

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи

Макаров Андрей Владимирович

**Исследование структурных, магнитных и
магнитооптических свойств трёхслойных тонкоплёночных систем
Fe/полидифениленфталид/Fe, Co/Gd/Co и Co/Cu/Co**

Специальность 1.3.12. «Физика магнитных явлений»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 2023

Работа выполнена на кафедре магнетизма
физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель **Шалыгина Елена Евгеньевна**
доктор физико-математических наук,
профессор

Официальные оппоненты **Юрасов Алексей Николаевич**
доктор физико-математических наук,
доцент, профессор кафедры
нанoeлектроники Института
перспективных технологий и
индустриального программирования РГУ
МИРЭА

Пятаков Александр Павлович
доктор физико-математических наук,
профессор кафедры физики колебаний
физического факультета МГУ имени М.В.
Ломоносова

Бузников Никита Александрович
доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник лаборатории
внутрипромыслового газа ООО Газпром
ВНИИГАЗ

Защита диссертации состоится «5» октября 2023 г. в 15 часов 20 минут на заседании диссертационного совета МГУ.013.5 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1 стр. 8, криогенный корпус, конференц-зал.

Email: perov@magn.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/013.5/2583>

Автореферат разослан « » 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

Т.Б. Шапаева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Интенсивные исследования тонкоплёночных магнитных систем, толщина которых не превышает десятки нанометров, выполняются с середины XX века. Уникальные физические эффекты, которыми они обладают, обуславливают актуальность исследования их магнитных свойств, как для фундаментальной науки, так и для практических приложений.

В частности, в тонкоплёночных системах, которые состоят из магнитных и немагнитных¹ слоёв, расположенных поочерёдно, наблюдалось косвенное обменное взаимодействие, действующее между слоями из ферромагнетика, и гигантское магнитосопротивление [1]. Эти эффекты оказались востребованы для различных практических применений. Примечательно, что константа косвенного обменного взаимодействия осциллирует при увеличении толщины немагнитной прослойки. Это приводит к тому, что при определённых значениях толщины немагнитной прослойки магнитные моменты слоёв при отсутствии магнитного поля были упорядочены антипараллельно.

Следует отметить, что толщина слоёв тонкоплёночных магнитных систем соизмерима с длиной волны электрона. Это приводит к квантованию спектра электронов в направлении, перпендикулярном поверхности плёнки, а также появлению периодической зависимости электронных и магнитных свойств системы от толщины. Указанная особенность наблюдалась при изучении магнитных и магнитооптических свойств плёнок и получила название квантового размерного эффекта, которое особенно проявлялось в тонкоплёночных системах с прослойкой из благородного металла, например, меди или серебра.

Особый интерес представляет возможность управления магнитными свойствами многослойных тонкоплёночных систем. В работах [2–4] было обнаружено, что свойства зависят от условий изготовления систем, толщины слоёв и параметров нанокристаллической структуры. Таким образом, измерив петли гистерезиса образцов с различной толщиной слоёв и проанализировав влияние нанокристаллической структуры на их магнитные свойства, можно получать тонкие плёнки с заданными характеристиками.

¹ Немагнитными материалами называют те материалы, в которых обменные взаимодействия, действующие между магнитоактивными ионами и упорядочивающие их магнитные моменты, практически отсутствуют.

При исследованиях магнитных трёхслойных систем с немагнитной прослойкой из диамагнитного, парамагнитного и полупроводникового материала, проведённых в МГУ им. Ломоносова на кафедре магнетизма, которая расположена на физическом факультете, были установлены их основные магнитные свойства. Для всех образцов наблюдалась зависимость магнитных характеристик образцов при изменении толщины немагнитной прослойки. Проведённые исследования позволили установить зависимость магнитных характеристик образцов от их толщины при комнатной температуре, рассчитать периоды осцилляций обменного взаимодействия, а также определить толщину прослоек, при которых наблюдается обменное взаимодействие, которое характеризуется антипараллельным расположением магнитных моментов ферромагнитных слоёв [5, 6].

С целью получения более полной информации об обменном взаимодействии и магнитных характеристиках тонкоплёночных систем необходимо изучение влияния температуры на их магнитные характеристики и поведение в магнитном поле. Проведённые ранее исследования многослойных систем $[\text{Co}/\text{Cu}]_n$ [7] и трехслойных $\text{Co}/\text{Ru}/\text{Co}$ [8] показали, что РККИ обменное взаимодействие (за исключением $\text{Co}/\text{Ru}/\text{Co}$ с $t_{\text{Ru}} = 0.6$ нм) уменьшается с ростом температуры. Причиной наблюдаемого уменьшения обменного взаимодействия является возникновение спиновых волн в магнитных слоях, а также изменение фазового сдвига волновых функций электронов при отражении на интерфейсах [9]. Предполагалось, что исследование температурной зависимости магнитных свойств систем будет способствовать более полному пониманию того, как обменное взаимодействие влияет на их магнитные характеристики. Для решения этих проблем исследовалась зависимость от температуры магнитных свойств и поведения в магнитном поле $\text{Co}/\text{Cu}/\text{Co}$ систем с прослойкой из диамагнитной меди (Cu) и $\text{Co}/\text{Gd}/\text{Co}$ с гадолиниевой прослойкой. Кроме того, эти измерения полезны для практических применений, так как с их помощью можно будет определить диапазон температур, в котором исследуемые системы проявляют наиболее интересные, заслуживающие внимания свойства и характеристики.

Поскольку гадолиний проявляет ферромагнитные свойства ниже комнатной температуры, то он должен оказывать сильное влияние на свойства систем $\text{Co}/\text{Gd}/\text{Co}$ при низких температурах. Многочисленные исследования $[\text{Co}/\text{Gd}]_n$ и $[\text{Fe}/\text{Gd}]_n$ систем свидетельствовали, что на интерфейсе, разделяющем слой гадолиния и слой ферромагнетика, формируется сильное антиферромагнитное обменное взаимодействие,

которое приводит к тому, что магнитные моменты соседних слоёв вблизи границы раздела направлены антипараллельно. Изучение систем Co/Gd предопределило разработку новых устройств для микро- и наноэлектроники, таких как сенсоры магнитного поля и элементы для магнитооптической записи.

Необходимо также отметить следующий факт. Интерес к проводящим полимерам в современной нано- и микроэлектронике стимулировал изучение магнитных свойств тонких магнитных плёнок с полимерной прослойкой. В качестве такого материала был выбран полидифениленфталид (ПДФ), обладающий уникальными свойствами. Активные исследования показали, что в обычных условиях тонкие ПДФ плёнки (толщиной меньше 1 микрометра) проявляют диэлектрические свойства. Однако при слабом внешнем воздействии, например, давлением или магнитным полем, они испытывают переход в высокопроводящее состояние [10, 11]. Это позволило создать на их основе магнитные структуры, которые характеризуются высоким магнитосопротивлением вплоть до 10^7 % в магнитном поле порядка 100 мТ [12]. В связи с этим их изучение заслуживает внимания с точки зрения разработки высокочувствительных спиновых клапанов.

Следует отметить, что в результате многочисленных исследований свойств полидифениленфталида ранее был получен большой объём информации. Однако влияние слоёв полимера на магнитные и магнитооптические свойства многослойных систем практически не изучалось. С этой точки зрения наибольшего внимания заслуживали трёхслойные системы нанометровой толщины, состоящие из двух ферромагнитных слоёв и промежуточного слоя полидифениленфталида.

Для трёхслойных Fe/ПДФ/Fe и Co/Gd/Co структур также проводилось изучение магнитооптических спектров экваториального эффекта Керра (ЭЭК). Ранее при исследовании спектральных зависимостей ЭЭК для двухслойных структур Co/Si и Si/Co было подтверждено влияние состава верхнего слоя на величину эффекта. Изучение спектральных зависимостей ЭЭК образцов Fe/ПДФ/Fe и Co/Gd/Co могут способствовать получению дополнительных сведений об их электронной структуре и особенностях фазового состава образцов.

Цель работы

Целью данной работы является исследование структурных, магнитных и магнитооптических свойств, а также температурных зависимостей магнитополевого поведения трёхслойных тонкоплёночных систем Fe/полидифениленфталид/Fe, Co/Gd/Co и Co/Cu/Co.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

I. В случае Fe/ПДФ/Fe образцов

1. Исследована морфология поверхности тонкоплёночных Fe/ПДФ/Fe систем.
2. Проведён анализ особенностей магнитополевого поведения Fe/ПДФ/Fe образцов.
3. Исследованы зависимости магнитных характеристик Fe/ПДФ/Fe образцов от толщины слоёв железа и полидифениленфталида.
4. Изучены особенности спектральных зависимостей ЭЭК Fe/ПДФ/Fe систем.

II. В случае Co/Gd/Co образцов

1. Изучена морфология поверхности тонкоплёночных систем.
2. Исследованы особенности петель гистерезиса для Co/Gd/Co систем с различной толщиной слоя гадолия и рассчитаны их магнитные характеристики.
3. Исследованы изменения поля насыщения и коэрцитивной силы Co/Gd/Co структур при уменьшении температуры от 300 до 100 К.
4. Изучены магнитооптические свойства тонкоплёночных трёхслойных систем Co/Gd/Co и их зависимость от толщины слоя гадолия.

III. В случае Co/Cu/Co образцов

1. Изучены особенности магнитополевого поведения трёхслойных Co/Cu/Co тонкоплёночных систем в температурном диапазоне от 100 до 350 К.
2. Изучено изменение формы петель гистерезиса при увеличении температуры от 100 до 350 К для трёхслойных тонкоплёночных Co/Cu/Co структур.

Положения, выносимые на защиту:

1. В тонкоплёночных системах Fe/ПДФ/Fe петли гистерезиса, измеренные вдоль длины образцов, имеют двухступенчатую форму с размером ступенек, зависящим от толщины ПДФ слоя. Причиной возникновения двухступенчатой петли гистерезиса является магнитоэлектронное взаимодействие между слоями кобальта, роль обменного взаимодействия незначительна. Значения поля насыщения и коэрцитивной силы при одинаковой толщине магнитных слоёв уменьшаются с увеличением толщины промежуточного ПДФ слоя из-за уменьшения взаимодействия.

2. Гадолиний оказывает существенное влияние на магнитные свойства системы Co/Gd/Co, которое проявляется в зависимости магнитного момента Co/Gd/Co от температуры и толщины прослойки. Кроме того, образец с толщиной гадолиния, равной 9.0 нм, при $T = 150$ К характеризуется минимальным значением магнитного момента и безгистерезисной формой петли перемагничивания, что указывает на состояние магнитной компенсации. Интенсивность магнитооптического эффекта Керра Co/Gd/Co образцов уменьшается с ростом толщины гадолиниевого слоя, поскольку уменьшается вклад нижнего слоя кобальта в магнитооптический сигнал.

3. Коэрцитивная сила и поле насыщения образцов Co/Cu/Co возрастают при уменьшении температуры от 350 до 100 К, что обусловлено усилением обменного РККИ-взаимодействия между слоями кобальта и увеличением магнитной анизотропии структуры. Вместе с тем для Co/Cu/Co образца с $t_{Cu} = 3.2$ нм наблюдается двухступенчатая петля гистерезиса при комнатной температуре. Увеличение размера ступеньки петли гистерезиса для данного образца при уменьшении температуры вызвано усилением обменного РККИ-взаимодействия между слоями кобальта.

Научная новизна работы

1. Впервые исследовано магнитополевое поведение и магнитные характеристики тонкоплёночных Fe/ПДФ/Fe образцов. Обнаружены особенности петель гистерезиса образцов. Для изучаемых образцов наблюдались двухступенчатые петли гистерезиса. При этом размер ступеньки находился в зависимости от толщины слоя ПДФ.
2. Найдено, что вид магнитооптических спектров и значение экваториального эффекта Керра для тонкоплёночных Fe/ПДФ/Fe образцов изменяется в зависимости от толщины слоя ПДФ. Максимальное значение ЭЭК наблюдается при минимальном значении толщины ПДФ слоя.
3. Впервые изучено влияние температуры на магнитополевое поведение и магнитные характеристики тонкоплёночных трёхслойных Co/Gd/Co образцов. Обнаружено, что магнитный момент образцов с толщиной гадолиния, равной 4.6 нм и 6.0 нм, увеличивается с ростом температуры. Для образца с толщиной гадолиния, равной 9.0 нм, наблюдалось минимальное значение магнитного момента и безгистерезисная петля перемагничивания. Найдено, что коэрцитивная сила всех образцов уменьшается с ростом температуры.

4. Установлено, что магнитооптические спектры трёхслойных Co/Gd/Co систем и плёнок кобальта подобны. Это позволяет утверждать, что слой гадолиния практически не влияет на вид спектральных зависимостей Co/Gd/Co образцов. Найдено, что с ростом толщины гадолиниевого слоя экваториальный эффект Керра изучаемых образцов уменьшается.
5. Впервые было изучено влияние температуры на магнитное поведение и магнитные характеристики трёхслойных тонкоплёночных систем Co/Cu/Co. Обнаружено увеличение поля насыщения и коэрцитивной силы образцов при уменьшении температуры от 350 до 100 К.

Достоверность результатов

Для магнитных и магнитооптических измерений были использованы современные экспериментальные установки. Полученные данные обрабатывались на компьютере с применением математических программ. Для изучения различных свойств магнитных систем применялись современные экспериментальные методики, которые дополняли друг друга. Кроме того, повторные измерения показали, что образцы имеют хорошую воспроизводимость результатов. Учитывая это, можно отметить высокую достоверность полученных в диссертационном исследовании результатов.

Практическая значимость работы.

Результаты, полученные в данной работе при исследовании свойств трёхслойных систем, полезны для создания новых магнитных материалов в области микро- и нанoeлектроники. Например, знание о влиянии полидифениленфталаида на магнитные свойства Fe/ПДФ/Fe систем, вызывает большое внимание при синтезе новых магнитных структур с полимерными слоями и создании устройств спинтроники, в которых полимерный слой обеспечивает перенос спина. Изучение магнитных и магнитооптических свойств трёхслойных Co/Gd/Co систем востребовано при разработке новых тонкоплёночных структур на основе редкоземельных металлов. Такие структуры могут найти широкое применение в устройствах микро- и нанoeлектроники, например, для магнитной записи. Кроме того, не вызывает сомнения тот факт, что экспериментальный анализ влияния температурной зависимости магнитных характеристик трёхслойных систем с ферромагнитными слоями будет способствовать более глубокому пониманию обменного взаимодействия в изучаемых материалах.

Апробация работы

Результаты, полученные в настоящей работе, были представлены в 8 докладах на научных конференциях в России: XXIV Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых “Ломоносов-2017” Секция “Физика”, Москва, Россия; Moscow International Symposium on Magnetism (MISM 2017), Москва, Россия; XXV Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых “Ломоносов-2018”, Москва, Россия; VII Euro-Asian Symposium “Trends in Magnetism (EASTMAG-2019)”, Екатеринбург, Россия; Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых “Ломоносов-2020”, Москва, Россия; XXIV Международная конференция “Новое в магнетизме и магнитных материалах”, 2021, Москва, Россия; Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых “Ломоносов-2022”, Москва, Россия; VIII Euro-Asian Symposium “Trends in Magnetism (EASTMAG-2022)”, Казань, Россия.

Публикации

По теме диссертации опубликованы 7 статей в российских и зарубежных журналах, из них 4 индексируются в базе данных Scopus и Web of Science. Кроме того, опубликованы 8 тезисов докладов в трудах конференций. Список публикаций приведён в конце автореферата.

Личный вклад автора

Автором вместе с научным руководителем составлены задачи проводимых исследований и определена цель работы. Приведённые в научно-квалификационной работе данные были получены автором самостоятельно в процессе работы на экспериментальном оборудовании. Результаты, полученные в работе, анализировались и интерпретировались автором совместно с научным руководителем. На основе прочтения различных научных статей и книг был составлен литературный обзор по теме диссертации. Также автор принимал участие в подготовке и обсуждении научных публикаций.

Структура и объём диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения, списка цитируемой литературы. Общий объём работы составляет 122 страницы, включая 54 рисунка и список использованных источников из 161 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении диссертации обосновывается актуальность темы исследования и сформулирована цель работы. Приведена характеристика научной новизны проводимых исследований, отражены достоверность полученных результатов и их практическая значимость. Описаны степень апробации и личный вклад автора, а также приведены подробная структура диссертации и её объём.

Первая глава представляет литературный обзор научных статей и книг, содержащий анализ выполненных к настоящему времени исследований магнитных свойств разнообразных тонкоплёночных магнитных систем, в частности, систем железо/полидифениленфталид, редкоземельный металл/переходный металл и кобальт/медь. Эти работы представляют большую ценность для диссертационного исследования, так как полученные в них результаты способствуют лучшему пониманию проводимых измерений и правильной постановке решаемых задач.

Во второй главе приведено описание изготовления трёхслойных образцов Fe/полидифениленфталид(ПДФ)/Fe, Co/Gd/Co, а также Co/Cu/Co, представлены описания основных методик эксперимента, которые применялись в диссертационном исследовании. Проанализированы погрешности эксперимента.

Изучаемые образцы Fe/ПДФ/Fe были изготовлены в Институте физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН Воробьёвой Н. В. Для того, чтобы синтезировать тонкие слои полидифениленфталида, применялся метод центрифугирования из раствора полидифениленфталида в циклогексаноне, концентрация которого устанавливалась толщиной слоя. Слои железа напылялись с помощью вакуумного термодиффузионного напыления. В качестве подложки использовалось стекло. Толщина как верхнего, так и нижнего слоя железа варьировалась для различных образцов от 14 до 50 нанометров, а толщина промежуточного слоя полидифениленфталида изменялась от 6 до 35 нанометров. Было получено десять образцов с разной толщиной слоёв Fe и ПДФ. Толщина слоёв контролировалась с помощью интерферометра МП-4М, а также атомно-силового микроскопа. Ширина и длина образцов были равны 7 и 10 миллиметров.

В диссертационном исследовании были изучены трёхслойные тонкие плёнки Co/Gd/Co с гадолиниевой прослойкой и Co/Cu/Co с медной прослойкой, полученные Сваловым А. В. Для их изготовления применялся метод ионно-плазменного напыления на магнетроне. Температура при напылении была равна комнатной. Перед напылением плёнки на очищенную подложку из стекла Corning 2845 наносился слой

тантала толщиной 5.0 нм. Подложка имела значение шероховатости порядка 0.5 нм, которое было намного меньше толщины плёнки. Кроме того, для защиты образцов от возможного окисления в атмосферных условиях были напылены слои тантала, толщина которых равна 5.0 нм. Следует отметить, что для образцов была создана наведённая магнитная анизотропия. Для этого образцы помещались в магнитное поле величиной 250 Эрстед вдоль одной из сторон.

Для Co/Gd/Co образцов толщины слоя кобальта были равны 5.0 нм, а гадолиния варьировались от 0.1 до 9.0 нм. Всего изучалось шесть образцов с толщинами гадолиния, равными 0.1, 1.0, 3.0, 4.6, 6.0 и 9.0 нм. Время и скорость напыления для каждого материала определяли толщину получаемого слоя. Для образцов Co/Gd/Co скорость напыления слоёв для Co была порядка 2.6 нм/мин, а для гадолиния – 2.8 нм/мин, соответственно. Ширина и длина образцов были равны 10 мм в магнитооптических измерениях и 5 мм при исследовании низкотемпературных свойств из-за особенностей установки.

В Co/Cu/Co образцах толщина слоёв кобальта, как верхнего, так и нижнего, для всех образцов была равна 5.0 нм. Слой меди имел толщину от 0.5 нм до 4.0 нм для разных образцов. В измерениях при низких температурах были использованы образцы с толщиной медного слоя, равной 1.4, 2.2, 3.2 и 4.0 нм. Выбор первых трёх образцов был обусловлен тем, что данные образцы при комнатной температуре проявляют антиферромагнитное межслойное обменное взаимодействие между верхним и нижним слоями кобальта, разделёнными слоем меди. Кроме того, для сравнения дополнительно был исследован образец с толщиной слоя меди, равной 4.0 нм. Скорость напыления составляла 0.4 нм/с для Co и 0.3 нм/с для Cu. Знание скорости напыления позволяло рассчитать время для напыления слоя необходимой толщины.

В **Третей главе** приведены результаты, полученные при изучении морфологии, структурных, магнитных и магнитооптических свойств Fe/полидифениленфталид/Fe, Co/Gd/Co, а также Co/Cu/Co структур.

В разделе 3.1 приведены результаты, полученные при исследовании морфологии поверхности, магнитных и магнитооптических свойств трёхслойных тонкоплёночных систем Fe/полидифениленфталид/Fe.

Раздел 3.1.1 посвящён исследованиям морфологии изучаемых систем. На рисунке 1 приведены типичные трёхмерные изображения поверхности, полученные на атомно-силовом микроскопе для изучаемых тонкоплёночных Fe₁/ПДФ/Fe₂ систем.

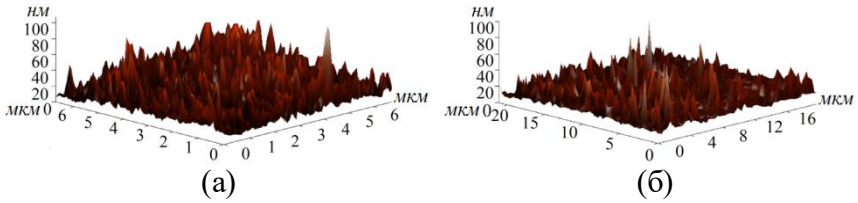


Рис. 1. АСМ изображения трёхмерные, полученные для образцов $Fe(16 \text{ нм})/ПДФ(20 \text{ нм})/Fe(15 \text{ нм})$, значение R_a приблизительно равно 8 нм (а), а также $Fe(30 \text{ нм})/ПДФ(13 \text{ нм})/Fe(30 \text{ нм})$, значение R_a приблизительно равно 5 нм (б) [А1].

Изображения, полученные на магнитном силовом микроскопе для изучаемых тонкоплёночных $Fe_1/ПДФ/Fe_2$ систем приведены на рисунке 2.

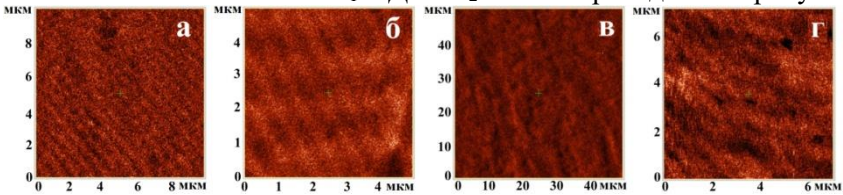


Рис. 2. Изображения доменной структуры, полученные на магнитном силовом микроскопе для образцов $Fe(16 \text{ нм}) / ПДФ(20 \text{ нм}) / Fe(15 \text{ нм})$ (а, б), а также $Fe(30 \text{ нм})/ПДФ(13 \text{ нм})/Fe(30 \text{ нм})$ (в, г) [А1].

Исследование полученных результатов на магнитном силовом микроскопе и атомном силовом микроскопе выявило следующие закономерности. Среднее значение шероховатости, которое обозначено как R_a , трёхслойных $Fe/ПДФ/Fe$ тонкоплёночных структур составляет порядка 5–8 нм. При этом происходит уменьшение значения средней шероховатости в том случае, когда увеличивается толщина магнитного слоя. На приведённых изображениях показана доменная структура поверхности образцов. Было найдено, что при увеличении толщины железного слоя образцов от 16 до 30 нм происходит изменение их доменной структуры от полосовой к хаотической.

В разделе 3.1.2. представлены результаты исследования магнитного поведения образцов $Fe/ПДФ/Fe$. Были изучены локальные кривые намагничивания приповерхностных слоёв и объёмные петли гистерезиса в плоскости образца. Внешнее магнитное поле H прикладывалось вдоль длинной и короткой стороны образца (D1- и D2-направления, соответственно). Измерения проводились в нормальных атмосферных условиях, при комнатной температуре. Локальные кривые намагничивания были получены в некоторых точках, расположенных

около центра образца. Проведение измерений в нескольких точках было необходимо, чтобы проверить влияние выбора области измерений на магнитооптические свойства образцов.

Локальные кривые намагничивания, которые измерялись в магнитном поле вдоль направления D1 на магнитооптическом магнитометре, представлены на рисунке 3.

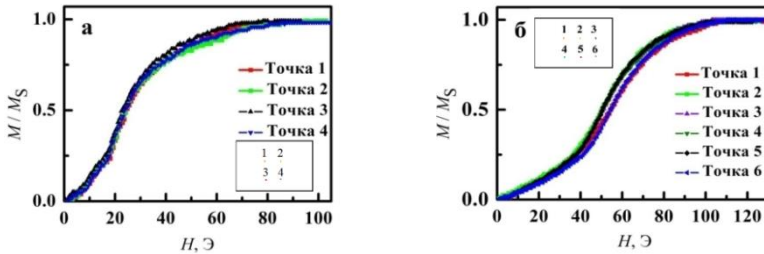


Рис. 3. Измеренные на магнитооптическом магнитометре локальные кривые намагничивания для образцов $Fe_1/PD\Phi/Fe_2$ с $t_{Fe1} = 16$ нм, $t_{PD\Phi} = 10$ нм и $t_{Fe2} = 15$ нм; $t_{Fe1} = 24$ нм, $t_{PD\Phi} = 28$ нм и $t_{Fe2} = 16$ нм; $t_{Fe1} = 24$ нм, $t_{PD\Phi} = 6$ нм и $t_{Fe2} = 16$ нм; $t_{Fe1} = 14$ нм, $t_{PD\Phi} = 18$ нм и $t_{Fe2} = 50$ нм (а, б, в, г, соответственно) [A1].

Измерения были проведены в нескольких точках вблизи центра образца. Точки были выбраны случайно, чтобы определить, какое влияние на магнитооптические свойства оказывает выбор области измерения, так как размер изучаемой области образца не превышает 20 нм. Было обнаружено, что в случаях рис. 22 (а), (в) и (г) кривые намагничивания, измеренные в различных точках, совпадают. В случае рис. 22 (б) кривые почти совпадают, но наблюдается небольшое расхождение кривых намагничивания в диапазоне 40 – 60 Э. С ростом магнитного поля скорость повышения намагниченности уменьшается.

При изучении приповерхностных локальных кривых намагничивания было найдено, что разница между значениями локального поля насыщения вблизи поверхности не превышает 10 %. Так как измерения проводились в слабом магнитном поле порядка 100–200 Эрстед, то поле насыщения можно определить по кривой намагничивания – это величина поля, соответствующая 98 % максимального значения намагниченности.

На рисунках 4 и 5 продемонстрированы объёмные петли гистерезиса, которые были получены при измерениях на вибрационном магнитометре.

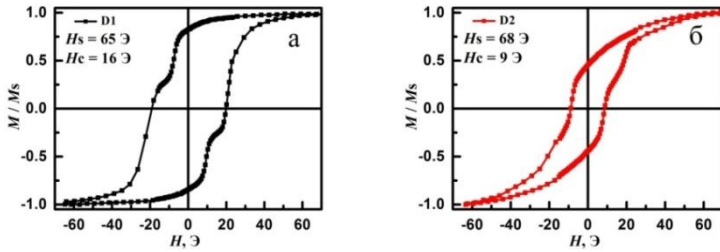


Рис. 4. Петли гистерезиса, измеренные для образца $Fe(17 \text{ нм})/ПДФ(10 \text{ нм})/Fe(16 \text{ нм})$ в магнитном поле, которое прикладывалось параллельно двум различным направлениям D1 и D2 (а и б, соответственно) [A2].

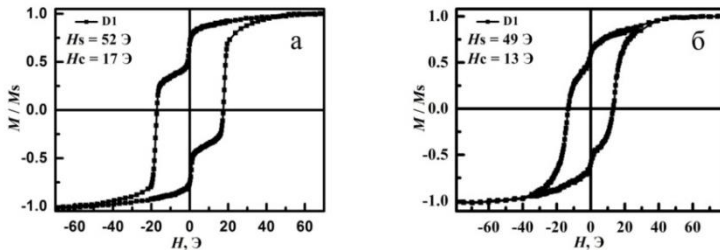


Рис. 5. Петли гистерезиса, измеренные для образцов $Fe(14 \text{ нм})/ПДФ(18 \text{ нм})/Fe(50 \text{ нм})$ (а) и $Fe(14 \text{ нм})/ПДФ(35 \text{ нм})/Fe(50 \text{ нм})$ (б) в магнитном поле, которое прикладывалось вдоль направления D1 [A1].

Сравнение петель гистерезиса, измеренных вдоль длины образца (D1) и его ширины (D2) показало, что их форма различается. Для иллюстрации полученных данных на рисунке 4 приведены соответствующие петли гистерезиса (вдоль длины D1 слева, вдоль D2 ширины справа). Обнаружено, что поле насыщения больше при измерении петель гистерезиса в направлении D2, чем вдоль направления D1, а коэрцитивная сила меньше. Таким образом, у изучаемых образцов присутствует одноосная магнитная анизотропия. ОЛН направлена вдоль длины образцов.

Петли гистерезиса, измеренные параллельно направлению D1, характеризуются двухступенчатой формой. Анализ полученных данных свидетельствовал о том, что наличие двухступенчатой петли гистерезиса обусловлено значительным различием толщин магнитных слоёв. Вместе с тем, размер ступеньки петли гистерезиса увеличивается с уменьшением толщины слоя полидифениленфталаида, что показано на рисунке 5. В этом случае, учитывая результаты расчётов для трёхслойных систем [13],

можно сделать вывод, что на магнитное поведение $Fe_1/ПДФ/Fe_2$ образцов при намагничивании вдоль D1 оказывает влияние магнитоэлектрическое взаимодействие. Магнитное поле, создаваемое одним слоем железа, влияет на другой слой железа.

Далее в разделе 3.1.3. представлены результаты исследования магнитооптических свойств системы $Fe/ПДФ/Fe$. С этой целью были измерены спектральные зависимости образцов с различной толщиной ПДФ слоя и слоя железа. Были изучены следующие образцы:

Первый. $Fe(15 \text{ нм}) / \text{полидифениленфталид}(10 \text{ нм}) / Fe(16 \text{ нм})$,

Второй. $Fe(15 \text{ нм}) / \text{полидифениленфталид}(20 \text{ нм}) / Fe(16 \text{ нм})$,

Третий. $Fe(30 \text{ нм}) / \text{полидифениленфталид}(13 \text{ нм}) / Fe(30 \text{ нм})$,

Четвёртый. $Fe(30 \text{ нм}) / \text{полидифениленфталид}(29 \text{ нм}) / Fe(30 \text{ нм})$.

Для того чтобы корректно оценить влияние полимерного слоя на магнитные и магнитооптические характеристики исследуемых образцов вначале были выполнены измерения магнитооптических спектров экваториального эффекта Керра для плёнки железа толщиной 30 нм (рис. 6).

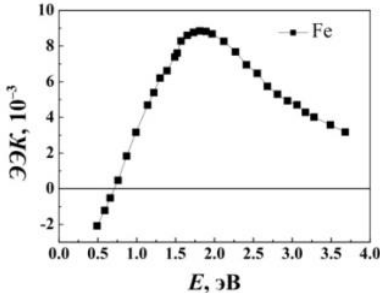


Рис. 6. Магнитооптический спектр ЭЭК, который был измерен для тонкой плёнки железа с толщиной, равной 30 нм [A7].

На рисунке 7 приведены спектральные зависимости ЭЭК для четырёх изучаемых трёхслойных образцов $Fe/ПДФ/Fe$.

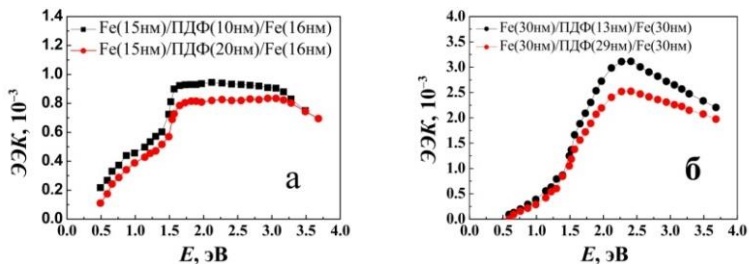


Рис. 7. Магнитооптический спектр ЭЭК для образца с толщинами слоёв железа – 15 и 16 нм (а). Толщина слоя ПДФ была равна 10 нм (ч) и 20 нм (к). Магнитооптический спектр ЭЭК для образца с толщинами слоёв железа – 30 и 30 нм (б). Толщина слоя ПДФ была равна 13 нм (ч) и 29 нм (к). [А7].

Были получены следующие результаты. Для первой серии образцов, толщина железа которых равна 15 нм, было получено следующее. Максимальное значение ЭЭК для первого образца равно 1.0×10^{-3} , для второго с более толстым слоем полимера оно меньше – 0.8×10^{-3} . Для второй серии образцов, толщина слоя железа которых была равна 30 нм, максимальное значение ЭЭК больше, чем для первой серии образцов. В частности, наибольшее значение ЭЭК для третьего образца равно 3.1×10^{-3} , а при увеличении толщины слоя полимера оно уменьшается и равно 2.6×10^{-3} для четвёртого образца. Сопоставляя данные для всех четырёх образцов, следует отметить, что значение магнитооптического эффекта возрастает с уменьшением толщины полимерного слоя. Вместе с тем, магнитооптические спектры ЭЭК для третьего и четвёртого образца подобны спектральным зависимостям ЭЭК плёнки железа. В случае первого и второго образца форма спектральной зависимости ЭЭК отличается в интервале от 1.5 до 3.2 эВ энергии световых квантов. В этом диапазоне ЭЭК имеет постоянное значение для указанных выше образцов.

В разделе 3.2 представлены результаты, которые были получены при изучении структурных, магнитных и магнитооптических свойств трёхслойных систем Co/Gd/Co.

Раздел 3.2.1. содержит описание результатов исследования структурных свойств образцов Co/Gd/Co. Для изучения кристаллической структуры образцов Co/Gd/Co применялся рентгеноструктурный анализ с применением $\text{CuK}\alpha$ -излучения. Измерения и их обработка производились изготовителями образцов в УРФУ. Проведённые исследования показали,

что тонкие слои кобальта исследуемых образцов характеризуются нанокристаллической структурой.

Измерения морфологии поверхности образцов позволили обнаружить следующие факты. Средняя шероховатость поверхности, R_a , для серии образцов, ширина и длина которых были равны 10 мм (для них исследовались магнитооптические спектры ЭЭК) не превышает 0.5 нм. Также было установлено, что она практически не изменяется при увеличении толщины гадолиниевого слоя. Полученные результаты показывают, что морфология поверхности изменяется незначительно при увеличении толщины слоя гадолиния, поэтому можно сформулировать вывод, что шероховатость поверхности не должна сильно влиять на магнитооптические свойства исследуемых тонкоплёночных магнитных систем.

В разделе 3.2.2. представлены результаты изучения влияния температуры на поведение в магнитном поле и магнитные характеристики образцов Co/Gd/Co.

Было найдено, что образцы характеризуются зависимостью от направления приложенного поля. Данный результат подтверждает возникновение одноосной магнитной анизотропии при изготовлении образцов в магнитном поле. Ось лёгкого намагничивания образцов была сформирована параллельно данному магнитному полю. Для объяснения возникновения анизотропии были приняты во внимание результаты, опубликованные в [14], из которых известно, что физический принцип анизотропии заключается в упорядочивании атомов парным образом.

Наиболее интересны петли гистерезиса, полученные при температурах, равных 300, 250, 200, 150 и 100 К для образцов Co/Gd/Co. На рис. 8 и 9 они представлены для двух образцов с толщинами гадолиния, равными 3.0 и 9.0 нм, в магнитном поле параллельно ОЛН.

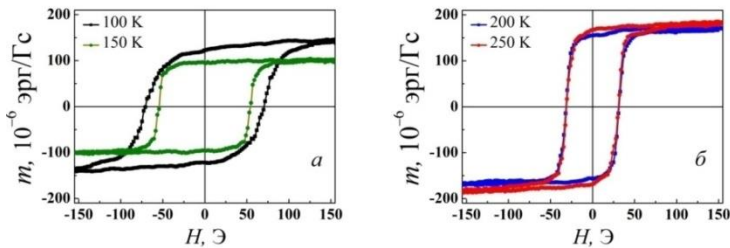


Рис. 8. Петли гистерезиса, измеренные для Co/Gd/Co структуры с толщиной гадолиния, равной 3.0 нм, при $T = 100$ и 150 К (а), $T = 200$ и 250 К (б), [А6].

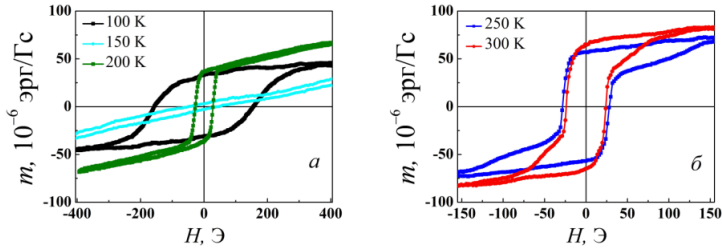


Рис. 9. Петли гистерезиса, измеренные для Co/Gd/Co структуры с толщиной гадолия, равной = 9.0 нм, при $T = 100, 150$ и 200 К (а), $T = 250$ и 300 К (б) [А6].

Петли гистерезиса, измерение которых было проведено на вибрационном магнитометре, позволили обнаружить новую информацию о магнитных свойствах образцов. Было установлено, что магнитный момент, коэрцитивная сила и поле насыщения сильно зависят от температуры. Изучение экспериментальных данных, тем не менее, показало, что при низких температурах насыщение образца иногда не достигается. Поэтому на рисунках 10 и 11, которые представлены ниже, показаны только зависимости от температуры коэрцитивной силы, а также зависимости от температуры магнитного момента, диапазон изменения которой составлял 100 – 300 К.

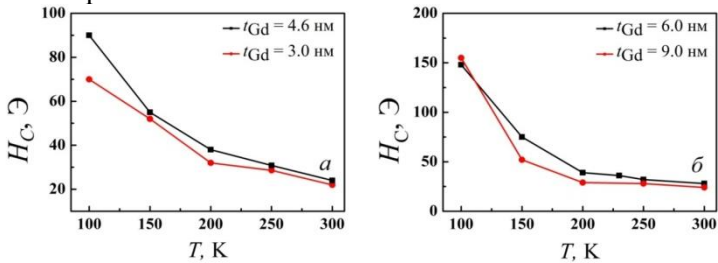


Рис. 10. Зависимости коэрцитивной силы H_C от температуры, полученные для Co/Gd/Co структур в магнитном поле, параллельном ОЛН. а) $t_{Gd} = 3.0 \text{ нм}$ и $t_{Gd} = 4.6 \text{ нм}$; б) $t_{Gd} = 6.0 \text{ нм}$ и $t_{Gd} = 9.0 \text{ нм}$ [А6].

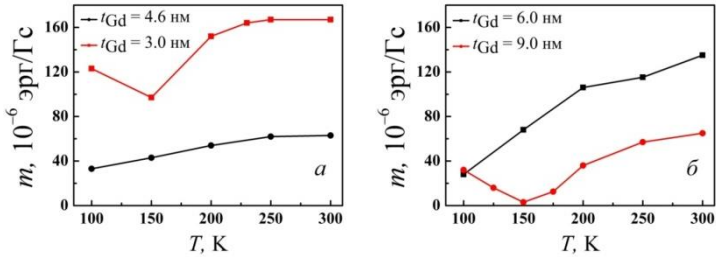


Рис. 11. Зависимости от температуры магнитного момента m , измеренные для Co/Gd/Co структур в магнитном поле, параллельном ОЛН. а) $t_{Gd} = 3.0$ нм и $t_{Gd} = 4.6$ нм; б) $t_{Gd} = 6.0$ нм и $t_{Gd} = 9.0$ нм [A6].

Исследование данных, которые представлены на рисунке 10, позволило обнаружить следующие результаты. Структуры Co/Gd/Co характеризуются существенным уменьшением коэрцитивной силы в том случае, если температура возрастает от 100 до 300 К. Найденные зависимости $H_C(T)$ были сопоставлены с данными, которые наблюдались для многослойных $[Co/Gd]_n$ систем [15], обнаружено сходство с ними. Поэтому для лучшего понимания экспериментальных результатов было исследовано соотношение между коэрцитивной силой и намагниченностью насыщения: $H_C = \alpha/M_S - NM_S$, где α/M_S – потери энергии при формировании зародыша и движении доменной стенки, пропорциональные полю анизотропии, M_S – намагниченность насыщения, а NM_S – поля размагничивания зародыша, N – размагничивающий фактор. Из проведённых расчётов был сделан вывод, что зависимость коэрцитивной силы образцов от температуры обусловлена преимущественно изменением полного магнитного момента и анизотропии образцов, а коэффициент α не зависит от температуры, кроме образцов с $t_{Gd} = 3.0$ и 9.0 нм при $T = 100$ К.

Следует отметить, что ферромагнитные свойства систем Co/Gd обусловлены антиферромагнитным обменным взаимодействием Co-Gd, которое действует на расстоянии в несколько нм от границы раздела слоёв. Учитывая тот факт, что толщина каждого из слоёв изучаемых образцов не больше 10 нм, это антиферромагнитное обменное взаимодействие оказывает влияние на значение коэрцитивной силы и магнитного момента образцов.

При анализе зависимости от температуры магнитного момента m , представленной на рисунке 11, можно отметить следующие особенности. Магнитный момент структур с толщиной гадолиниевого слоя, равной 4.6 и 6.0 нм, линейно возрастает при повышении температуры. Для образца

с $t_{\text{Gd}} = 3.0$ нм магнитный момент уменьшался примерно на 38 % при уменьшении температуры от комнатной температуры до 150 К. Образец с $t_{\text{Gd}} = 9.0$ нм при $T = 150$ К имел при данной температуре остаточный магнитный момент, близкий к нулю (3×10^{-6} эрг/Гс), а также безгистерезисную петлю перемагничивания (рис. 9). Это позволяет предположить, что при данной температуре наблюдается явление магнитной компенсации, то есть магнитный момент кобальта равен магнитному моменту гадолиния.

Известно, что когда температура уменьшается от 300 до 100 К, магнитный момент кобальта увеличивается в пределах 10 % [16]. Поэтому наблюдаемое уменьшение магнитного момента системы с ростом температуры указывает на то, что температурная зависимость магнитного момента определяется в целом вкладом магнитного момента слоя гадолиния в её суммарный магнитный момент.

В разделе 3.2.3 представлены результаты исследования магнитооптических свойств исследуемых Co/Gd/Co структур. Измерения магнитооптических спектров проводились при помощи магнитооптического спектрометра. Магнитооптические свойства систем Co/Gd/Co изучались для образцов с толщиной слоя гадолиния, равной 0.1, 1.0, 3.0, 4.6, 6.0 и 9.0 нм. Указанные толщины были выбраны из-за наблюдаемых особенностей поля насыщения. В частности, при $t_{\text{Gd}} = 3.0$, 6.0 и 9.0 нм поле насыщения имеет максимальные значения, а при $t_{\text{Gd}} = 1.0$ и 4.6 нм – минимальные.

Следует отметить, что образец с толщиной гадолиния, равной 0.1 нм, был изготовлен и включён в систему изучаемых образцов из-за предполагаемого наличия в нём островковой структуры. Для прослоек гадолиния данные о том, что прослойка с толщиной менее 1.0 нм имеет островковую структуру, были подтверждены результатами измерений магнитных характеристик, таких как температура Кюри [17, 18] и форма петли гистерезиса [18]. Таким образом, можно сделать вывод, что слой гадолиния толщиной 0.1 нм имеет островковую структуру.

На рисунке 12 представлен сравнительный вид магнитооптических спектров ЭЭК для всех изучаемых образцов. С помощью такого представления данных можно сопоставить спектральные зависимости ЭЭК образцов с различной толщиной слоя гадолиния.

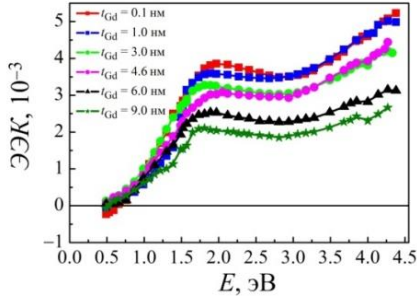


Рис. 12. Сравнение спектральных зависимостей ЭЭК образцов Co/Gd/Co с различной толщиной слоя Gd [A4].

Исследование представленных на рисунке 12 данных, позволило выявить следующие закономерности. Значения ЭЭК для образцов с толщиной Gd слоя, равной 0.1 нм и 1.0 нм, приблизительно равны. Принимая во внимание приведённые данные об островковой структуре образцов, можно сформулировать вывод, что гадолиниевый слой толщиной 1.0 нм также обладает островковой структурой.

Максимальные и минимальные значения ЭЭК для всех образцов наблюдаются соответственно при энергии квантов падающего света, равной 1.9 и 2.8 эВ[19, 20].

При увеличении толщины слоя гадолиния было обнаружено уменьшение экваториального эффекта Керра. Эту закономерность можно интерпретировать, опираясь на литературные данные, которые были опубликованы в работе [21]. Например, в данной работе было установлено, что если свет проникает в образец на глубину, которая меньше глубины формирования магнитооптического сигнала ($t_{\text{инф}} = \lambda/8n$, где n – показатель преломления света в среде), то при возрастании толщины магнитного слоя значение экваториального эффекта Керра увеличивается. Величина глубины формирования магнитооптического сигнала определяется как толщина слоя образца вблизи поверхности, которая влияет на его величину. Установлено, что если энергия квантов падающего света изменяется от 0.5 до 4.2 эВ, то в случае кобальта $t_{\text{инф}}$ приблизительно равна 20 – 24 нм. В изучаемых в данной работе образцах при толщине слоя Gd порядка 1.0 – 2.0 нм полная толщина образцов с учётом буферных слоёв Ta порядка 21 – 22 нм, таким образом, в этом случае регистрируется практически максимальное значение магнитооптического сигнала. Вместе с тем с ростом толщины слоя Gd вклад нижнего слоя в магнитооптический сигнал уменьшается. Это сопровождается уменьшением величины ЭЭК. Полученные данные

согласуются с результатами исследований магнитных плёнок (в частности, плёнок кобальта различной толщины), опубликованных в работах [22, 19]. Сравнение магнитооптических спектров для образцов Co/Gd/Co и плёнок кобальта [22] свидетельствуют о том, что слой гадолиния практически не влияет на вид магнитооптических спектров Co/Gd/Co образцов, наблюдаемых при комнатной температуре.

В разделе 3.3. приведены результаты исследования температурной зависимости петель гистерезиса Co/Cu/Co систем, а также их поля насыщения и коэрцитивной силы. Петли гистерезиса, полученные для исследуемых образцов Co/Cu/Co с $t_{Cu} = 1.4$ и 3.2 нм при температурах, равных 350, 300, 250, 200, 150 и 100 К, показаны на рис. 13 и рис. 14. Магнитное поле было направлено вдоль оси лёгкого намагничивания.

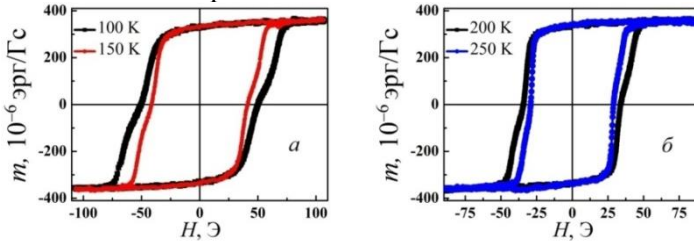


Рис. 13. Петли гистерезиса, полученные для структуры Co/Cu/Co с $t_{Cu} = 3.2$ нм при $T = 100, 150$ К (а), 200, 250 К (б) [Т8].

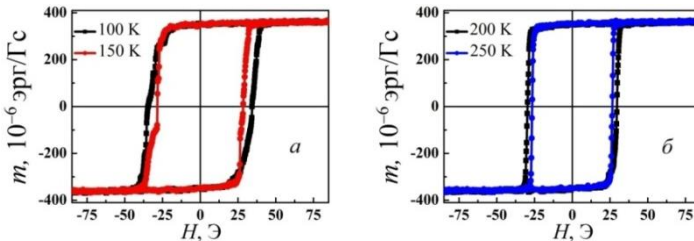


Рис. 14. Петли гистерезиса, полученные для структуры Co/Cu/Co с $t_{Cu} = 1.4$ нм при $T = 100, 150$ К (а), 200, 250 К (б) [Т8].

Анализ петель гистерезиса образцов показал, что уменьшение температуры ниже 350 К приводит к изменению петель гистерезиса. Они становятся более широкими, увеличиваются поле насыщения и коэрцитивная сила образцов. Для образца с $t_{Cu} = 1.4$ нм петля гистерезиса при температуре вблизи комнатной является прямоугольной. Уменьшение температуры ниже 200 Кельвин приводит к изменению её формы, она становится двухступенчатой. Тогда как для образца с $t_{Cu} = 3.2$ нм двухступенчатая петля гистерезиса, наблюдаемая при комнатной

температуре, с её снижением становится более выраженной, в частности, увеличивается размер ступеньки.

Зависимость поля насыщения от температуры и зависимость коэрцитивной силы от температуры, измеренные для каждого образца, показаны на рис. 15.

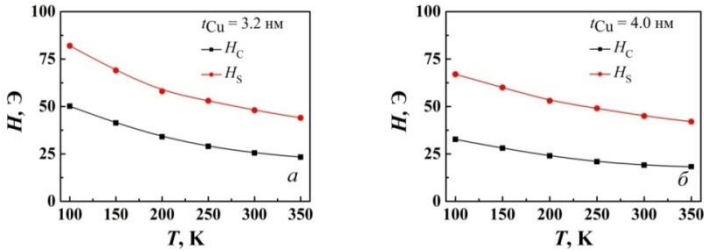


Рис. 15. Зависимости от температуры поля насыщения H_s (чёрная линия) и коэрцитивной силы H_c (красная линия), измеренные для Co/Cu/Co структур с толщиной слоя меди $t_{Cu} = 3.2$ нм (а) и $t_{Cu} = 4.0$ нм (б), в магнитном поле, параллельном ОЛН [Т8].

Наблюдаемые температурные зависимости поля насыщения и коэрцитивной силы свидетельствуют о том, что при уменьшении температуры от 350 до 100 К происходит их значительное увеличение. Было обнаружено также, что намагниченность насыщения образцов не зависит от температуры.

Известно, что в случае многослойных систем с косвенным обменным взаимодействием, упорядочивающим антипараллельно магнитные моменты ферромагнитных слоёв, разделённых немагнитной прослойкой, поле насыщения пропорционально константе обменного взаимодействия (J) и обратно пропорционально намагниченности насыщения (M_S) [23]. На качественном уровне этот факт можно объяснить следующим образом. Чем больше значение поля насыщения H_s , тем сильнее обменное взаимодействие и тем большее поле требуется для того, чтобы расположить параллельно магнитные моменты слоёв. Кроме того, в работе [24] для трёхслойных систем было рассчитано, что усиление обменного взаимодействия сопровождается увеличением размера ступеньки петли гистерезиса. Сопоставляя полученные результаты с литературными данными, можно сделать выводы, что в случае образца с $t_{Cu} = 3.2$ нм при уменьшении температуры происходит усиление косвенного обменного взаимодействия, приводящее к изменению магнитополевого поведения образца.

Наблюдаемое увеличение коэрцитивной силы для образца с $t_{Cu} = 1.4$

нм, при уменьшении температуры от 350 до 100 К составляло 12 Э, а для образца с $t_{\text{Cu}} = 4.0$ нм – 14.5 Э. При этом для образцов $t_{\text{Cu}} = 2.2$ нм и 3.2 нм увеличение коэрцитивной силы было больше и равно 19 Э и 27 Э, соответственно. В работе [25] было показано, что коэрцитивная сила трёхслойных систем определяется структурными дефектами, а также величиной косвенного обменного взаимодействия. Если принять во внимание тот факт, что образцы были изготовлены при одинаковых условиях, то можно предположить, что на возрастание коэрцитивной силы образцов с $t_{\text{Cu}} = 2.2$ нм и 3.2 нм значительное влияние оказывает усиление косвенного обменного взаимодействия при уменьшении температуры. Тогда как для образцов с $t_{\text{Cu}} = 4.0$ нм и 1.4 нм увеличение коэрцитивной силы обусловлено в большей степени изменениями структурных свойств.

В заключении приведены краткие сведения об исследованиях, которые были проведены в данной работе, а также полезные практические перспективы при разработке новых тонкоплёночных магнитных структур для спинтроники, нано- и микроэлектроники.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведены экспериментальные исследования магнитных характеристик трёхслойных тонкоплёночных систем. Обнаружено, что петли гистерезиса тонкоплёночных систем Fe/ПДФ/Fe, измеренные вдоль длины образцов, имеют двухступенчатую форму с размером ступенек, зависящим от толщины ПДФ слоя. Возникновение двухступенчатой петли гистерезиса было объяснено наличием магнитостатического взаимодействия между слоями железа. Обнаружено, что значения поля насыщения и коэрцитивной силы при одинаковой толщине магнитных слоёв уменьшаются с увеличением толщины промежуточного ПДФ слоя, что обусловлено уменьшением магнитостатического взаимодействия между слоями железа.

2. Обнаружено, что величина экваториального эффекта Керра для образцов Fe/ПДФ/Fe немонотонно зависит от толщины слоя ПДФ. Максимальное значение ЭЭК наблюдается для образца Fe(30 нм)/ПДФ(13 нм)/Fe(30 нм) и равно 3.1×10^{-3} . Для образцов с толщиной слоя железа, равной 30 нм, спектральные зависимости ЭЭК подобны спектральным зависимостям плёнки железа, а для образцов с толщиной слоя железа, равной 15 нм, отличаются в диапазоне энергий 1.5 – 3.2 эВ, где ЭЭК принимает постоянное значение, что подтверждает влияние ПДФ прослойки.

3. Установлено, что магнитополевое поведение и магнитные характеристики образцов Co/Gd/Co существенно зависят от температуры и толщины гадолиния. Обнаружено, что толщина гадолиния влияет на вид зависимости магнитного момента образцов от температуры. Этот факт был объяснён наличием обменного взаимодействия между слоями кобальта и гадолиния и его немонойной зависимостью от толщины гадолиниевого слоя. Обнаружено, что значения коэрцитивной силы для всех изучаемых образцов уменьшаются с ростом температуры от 100 до 300 К, что обусловлено изменением анизотропии системы и её магнитного момента. Обнаружено, что при $T = 150$ К образец с $t_{\text{Gd}} = 9.0$ нм имеет точку магнитной компенсации, а образец с $t_{\text{Gd}} = 3.0$ нм характеризуется уменьшением магнитного момента примерно на 38 % по сравнению с магнитным моментом при $T = 300$ К. Установлено, что причиной возникновения минимума на температурной зависимости магнитного момента образцов является переориентация магнитных моментов слоёв Co и Gd относительно магнитного поля.

4. Установлено, что интенсивность магнитооптического эффекта Керра образцов Co/Gd/Co уменьшается с ростом толщины гадолиниевого слоя, при сохранении вида спектральной зависимости ЭЭК. Наблюдаемое уменьшение величины ЭЭК было объяснено уменьшением вклада нижнего слоя в магнитооптический сигнал с ростом толщины слоя Gd. Максимальные и минимальные значения ЭЭК для всех образцов наблюдаются, соответственно, при энергиях квантов падающего света, равных 1.9 и 2.8 эВ.

5. Обнаружено, что образец Co/Cu/Co с $t_{\text{Cu}} = 3.2$ нм характеризуется двухступенчатой петлёй гистерезиса при комнатной температуре. Найдено, что размер ступеньки увеличивается при уменьшении температуры. Обнаружено, что форма петли гистерезиса для образца с $t_{\text{Cu}} = 1.4$ нм изменяется при уменьшении температуры от прямоугольной к двухступенчатой. Установлено, что при уменьшении температуры от 350 до 100 К происходит значительное увеличение поля насыщения и коэрцитивной силы образцов. Показано, что причиной наблюдаемых зависимостей магнитных свойств образцов от температуры является влияние температуры на величину косвенного обменного взаимодействия между слоями кобальта.

Список публикаций автора по теме диссертации:

Статьи

- A1. Шалыгина Е.Е., Харламова А.М., Макаров А.В., Каминская Т.П., Шалыгин А.Н. // Особенности структурных свойств и магнитополевого

поведения тонкопленочных трехслойных Fe/полидифениленфталид/Fe-систем. // Физика твердого тела, 2018, том 60, № 9, с. 1693 – 1698 (DOI: 10.21883/FTT.2018.09.46386.064);

(Англ. Вар.) Shalygina E.E., Kharlamova A.M., **Makarov A.V.**, Kaminskaya T.P., Shalygin A.N. // Thin-Film Three-Layer Fe/Poly (diphenylene phthalide)/Fe Systems: Structural Properties and Behavior in Magnetic Fields. // Physics of the solid state, 2018, том 60, № 9, с. 1737 – 1743 (SJR Q3 IF: 0.848, DOI: 10.1134/S1063783418090287).

A2. Shalygina E.E., Kharlamova A.M., **Makarov A.V.**, Vorobieva N.V., Lachinov A.N. // Peculiarities of the magnetic properties of thin film three-layer Fe/Poly (diphenylene phthalide)/Fe systems. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2018, Vol. 459, Pp. 328 – 330 (SJR Q2 IF: 3.097, DOI: 10.1016/j.jmmm.2017.09.069).

A3. Shalygina E.E., Kharlamova A.M., Efremova S.L., **Makarov A.V.**, Kurlyandskaya G.V., Svalov A.V. // The influence of the interlayer on the magnetic and structural properties of three-layer systems. // Journal of Physics: Conference Series, 2019, Vol. 1389, VII Euro-Asian Symposium "Trends in Magnetism", Pp. 8–13 (IF: 0.482, DOI: 10.1088/1742-6596/1389/1/012021).

A4. **Макаров А.В.**, Шалыгина Е.Е., Ганьшина Е.А. // Магнитооптические свойства трехслойных тонкопленочных систем на основе кобальта с промежуточным слоем гадолиния. // Ученые записки физического факультета, 2020, том 4, с. 2040703-1–2040703-6 (IF: нет).

A5. Харламова А.М., **Макаров А.В.**, Шалыгина Е.Е., Свалов А.В. // Зависимость магнитных свойств и магнитополевого поведения тонкопленочных трехслойных систем Co/Gd/Co от температуры. // Ученые записки физического факультета, 2020, том 4, с. 2040704-1–2040704-6 (IF: нет).

A6. Харламова А.М., **Макаров А.В.**, Шалыгина Е.Е., Свалов А.В. // Температурная зависимость магнитных свойств и магнитополевого поведения тонкопленочных трехслойных Co/Gd/Co систем. // Физика твердого тела, 2021, том 63, № 10, с. 1540 – 1548 (DOI: 10.21883/FTT.2021.10.51402.136).

(Англ. Вар.) Kharlamova A. M., **Makarov A. V.**, Shalygina E. E., Svalov A. V. // Temperature Dependence of Magnetic Properties and Magnetic Field Behavior of Co/Gd/Co Thin-Film Three-Layer Systems. // Physics of the solid state, 2021, том 63, № 10, с. 1735 – 1742 (SJR Q3 IF: 0.848, DOI: : 10.1134/S1063783421100140).

A7. **Макаров А.В.**, Ганьшина Е. А., Шалыгина Е. Е. // Магнитооптические свойства Fe/полидифениленфталид/Fe тонкопленочных образцов. // Учёные записки физического факультета Московского Университета, 2022, том 4, с. 2241702-1–2241702-5 (IF: нет).

Тезисы докладов

- T1. **Макаров А. В.**, Харламова А. М. Исследования магнитных свойств тонкоплёночных трёхслойных систем Fe/полидифениленфталид/Fe // Сборник тезисов докладов XXIV Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных “Ломоносов-2017”.–2017.–С. 599–600.
- T2. Shalygina E. E., Kharlamova A. M., **Makarov A. V.**, Vorobieva N. V., Lachinov A. N. Peculiarities of the magnetic properties of thin-film three-layer systems Fe/poly(diphenylenephthalide)/Fe // Book of Abstracts of Moscow International Symposium on Magnetism (MISM-2017).–2017.–P. 265.
- T3. **Макаров А. В.**, Харламова А. М. Исследования структурных и магнитных свойств тонкоплёночных трёхслойных систем Fe/полидифениленфталид/Fe // Сборник тезисов докладов XXV Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных “Ломоносов-2018”.–2018.–С. 1–2.
- T4. Kharlamova A. M., Shalygina E. E., Efremova S. L., **Makarov A. V.**, Svalov A. V. The influence of the interlayer on the magnetic and structural properties of three-layer systems // Abstracts of VII Euro-Asian Symposium “Trends in Magnetism” (EASTMAG-2019).–2019.–P. 283–284.
- T5. **Макаров А. В.** Магнитооптические свойства трёхслойных тонкоплёночных систем на основе кобальта с промежуточным слоем гадолиния // Сборник тезисов докладов XXVII Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных “Ломоносов-2020”.–2020.–С. 1–3.
- T6. Харламова А. М., **Макаров А. В.** Зависимость магнитных свойств и магнитополевого поведения тонкоплёночных трёхслойных систем Co/Gd/Co от температуры // Сборник тезисов докладов XXVII Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных “Ломоносов-2020”.–2020.–С. 1–2.
- T7. **Макаров А. В.**, Харламова А. М., Свалов А. В., Шалыгина Е. Е. Исследование зависимости магнитных свойств и магнитополевого поведения тонкоплёночных трёхслойных систем Co/Gd/Co от температуры // Сборник тезисов докладов XXIV Международной конференции НМММ.–2021.–С. 9-38–9-41.
- T8. **Makarov A.V.**, Shalygina E.E., Svalov A.V. Temperature dependence of magnetic properties and magnetic-field behavior of Co/Cu/Co thin-film three-layer systems // Abstracts of VIII Euro-Asian Symposium “Trends in Magnetism” (EASTMAG-2022).–2022.–P.139–141.

Список цитируемой литературы

1. Binasch G, Grünberg P, Saurenbach F, Zinn W. Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange. // *Phys. Rev. B* – 1989. – Vol. 39, N. 7. – Pp. 4828–4830.
2. Maeda Y, Suzuki Y, Sakashita Y, Iwata S, Kato T, Tsunashima S, Toyoda H, Sugai H. Effect of sputtering deposition process on magnetic properties of magnetic multilayers. // *Jpn. J. Appl. Phys.* – 2008. – Vol. 47, N. 10R. – Pp. 7879–7885.
3. Svalov AV, Kudyukov EV, Balymov KG, Stepanova EA, Vas'kovskiy VO, Larrañaga A, Kurl'yanskaya GV. Thickness dependence of magnetic properties of Tb–Co/Ti and Tb–Co/Si multilayers. // *Phys. Met. Metall.* – 2019. – Vol. 120, N. 13. – Pp. 1260–1265.
4. Shaw JM, Nembach HT, Silva TJ, Russek SE, Geiss R, Jones C, Clark N, Leo T, Smith DJ. Effect of microstructure on magnetic properties and anisotropy distributions in Co/Pd thin films and nanostructures. // *Phys. Rev. B.* – 2009. – Vol. 80, N. 18. – P. 184419 (8 pages).
5. Shalygina EE, Rozhnovskaya AA, Shalygin AN. Influence of quantum confinement on magnetic properties of Fe/Mo/Fe and Fe/Ta/Fe thin-film systems. // *Techn. Phys. Lett.* – 2011. – Vol. 37, N. 10. – Pp. 980–983.
6. Shalygina EE, Gan'shina EA, Kharlamova AM, Mukhin AN, Kurl'yanskaya GV, Svalov AV. The influence of Si on magnetic and magneto-optical properties of Co/Si/Co thin-film systems. // *Solid State Phenom.* – 2015. – Vol. 233. – Pp. 653–656.
7. Marrows CH, Loloee R, Hickey BJ. Scaling of the exchange interactions in Co/Cu multilayers with temperature. // *JMMM.* – 1998. – Vol. 184, N. 2. – Pp. 137–144.
8. McKinnon T, Heinrich B, Girt ES. Spacer layer thickness and temperature dependence of interlayer exchange coupling in Co/Ru/Co trilayer structures. // *Phys. Rev. B.* – 2021. – Vol. 104, N. 2. – P. 024422 (11 pages).
9. Schwieger S, Kienert J, Nolting W. Temperature dependence of interlayer exchange coupling: spin waves versus spacer effects. // *Phys. Rev. B.* – 2005. – Vol. 71, N. 17. – P. 174441 (9 pages).
10. Корнилов ВМ, Лачинов АН, Карамов ДД, Набиуллин ИР, Кульвелис ЮВ. Надмолекулярная структура тонких пленок электроактивного полимера // *ФТТ* – 2016. – Vol. 58, N. 5. – Pp. 1030–1035.
11. Карамов ДД, Корнилов ВМ, Лачинов АН et al. Атомно-силовая микроскопия субмикронных пленок электроактивного полимера // *ЖТФ* – 2016. – Vol. 86, N. 7. – Pp. 124–129.
12. Жеребов АЮ, Лачинов АН, Тамеев АР, Ванников АВ. Исследование бистабильного электронного переключения в полиариленфталитах // *ПЖЭТФ.* – 2008. – Vol. 34, N. 11. – Pp. 46–53.

13. Aharoni A. Exchange anisotropy in films, and the problem of inverted hysteresis loops // *Journ. of Appl. Phys.* – 1994. – Vol. 76, N. 10. – Pp. 6977–6979.
14. Chikazumi S, Graham CD. *Physics of ferromagnetism* – Oxford University Press, 1997.
15. Demirtas S, Koymen AR. Coercivity and exchange bias near the compensation temperature for inhomogeneous Fe/Gd ferrimagnets // *J. Appl. Phys.* – 2004. – Vol. 95, N. 9. – Pp. 4949–4952.
16. Bloemen PJ, de Jonge WJ, den Broeder FJ. The temperature dependence of the magnetization of magnetic multilayers. // *J. Magn. Magn. Mater.* – 1991. – Vol. 93. – Pp. 105–108.
17. Svalov AV, Vas'kovskiy VO, Barandiarán JM, Balymov KG, Sorokin AN, Orue I, Larrañaga A, Schegoleva NN, Kurlyandskaya GV. Structure and magnetic properties of Gd/Ti nanoscale multilayers // *Sol. St. Phen.* – 2011. – Vol. 168. – Pp. 281–284.
18. Farle M, Baberschke K, Stetter U, Aspelmeier A, Gerhardt F. Thickness-dependent Curie temperature of Gd (0001)/W (110) and its dependence on the growth conditions // *Phys. Rev. B.* – 1993. – Vol. 47, N. 17. – Pp. 11571–11574.
19. Шальгина ЕЕ, Козловский В.Л., Сяньбо Д. Магнитооптическое исследование ультратонких пленок железа и кобальта // *Вестн. Моск. Унта.* – 1995. – Vol. 36, N. 5. – Pp. 51–57.
20. Guo GY, Ebert H. Theoretical investigation of the orientation dependence of the magneto-optical Kerr effect in Co // *Phys. Rev. B.* – 1994. – Vol. 50, N. 14. – Pp. 10377–10380.
21. Shalyguina, EE, Shin KH. Influence of nonmagnetic layer (Ti, Zr, Pt) on magnetic and magneto-optical properties of Fe/NML bilayers and Fe/NML/Fe trilayers // *JMMM.* – 2000. – Vol. 220, N. 2–3. – Pp. 167–174.
22. Shalygina EE, Kharlamova AM, Kurlyandskaya GV, Svalov AV. Exchange interaction in Co/Bi/Co thin-film systems with Bi interlayer. // *JMMM.* – 2017. – Vol. 440. – Pp. 136–139.
23. van Dau FN, Fert A, Etienne P, Baibich MN, Broto JM, Chazelas J, Creuzet G, Friederich A, Hadjoudj S, Hurdequint H, Redoules JP. Magnetic Properties of (001) Fe/(001) Cr bcc Multilayers. // *J. phys., Colloq.* – 1988. – Vol. 49, N. C8. – Pp. 1633–1655.
24. Звездин КА. Особенности перемагничивания трехслойных наноструктур // *ФТТ.* – 2000. – Vol. 42, N. 1. – Pp. 116–120.
25. Чеботкевич ЛА, Воробьев ЮД., Самардак АС, Огнев АВ. Влияние кристаллической структуры и межслоевой обменной связи на коэрцитивную силу Co/Cu/Co-пленок // *ФТТ.* – 2003. – Vol. 45, N. 5. – Pp. 863–866.