивления структуры NiFe/Cu/IrMn от эффективной толщины слоя меди (нормированного числа атомов) подчиняется теории перколяций. Образование бесконечного фрактала в слое Cu происходит при $t_{Cu} = 1.3$ нм и регистрируется по резкому изменению электрических свойств. Магнитный перколяционный порог достигается при $t_{Cu} = 0.5$ нм. Различие в пороговых концентрациях связано с тем, что электрическое протекание реализуется при соединении островков перешейками в двумерной системе. «Магнитное протекание» реализуется в поперечном направлении между ферромагнитными островками, возникшими при неоднородном напылении NiFe. Заполнение промежутков между островками медью способно влиять на продольное и поперечное протекание, приводя к трёхмерному характеру магнитного фрактала.

6) На основе модели Стонера-Вольфарта предложен алгоритм определения коэрцитивной силы, который позволяет избежать ошибок, связанных с неопределённостью ориентации образца в магнитном поле.

7) Обнаружен температурный гистерезис намагниченности в структуре NiFe/IrMn с обменным смещением. Он связан с ростом магнитной анизотропии при охлаждении. Амплитуда наблюдаемого температурного гистерезиса уменьшается с номером термоцикла и впоследствии не восстанавливается.

8) Анализ угловой зависимости эффекта Холла в синтетических ферримагнетиках GdFeCo/Ir/GdFeCo позволил разделить вклады классического эффекта Холла $R_{OHE} = 22$ мОм и аномального эффекта Холла, связанного со спин-орбитальным вращающим моментом, $R_{SOT} = 30$ мОм при комнатной температуре, превышающей точку компенсации ~ 90 К. Моделирование полевой зависимости намагниченности двухслойного образца GdFeCo даёт петли магнитных гистерезисов, аналогичные тем, которые наблюдаются при измерении гистерезиса сопротивления Холла. Быстрое изменение ориентации магнитного поля из ориентации в плоскости образца к перпендикулярной образцу ориентации вызывает медленную релаксацию

части Холловского напряжения, соответствующей спин-орбитальному вращательному моменту. Длительная релаксация этого напряжения ~ 30 мин связана с расширением доменов.

Теоретическая и практическая значимость.

- 1) Разработан метод предсказания величины обменного смещения при малых эффективных толщинах спейсера в условиях островковой структуры, который даёт возможность расширить диапазон магнитных полей, в которых используются структуры NiFe/Cu/IrMn и NiFe/Ta/IrMn в датчиках Холла и сенсорах АМС.
- 2) Обнаруженный температурный гистерезис в NiFe/IrMn открывает путь к новому поколению термоактивных коммутационных устройств, в которых термочувствительный магнитный элемент состоит из высокоупорядоченного ферромагнитного материала с намагниченностью на два порядка выше, чем у молекулярных соединений. Спин-кроссовер макроспина в структурах с обменным смещением вызывает изменение полярности намагниченности в отличие от всех известных систем, где наблюдался спин-кроссовер.
- 3) Разработан алгоритм корректировки ошибок, вызванных неточной ориентацией образца в магнитном поле при определении его коэрцитивной силы.
- 4) В двухслойных структурах GdFeCo/Ir/GdFeCo, проявляющих SOT, установлены режимы, при которых возникает медленная магнитная релаксация и доменная структура, что мешает нормальному функционированию этих устройств.

Степень достоверности и апробация результатов. Материалы работы докладывались на семинарах отдела строения вещества ФИЦ ПХФ МХ, а так же на следующих конференциях: International workshop on functional MAX-materials (2nd FunMax), Красноярск, 14 – 17 сентября 2021; Российская конференция по использованию рассеяния нейтронов в исследовании конденсированных сред (РНИКС-2021), Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021; XXXIII Симпозиум «Современная химическая физика», Туапсе, 24

сентября – 4 октября 2021; Международная научная конференция «Современная химическая физика – на стыке физики, химии, биологии», Черноголовка, 29 ноября – 3 декабря 2021; 2022 Joint MMM-Intermag, New Orleans, LA, 10 января – 14 января 2022; X International Voevodsky Conference, Новосибирск, 5 – 9 сентября 2022; XXXIV Симпозиум «Современная химическая физика», Туапсе, 16 – 25 сентября 2022.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 статей в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК и индексируемых в Scopus и Web of Science, а также 10 тезисов докладов на международных и всероссийских научных конференциях.

Личный вклад автора. Автором диссертационной работы были проведены измерения и обработка температурных и полевых зависимостей намагниченности образцов с использованием СКВИД-магнитометра. Выполнено измерение и обработка зависимостей доменов от приложенного магнитного поля методом магнито-оптической микроскопии Керра. Определены количественные характеристики температур и полей, при которых возникает обменное смещение. Выполнены измерения и обработка полевых и временных зависимостей электрического сопротивления. Исследована взаимосвязь результатов измерений с результатами, полученными другими авторами. Постановка задач, интерпретация экспериментальных результатов и формулировка выводов осуществлялась совместно с научным руководителем. Автор принимал участие в планировании экспериментов и написании статей.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели работы, задачи исследования, отмечены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведён литературный обзор современных представлений об обменном взаимодействии, передаваемом электронами проводимости на интерфейсе между магнитоупорядоченными металлами. Приведены данные о передаче спина от электронов проводимости к ионам

остова в синтетических ферромагнетиках. Выполнен анализ практических применений обменно-смещённых гетероструктур и структур с аномальным эффектом Холла.

Во второй главе описаны образцы и экспериментальные методы, используемые в данной диссертационной работе. Описаны методики измерения полевых и температурных зависимостей намагниченности СКВИД-магнитометром и его калибровка. Описаны методики исследований методами просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения (HRTEM), энергодисперсионного рентгеноструктурного анализа (EDX), ферромагнитного резонанса (ФМР), Бриллюэновского рассеяния света (BLS), методика визуализации магнитных доменов с помощью магнито-оптического микроскопа Керра (МОКЕ) и методика измерения электрофизических свойств структуры GdFeCo/Ir/GdFeCo.

В третьей главе представлены экспериментальные данные о влиянии эффективной толщины спейсера Cu, введённой между слоями NiFe и IrMn, на магнитные и электрические свойства структур NiFe/Cu/IrMn. Представлены результаты моделирования формирования островковой структуры в NiFe/Cu/IrMn и NiFe/Ta/IrMn с подбором коэффициентов адгезии атомов Ta и Cu к слоям NiFe/IrMn, а также адгезии Cu-Cu и Ta-Ta.

С помощью моделирования методом Монте-Карло процесса напыления меди установлено отношение r коэффициентов адгезии атомов Ta и Cu к слоям NiFe/IrMn, а также адгезии Cu-Cu и Ta-Ta. На **рисунке 1а** и **1б** показаны результаты моделирования распределения кластеров Cu и Ta, при эффективных толщинах спейсеров $t_{Cu} = 0.5$ нм и $t_{Ta} = 0.1$ нм.

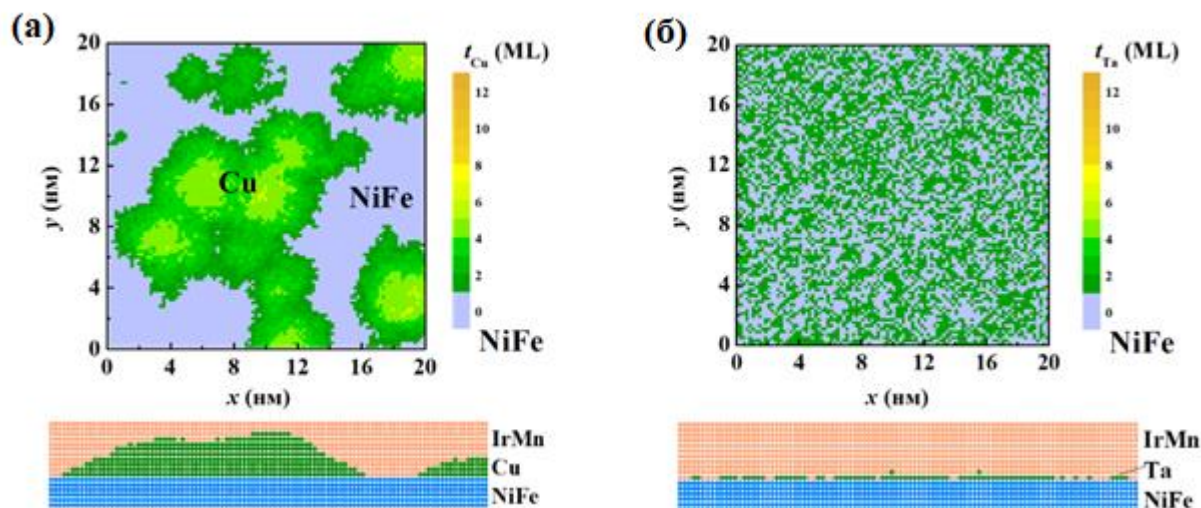


Рисунок 1. Двумерные распределения кластеров спейсера на поверхности NiFe и профили спейсера на интерфейсе NiFe/SL/IrMn при эффективных толщинах $t_{Cu} = 0.5$ нм (а) и $t_{Ta} = 0.1$ нм (б).

Модель предсказывает полное покрытие медью при эффективной толщине слоя 1.3 нм, а для тантала - 0.3 нм, что согласуется с экспериментом и говорит о правильно выбранных коэффициентах адгезии спейсеров и хорошей предсказательной силе модели.

На **рисунке 2** показаны ТЕМ изображения зёрен и сравнение распределений размеров зёрен в структуре NiFe/Cu/IrMn. Видно увеличение среднего размера зёрен в IrMn с 9.2 нм до 10.5 нм при добавлении Cu. При этом среднее значение размера зёрен в слое NiFe меняется незначительно за счёт релаксации межфазных деформаций в слое NiFe вблизи IrMn из-за наличия большого количества межфазных неоднородностей решётки, обусловленных наличием островков Cu.

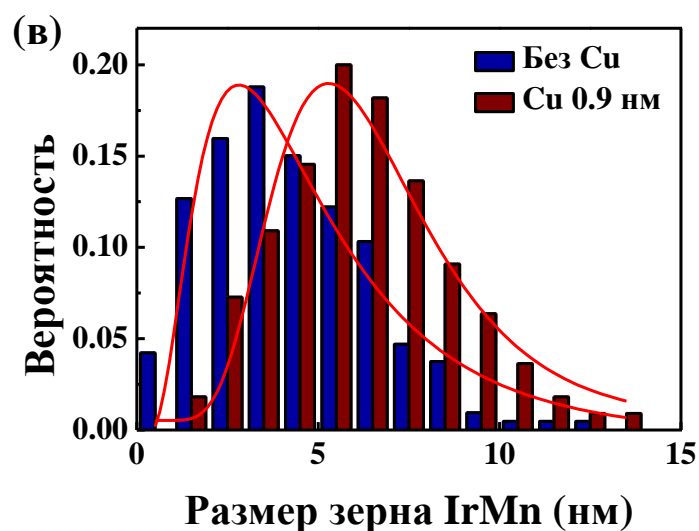
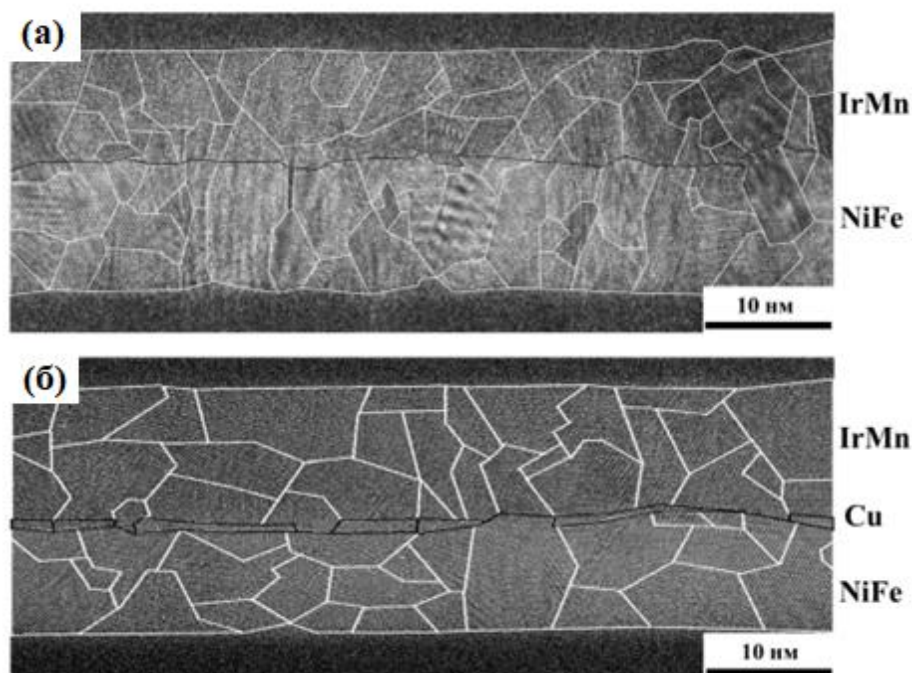


Рисунок 2. TEM изображения образца без меди (а) и с $t_{Cu} = 0.9$ нм (б). Сравнение распределения размеров зёрен по размеру в слое IrMn (в). Сплошные линии — аппроксимации логнормальными функциями.

Изменение размера зёрен в магнитных слоях при добавлении спейсера вызывает перераспределение однонаправленного и вращательного вкладов в обменное смещение, связанное с изменением длины межфазного контакта на границах зёрен NiFe/IrMn.

Были получены также угловые зависимости двух линий ФМР (оптическая и акустическая моды). Для оптической моды ФМР в серии NiFe/Cu/IrMn были получены азимутальные угловые зависимости

резонансного поля, которые представлены на **рисунке 3а** и **3б**. С увеличением t_{Cu} меняется симметрия угловой зависимости.

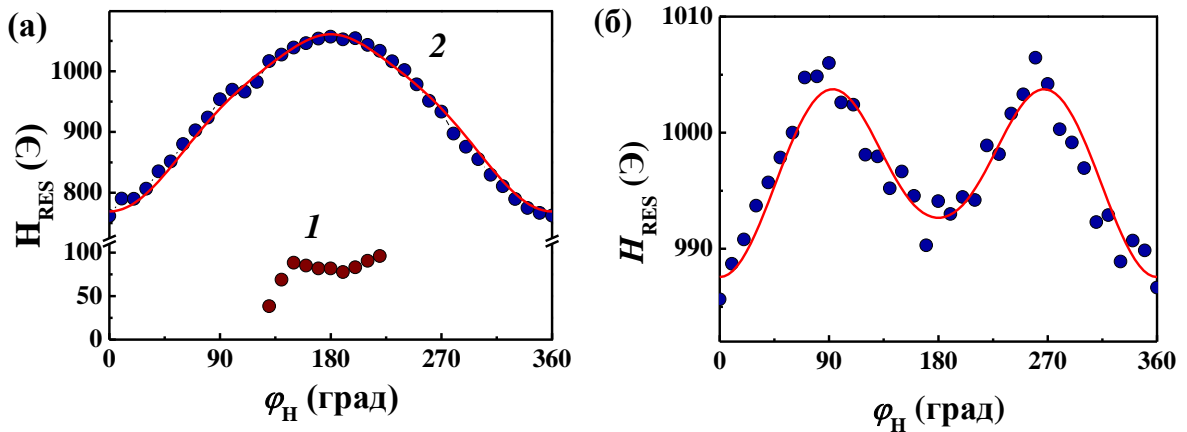


Рисунок 3. Азимутальные угловые H_{RES} ФМР для акустической (1) и оптической мод ФМР (2) в NiFe/Cu/IrMn для образца без Cu (а) и для $t_{Cu} = 4$ нм (б). Сплошные линии – аппроксимация моделью.

Изменение симметрии угловой зависимости указывает на конкуренцию магнитной анизотропии поля вращаемой анизотропии H_{RA} и H_B , которые были определены с помощью модели, учитывающей сосуществование двух типов зёрен в поликристаллических слоях АФМ, связанных с соседними зёрнами ФМ.

На **рисунке 4** представлены спектры Мандельштам-Бриллюэновской спектроскопии BLS для трёхслойных структур NiFe/Cu/IrMn с диапазоном t_{Cu} от 0 до 5 нм, измеренные в приложенном магнитном поле +3 кЭ и -3 кЭ. Инверсия знака приложенного поля приводит к смещению пиковых частот как Стоксовой, так и антиСтоксовой линий. Эти сдвиги максимальны для образца без спейсера и монотонно уменьшаются с толщиной t_{Cu} .

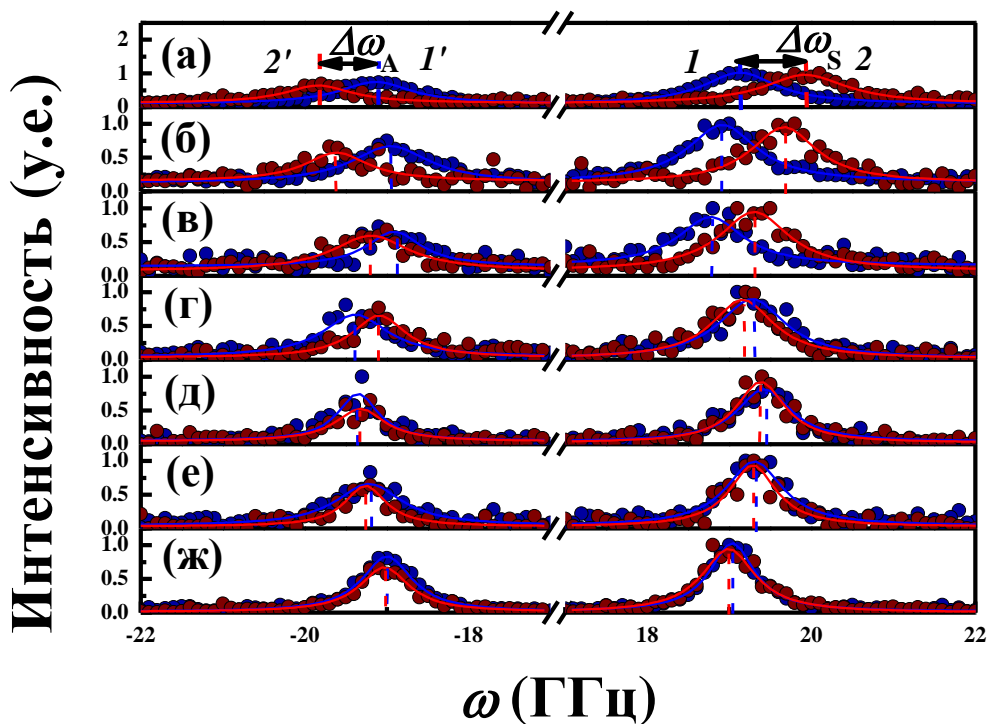


Рисунок 4. Спектры BLS для NiFe/Cu/IrMn (без Cu (а), 0.1 нм (б), 0.2 нм (в), 0.5 нм (г), 1 нм (д), 2 нм (е) и 4 нм (ж)) при +3 кЭ (синие точки) и -3 кЭ (красные точки). Угол падения света $\alpha = 15^\circ$. Соответствующее значение волнового числа k равно $6.1 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$. Сплошные линии — аппроксимации функцией Лоренца. Пики (1) и (1') являются Стоксовыми и антиСтоксовыми пиками при $H = 3$ кЭ. Пики (2) и (2') являются Стоксовыми и антиСтоксовыми пиками при $H = -3$ кЭ. Штриховыми линиями показаны сдвиги резонансных частот для Стоксовой $\Delta\omega_S$ и антиСтоксовой $\Delta\omega_A$ линий при инверсии направления приложенного поля H .

Применение метода BLS в сочетании с ФМР позволило выделить вклады как зёрен на интерфейсе, так и зёрен в объёме NiFe в динамические значения обменного смещения. Для ФМ-связанных зёрен на границе раздела NiFe/IrMn в образце без спейсера большая часть диапазона частот перемагничивания находится ниже резонансной частоты ФМР. В образце со спейсером $t_{\text{Cu}} = 0.9$ нм диапазон частот перемагничивания в ФМ-связанных зёрнах смещается в сторону частот, превышающих частоту ФМР (рисунок 5).

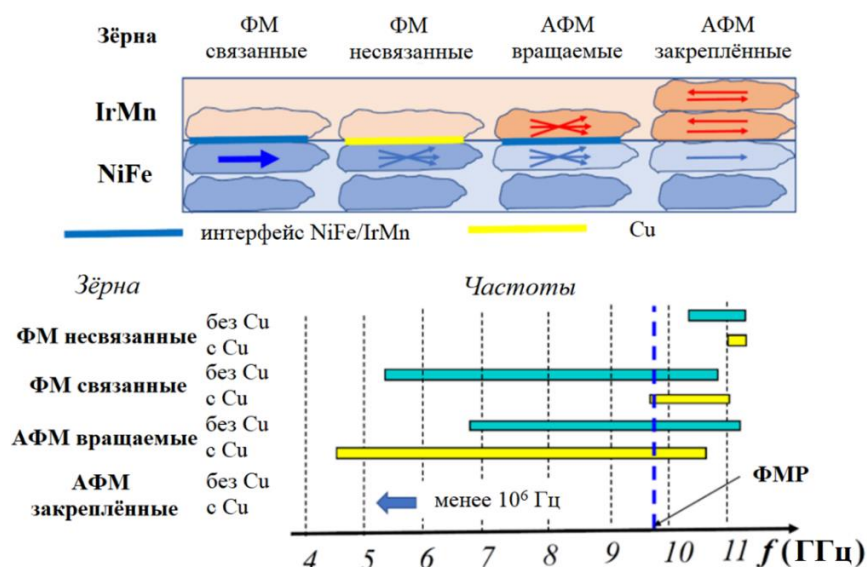


Рисунок 5. Схема частотных диапазонов перемагничивания, определённых по полуширине распределения энергетического барьера перемагничивания зёрен. Верхняя панель: схемы типов зёрен, влияющих на обменное смещение: ФМ-связанные, ФМ-несвязанные, АФМ-вращаемые и АФМ-закреплённые. Нижняя панель: диапазоны частот перемагничивания для этих четырёх типов зёрен. Штриховой линией показана частота возбуждения ФМР.

С увеличением эффективной толщины спейсера Cu частоты релаксации намагниченности ФМ-связанных зёрен становятся выше, чем частота ФМР, и основной вклад в ФМР даёт магнитная релаксация во вращаемых АФМ-зёрнах, определяющих два максимума на угловой зависимости резонансного поля.

На **рисунке 6а** показана зависимость расчётной доли поверхности NiFe, покрытой медью (линия 1), и электрического сопротивления R (линия 2) от эффективной толщины спейсера Cu. На **рисунке 6б** и **6в** представлены зависимости H_B и H_C от эффективной толщины спейсера Cu при $T = 300$ К (1) и 2 К (2). Поскольку проникновение волновых функций электронов или обмена электронами (при косвенном взаимодействии) из одного материала в другой ограничивается островками меди, естественно анализировать исследуемую систему в рамках теории перколяции. Резкий скачок обменного смещения и коэрцитивной силы при $S_{Cu}/S_{NiFe} \approx 0.78$ ($t_{Cu} \approx 0.5$ нм) свидетельствует о формировании бесконечного «магнитного «фрактала»».

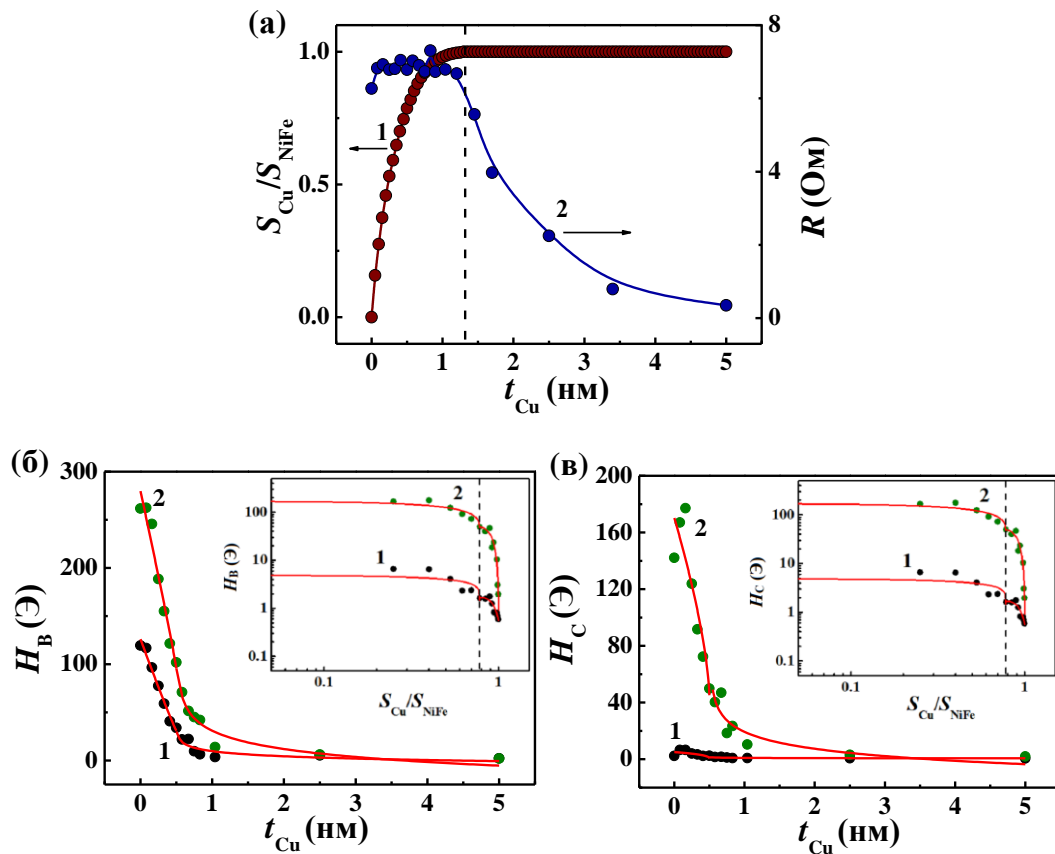


Рисунок 6. (а) Зависимости расчётной доли поверхности NiFe, покрытой медью S_{Cu}/S_{NiFe} (линия 1) и экспериментально определённого электрического сопротивления R (линия 2) от эффективной толщины спейсера Cu. Пунктирная линия соответствует эффективной толщине $t_{Cu} = 1.3$ нм. Зависимости полей H_B (б) и H_C (в) от эффективной толщины медной прослойки при температурах $T = 300$ К (1) и $T = 2$ К (2). На врезках представлены зависимости $H_B(S_{Cu}/S_{NiFe})$ и $H_C(S_{Cu}/S_{NiFe})$ в двойных логарифмических координатах для определения порога перколяции (пунктирная линия).

Неизменность электрического сопротивления в области толщин $t_{Cu} = 0.08$ – 1.3 нм объясняется наличием островков меди в плоскости структуры NiFe/Cu/IrMn, не соединённых между собой. «Магнитная» перколяция возникает при меньших эффективных толщинах $t_{Cu} \approx 0.5$ нм, чем «электрическая перколяция», так как зависит от трёхмерной системы неровностей ферромагнетика. Из фрактального анализа следует, что для обменного смещения и для коэрцитивной силы наблюдаются показатели степени, отвечающие трёхмерному фракталу.

Следующий набор измерений был направлен на подавление ошибок при измерениях коэрцитивной силы. При малых углах между магнитным полем и образцом случайные и технически неизбежные вариации этого угла на 5 – 10°

приводят к тому, что величина коэрцитивной силы может меняться в несколько раз. Разработан метод, основанный на модели Стонера-Вольфарта (SW), с помощью которого были восстановлены значения коэрцитивной силы в лёгкой оси. При этом были использованы данные МОКЕ в качестве эталонных измерений.

В четвёртой главе исследовано перемагничивание тонких обменно-смещённых плёнок NiFe/IrMn при термоциклировании и влияние спейсера Ta, введённого между слоями NiFe и IrMn, на магнитные свойства гетероструктур NiFe/Ta/IrMn.

Температурный гистерезис намагниченности (**рисунок 7**), сопровождающийся изменением полярности намагниченности, наблюдался в приложенном магнитном поле, близком к величине обменного смещения.

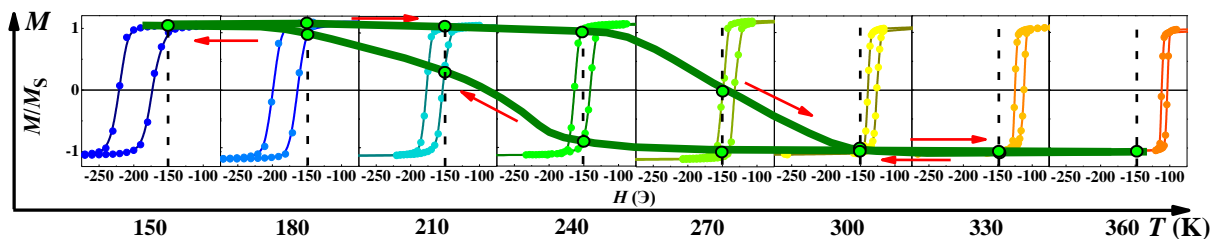


Рисунок 7. Серии петель $M(H)$ зарегистрированных в образце NiFe/IrMn в интервале температур 150–360 К. Сплошная линия, наложенная на петли гистерезиса, демонстрирует изменения магнитного момента в поле $H = -140$ Э, отмеченные в каждом гистерезисе вертикальной пунктирной линией. Движение по температурному гистерезису (показано стрелками) соответствует точкам, отмеченным в каждом гистерезисе при -140 Э, при развёртке температуры.

Наблюдаемая бистабильность магнитного состояния, выявляемая температурным гистерезисом, постепенно исчезает с увеличением числа термоциклов охлаждения-нагрев, что свидетельствует о необратимом изменении конфигурации межфазной намагниченности.

В пятой главе представлены результаты исследования синтетических ферритмагнетиков GdFeCo/Ir/GdFeCo, имеющих перпендикулярную магнитную анизотропию.

Для измерений электрического сопротивления, были выращены структуры с паттернами, через которые пропускали ток и снимали напряжение в магнитном поле. Образец устанавливается так, чтобы направление магнитного поля было перпендикулярным к направлению электрического тока и параллельным к намагниченности структуры GdFeCo/Ir/GdFeCo. В такой ориентации образца получена зависимость электрического сопротивления Холла от магнитного поля при $I = 1$ мА (рисунок 8). На врезке к рисунку 8 показаны намагниченности слоёв гетероструктуры в состояниях P^+ , P^- , AP^+ и AP^- и их соответствие уровням сопротивления (пунктирная линия) на зависимости электрического сопротивления Холла от магнитного поля.

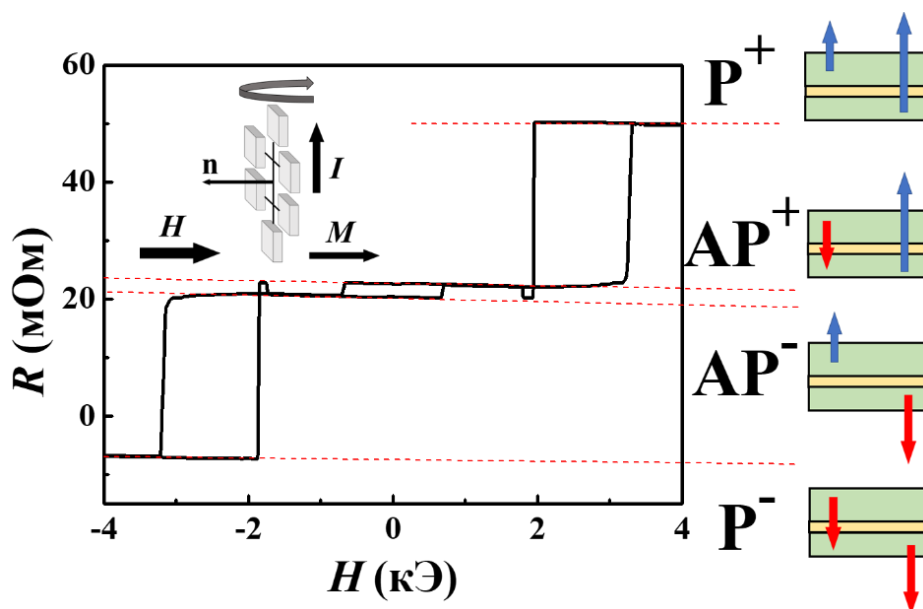


Рисунок 8. Зависимость сопротивления Холла от H при $I = 1$ мА и $T = 300$ К. Разные магнитные состояния показаны на врезке справа.

Были получены ориентационные зависимости параметров петель гистерезиса сопротивления Холла и модельные угловые зависимости намагниченности образца. Сходство этих зависимостей свидетельствует о том, что аномальный эффект Холла следует z-компоненте намагниченности гетероструктуры.

В общем случае сопротивление Холла в структурах GdFeCo/Ir состоит из вкладов классического эффекта Холла $R_{\text{ОНЕ}}$ и аномального эффекта Холла $R_{\text{АНЕ}}$, который, в свою очередь, состоит из двух компонент: спиновый эффект

Холла R_{SHE} и планарный эффект Холла R_{PHE} (анизотропное магнитосопротивление). Сопротивление Холла, как функция угла между полем и нормалью к плоскости образца θ и угла между электрическим током и внешним полем φ , может быть записано в виде:

$$R = R_{OHE} + R_{ANE} \cdot \cos \theta + R_{PHE} \cdot \sin^2 \theta \cdot \sin 2\varphi. \quad (1)$$

Чтобы наблюдать максимальное значение R_{PHE} , угол φ между электрическим током и внешним полем должен быть 0° , так как электрический ток параллелен магнитному моменту слоя $\mathbf{J}_{PHE} = \Delta\sigma_{AMR}(\mathbf{m} \cdot \mathbf{E})\mathbf{m}$, где \mathbf{E} приложенное поле, $\Delta\sigma_{AMR}$ анизотропная часть проводимости. В наших экспериментах $\varphi = 90^\circ$, так что третий член в сумме (1) равен нулю. Спиновый эффект Холла, напротив, не зависит от угла φ , но он зависит от угла θ варьируемого в наших опытах.

Напряжение должно коррелировать с динамикой доменных стенок. Резкий поворот намагниченного в плоскости образца в магнитном поле 1 Тл приводил к смещению порогового поля переключения SOT и его восстановлению к исходному значению (рисунки 9а и 9б).

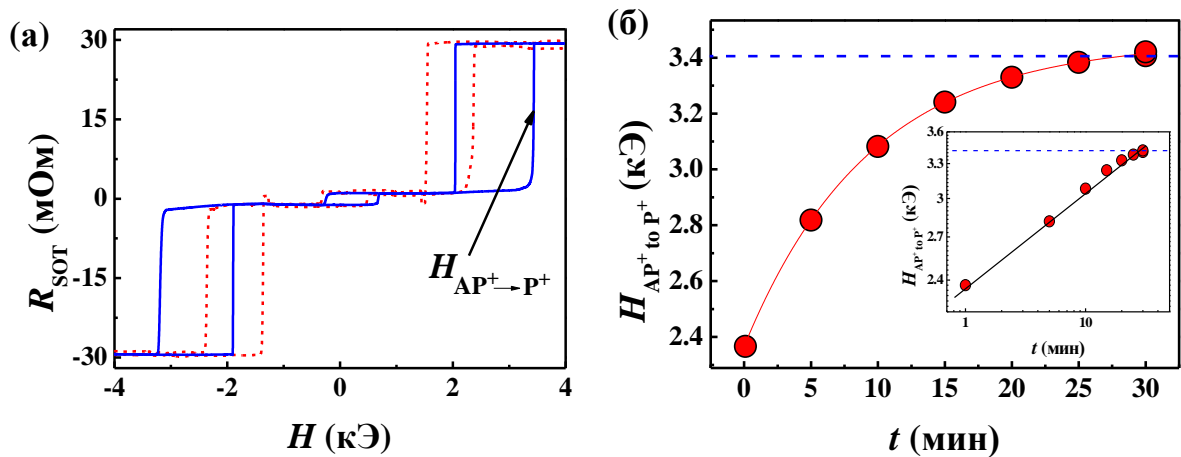


Рисунок 9. (а) Зависимости R_{SOT} от H в исходно размагниченном образце (сплошная линия) и в образце, намагниченном в параллельном магнитном поле 1 Тл (пунктирная линия). (б) Зависимость от времени поля переключения между состояниями AP^+ и P^+ , установленного по петлям $R(H)$, записанных в разное время после переориентации поля 1 Тл относительно образца. Сплошная линия – аппроксимация экспоненциальной функцией. Пунктирная линия – поле переключения в образце, не намагниченном в плоскости. На врезке представлена эта же зависимость в полулогарифмических координатах.

Из полученных результатов следует, что поле переключения, детектируемое по Холловскому напряжению, контролируется медленной динамикой доменных стенок.

ВЫВОДЫ

- 1) В гетероструктурах NiFe/Cu/IrMn и NiFe/Ta/IrMn определены химический и фазовый составы, а также зеренная структура ферро- и антиферромагнитных слоев. Обнаружен критический порог толщины спейсеров Cu и Ta на зависимостях резонансного поля ферромагнитного резонанса, сопротивления и намагниченности от толщины спейсеров.
- 2) Обнаружено, что магнитный перколяционный порог заметно ниже, чем порог, обнаруживаемый по изменению электрического сопротивления. Различие электрического и магнитного перколяционных порогов связано с тем, что магнитный порог вызван трехмерным магнитным-дипольным взаимодействием между ферромагнитными флуктуациями рельефа, а электрический порог обусловлен соединением островков напылённой меди проводящими мостиками в двух измерениях в структурах NiFe/Cu/IrMn.
- 3) В результате визуализации и статистического анализа зерен в ферромагнитных NiFe и антиферромагнитных IrMn слоях гетероструктур NiFe/Cu/IrMn установлено влияние размеров зерен и их взаимодействия друг с другом на обменное смещение и энергетические барьеры перемагничивания NiFe.
- 4) Выполнены измерения и произведена оценка обменного смещения в зависимости от наличия, химического состава и толщины спейсерного слоя в NiFe/Cu/IrMn и NiFe/Ta/IrMn.
- 5) Обнаружено пороговое влияние толщины спейсера на Бриллюэновское рассеяние света на тепловых спиновых волнах в структурах NiFe/Cu/IrMn. Определены величины вращающейся и одноосной анизотропий зерен NiFe.
- 6) В рамках модели Стонера-Вольфарта создана модель и предложен алгоритм пересчёта коэрцитивной силы, учитывающий случайность угла между магнитным полем и лёгкой осью намагничивания в NiFe/Cu/IrMn. Это

позволяет корректировать ошибки измерений, вызванные небольшими отклонениями в ориентации образца при его росте и анализе.

7) Обнаружен температурный гистерезис в NiFe/IrMn и предложен механизм его реализации, получены зависимости параметров гистерезиса от числа термоциклов, ориентации магнитного поля и лёгкой оси намагничивания. Обнаружены домены в ферромагнитном слое, и установлена динамика их развития при малом отклонении поля от легкой оси намагничивания.

8) Из угловой зависимости напряжения Холла выделен аномальный эффект Холла, переключение которого следует суммарной намагниченности синтетического ферромагнетика с перпендикулярной анизотропией. Обнаружена медленная (~ 30 мин) релаксация аномального сопротивления Холла при переориентации двухслойной структуры GdFeCo/Ir/GdFeCo в магнитном поле в 1 Тл.

Список литературы

- 1) Baltz V., Manchon A., Tsoi M., Moriyama T., Ono T., Tserkovnyak Y. Antiferromagnetic spintronics // *Rev. Mod. Phys.* –2018. –V. 90. –P. 015005.
- 2) Manna P., Yusuf S. Two interface effects: Exchange bias and magnetic proximity // *Phys. Rep.* –2014. –V. 535. –P. 61.
- 3) King J.P., Chapman J.N., Gillies M.F., Kools J.C.S. Magnetization reversal of NiFe films exchange-biased by IrMn and FeMn // *J. Phys. D: Appl. Phys.* –2001. –V. 34. –P. 528.
- 4) Hung T.Q., Oh S., Sinha B., Jeong J.R., Kim D.Y., Kim C.G. High field-sensitivity planar Hall sensor based on NiFe/Cu/IrMn trilayer structure // *J. Appl. Phys.* –2010. –V. 107. –P. 09E715.
- 5) Shao Q., Li P., Liu L., Yang H., Fukami S., Razavi A., Wu H., Wang K., Freimuth F., Mokrousov Y., Stiles M.D., Emori S., Hoffmann A., Akerman J., Roy K., Wang J.-P., Yang S.-H., Garello K., Zhang W. Roadmap of spin-orbit torques // *IEEE Trans. Magn.* –2021. –V. 57. –P. 800439.

ПУБЛИКАЦИИ

Статьи (Web of Science) – 8

- 1) M. Bakhmetiev, A. Talantsev, A. Sadovnikov, R. Morgunov. Modulation of interfacial magnetic relaxation timeframes by partially uncoupled exchange bias. *J. Phys. D: Appl. Phys.* –2022. –V. 55. –P. 105001.
- 2) A. Talantsev, M. Bakhmetiev, R. Morgunov. Thermal hysteresis of magnetization in NiFe/IrMn exchange-biased ferromagnet // *J. Phys. D: Appl. Phys.* –2022. –V. 55. –P. 315002.
- 3) A.D. Talantsev, M.V. Bakhmetiev, R.B. Morgunov. Robust evaluation of coercivity in exchange biased films // *Measurement.* –2022. –V. 204. –P. 112074.
- 4) M.V. Bakhmetiev, V.A. Gubanov, A.V. Sadovnikov, R.B. Morgunov. Spin-wave excitations in NiFe/Cu/IrMn heterostructures with a variable thickness copper spacer // *JETP.* –2022. –V. 134. –P. 204-210.
- 5) M.V. Bakhmetiev, A.D. Talantsev, R.B. Morgunov. Sharp change in the exchange bias and the magnetic anisotropy symmetry at a subthreshold interlayer copper content in NiFe/Cu/IrMn heterostructures // *JETP.* –2021. –V. 132. –P. 852-864.
- 6) R.B. Morgunov, M.V. Bakhmetiev, A.D. Talantsev. A decrease in the exchange bias caused by an increase in the effective thickness of the copper layer in the NiFe/Cu/IrMn heterostructures // *Phys. Solid State.* –2020. –V. 11. –P. 1991-1997.
- 7) R.B. Morgunov, A.D. Talantsev, M.V. Bakhmetiev, N.V. Granovskii. Exchange interactions in NiFe/Ta/IrMn heterostructures under conditions of tantalum deficiency // *Phys. Solid State.* –2020. –V. 62. –P. 1033-1038.
- 8) R.B. Morgunov, A.I. Bezverkhniy, O.S. Dmitriev, M.V. Bakhmetiev. Conditions for the occurrence of spontaneous oscillating magnetic relaxation in synthetic Pt/Co/Ir/Co/Pt ferrimagnets // *Phys. Solid State.* –2020. –V. 62. –P. 458-463.

Тезисы – 10

- 1) Е.С. Губанов, М.В. Бахметьев, О.В. Коплак. Электронный транспорт в ферримагнитных структурах $Gd_{24.6}(Fe_{90}Co_{10})_{75.4}/Ir/Gd_{24.6}(Fe_{90}Co_{10})_{75.4}$.

XXXIV Симпозиум Современная химическая физика. Туапсе, 16 – 25 сентября 2022 г. с. 171.

2) М.В. Бахметьев, Р.Б. Моргунов. Корреляция между ширинами линий FMR и BLS в обменно-смещенных тонких пленках NiFe/Cu/IrMn с переменной толщиной Cu. XXXIV Симпозиум Современная химическая физика. Туапсе, 16 – 25 сентября 2022 г. с. 47 – 48.

3) М.В. Бахметьев, Р.Б. Моргунов. Сдвиг резонансных частот рассеяния спиновых волн в обменно-смещенной гетероструктуре NiFe/Cu/IrMn. XXXIV Симпозиум Современная химическая физика. Туапсе, 16 – 25 сентября 2022 г. с. 46 – 47.

4) M.V. Bakhmetiev, A.D. Talantsev, R.B. Morgunov. Frequency of magnetization reversal of grains NiFe and IrMn in exchange-biased thin films NiFe/Cu/IrMn. X International Voevodsky Conference. Новосибирск, 5 – 9 сентября 2022 г. с. 238.

5) M.V. Bakhmetiev, R.B. Morgunov, O.V. Koplak, S. Mangin. Slow relaxation of the Anomalous Hall Effect in GdFeCo/Ir/GdFeCo. X International Voevodsky Conference. Новосибирск, 5 – 9 сентября 2022 г. с. 237.

6) A. Talantsev, A. Elzwawy, M. Bakhmetiev, C. Kim. Topological effect of interface texture on the exchange bias in ferro-antiferromagnet thin films grown hybrid seed layers. 2022 Joint MMM-Intermag. New Orleans, LA, 10 января – 14 января 2022 г. с. EPA-09.

7) М.В. Бахметьев, А.Д. Таланцев, Р.Б. Моргунов. Влияние электронов проводимости на величину обменного взаимодействия в гетероструктурах NiFe/Cu/IrMn. Международная научная конференция «Современная химическая физика – на стыке физики, химии, биологии». Черноголовка, 29 ноября – 3 декабря 2021 г. с. 104–105.

8) Е.С. Губанов, М.В. Бахметьев, О.В. Коплак. Спиновая динамика в ферромагнитных наноструктурах GdFeCo. XXXIII Симпозиум Современная химическая физика. Туапсе, 24 сентября – 4 октября 2021 г. с. 246.

9) М.В. Бахметьев, Р.Б. Моргунов. Преобладание вкладов межфазных дефектов в коэрцитивную силу и поле обменного смещения в

гетероструктурах NiFe/Cu/IrMn. Конференция по использованию рассеяния нейтронов в исследовании конденсированных сред (РНИКС-2021). Екатеринбург, 27 сентября – 1 октября 2021 г. с. 160–161.

10) M. Bakhmetiev, A. Talantsev, A. Elzwawy. Ta/Au and Ta/Cu hybrid seed layers for gradual tailoring of texture and exchange bias in NiFe/IrMn exchange biased films. Abstract book of international workshop on functional MAX-materials (2nd FunMax). Красноярск, 14 сентября – 17 сентября 2021 г. с. 122–123.