

Белорусский государственный университет

УДК 538.9+538.955+538.91+537.624.8.

МАКСИМЕНКО
Алексей Алексеевич

СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ И МАГНИТНОЕ СОСТОЯНИЕ НАНО-
СТРУКТУРИРОВАННЫХ ТОНКИХ ПЛЕНОК
Co/Pd, ОСАЖДЕННЫХ НА НАНОПОРИСТЫЕ АНОДИРОВАННЫЕ
ОКСИДЫ АЛЮМИНИЯ И ТИТАНА

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Минск, 2018

Работа выполнена в **Белорусском государственном университете и НИУ «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета.**

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ -

Федотова Юлия Александровна,
доктор физико-математических наук,
заместитель директора по международному
научно-техническому сотрудничеству
НИУ «Институт ядерных проблем» Белорусско-
го государственного университета.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Грабчиков Сергей Степанович,
доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник лаборатории физи-
ки магнитных пленок
ГНПО «Научно-практический центр
НАН Беларуси по материаловедению»;

Ксенович Виталий Казимирович,
кандидат физико-математических наук, доцент,
заведующий НИЛ физики электронных матери-
алов кафедры физики полупроводников и нано-
электроники Белорусского государственного
университета.

ОППОНИРУЮЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ –

**УО «Белорусский государственный универ-
ситет информатики и радиоэлектроники».**

Защита состоится **08 февраля 2019 года в 14.00** на заседании совета по защите диссертаций Д 02.01.16 при Белорусском государственном университете по адресу: *Минск, ул.Ленинградская 8 (корпус юридического факультета), ауд. 407.* Телефон ученого секретаря 209-57-09.

Почтовый адрес: пр-т Независимости 4, Минск, 220030.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке Белорусского государственного университета.

Автореферат разослан «___» декабря 2018 года.

И. о. ученого секретаря совета
по защите диссертаций
доктор физ.-мат. наук профессор

П.И. Гайдук

ВВЕДЕНИЕ

Изучение физических свойств тонких сплошных и нанопористых магнитных пленок (с диаметром пор в диапазоне 10-200 нм), является важной задачей как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения. Актуальность фундаментальных исследований данного класса материалов объясняется их принципиально новыми, по сравнению с массивными аналогами, свойствами, физическая природа которых связана с поверхностными, размерными и квантовыми эффектами. Особое место среди физических характеристик, присущих таким наноматериалам, занимают магнитные свойства, которые можно контролировать в широком диапазоне значений путем преднамеренного внедрения дефектов, например, массивов нанопор в структуру сплошных пленок. Поры в данном случае играют роль центров пиннинга магнитных доменных стенок в пленках, чьи магнитные характеристики (механизм перемещения материала, его магнитная анизотропия и коэрцитивная сила H_C) претерпевают значительные изменения в зависимости от размера, формы, плотности и симметрии распределения пор. Уникальные управляемые магнитные свойства нанопористых магнитных пленок обуславливают их практическое применение для создания нового поколения магниточувствительных транзисторов, сенсоров, магнитных кристаллов и в качестве материала для магнитной записи.

Особое место среди нанопористых пленок занимают многослойные пленки, характеризующиеся магнитной анизотропией вдоль нормали к их поверхности (перпендикулярной магнитной анизотропией). Получение подобных пленок путем их напыления на различные пористые темплаты, например, анодированного оксида алюминия или титана, позволяет значительно снизить сложность производства подобных материалов, а также его стоимость, по сравнению с традиционными литографическими методами. Магнитные свойства магнитно-анизотропных пленок, осажденных на нанопористые темплаты, определяются формируемым структурно-фазовым составом и морфологией поверхности при осаждении на темплаты с различным рельефом. В настоящее время существует лишь несколько работ, посвященных исследованию влияния указанных факторов на качество перпендикулярной магнитной анизотропии многослойных нанопористых пленок.

В этой связи, выявление и объяснение закономерностей изменения магнитных характеристик нанопористых пленок с перпендикулярной магнитной анизотропией во взаимосвязи с их структурно-фазовым состоянием и морфологией, зависящей от типа использованных наноструктурированных темплатов, их состава и режимов получения является актуальным и представляет большой фундаментальный и прикладной интерес.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами

Тема диссертации соответствует следующим пунктам «Перечня приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2016-2020 годы», утвержденного Советом Министров РБ 12 марта 2015 г.: 8. Многофункциональные материалы и технологии.

Работа по данной диссертации выполнялась в рамках заданий следующих государственных программ и других проектов: 1) ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма «Наноматериалы и физическое материаловедение, новые материалы и технологии» – задание 2.44.1 «Магнитные нанокompозиты на основе пористых темплатов для новых элементов обработки информации: локальный атомный порядок, магнитные и магнитотранспортные свойства», 2016-2020 гг., ГР № 20162661; 2) ГПНИ «Функциональные и машиностроительные материалы, наноматериалы», подпрограмма «Наноматериалы и нанотехнологии» – задание 2.4.08 «Разработка физико-технологических основ формирования пористых темплатов для синтеза на их основе композиционных магниточувствительных наноструктур ферромагнетик-полупроводник», 2014-2015 гг., ГР № 20141063; 3) ГПНИ «Функциональные и машиностроительные материалы, наноматериалы», подпрограмма «Наноматериалы и нанотехнологии» – задание 2.4.10 «Разработка и изготовление композиционных магнитных мультислойных наноструктур на основе пористых сред для создания новых элементов обработки информации», 2014-2015 гг., ГР № 20141064; 4) договор с БРФФИ № Ф11СРБ-006 от 01.07.2011 г. «Периодические (матричные) магнитоупорядоченные наноструктуры Pt-Ni(Co), Pd-Ni(Co) для нанoeлектронных и спинтронных устройств нового типа», 2011-2013 гг., ГР № 20115002; 5) договор с БРФФИ № Ф14СРБ-009 от 14.05.2014 г. «Магнитно-анизотропные термически стабильные наноструктуры PtM, PdM (M=Ni, Co) для разработки планарных сред записи информации», 2014-2016 гг., ГР № 20141065, 6) грант Министерства образования Республики Беларусь для молодых ученых «Структурно-фазовый состав и магнитотранспортные свойства периодических наноструктур Pt,Pd/(Co,Ni)», 2013 г., ГР № 20131049.

Цель и задачи исследования

Целью работы является выявление взаимосвязи между магнитными характеристиками, морфологией и структурно-фазовым составом тонких магнитных нанопористых многослойных пленок Co/Pd с перпендикулярной магнитной анизотропией, сформированных на темплатах анодированных оксидов алюминия и титана; выявление механизмов перемагничивания пористых пленок.

Достижение цели исследования осуществлялось решением следующих задач: 1) систематическое изучение структурно-фазового состояния и магнитных свойств сплошных (референтных) многослойных пленок Co/Pd, синтезируемых методами термического напыления и магнетронного распыления, в зависимости от последовательности и толщины слоев кобальта и палладия; 2) установление оптимального состава сплошных пленок, проявляющих максимальное значение эффективной константы магнитной анизотропии; 3) осаждение пленок с оптимальным составом на пористые темплаты анодированных оксидов титана и алюминия с различной морфологией и выявление закономерностей изменения кристаллической структуры и магнитных свойств в зависимости от размера пор, расстояния между их центрами, шероховатостью областей между порами.

Объект исследования – многослойные пленки $[\text{Co}_{t\text{Co}}/\text{Pd}_{t\text{Pd}}] \times 15$ до и после их отжига в вакууме при температуре 300°C, а также многослойные тонкие пленки с палладиевым буферным слоем $\text{Pd}_{10\text{нм}}/[\text{Co}_{t\text{Co}}/\text{Pd}_{t\text{Pd}}] \times 15/\text{Pd}_{2\text{нм}}$ ($t_{\text{Co}}=0,2$ нм; 0,3 нм; 0,4 нм и $t_{\text{Pd}}=0,6$ нм; 1,0 нм), осажденные методом термического напыления; многослойная тонкая пленка $\text{Ta}_{5\text{нм}}/\text{Pd}_{15\text{нм}}/[\text{Co}_{0,5\text{нм}}/\text{Pd}_{1,0\text{нм}}] \times 5/\text{Pd}_{3\text{нм}}/\text{Ta}_{5\text{нм}}$, осажденная методом магнетронного распыления. Пленки осаждались на плоские кремниевые подложки Si(100) покрытые аморфным слоем оксида (SiO_2) толщиной 100 нм, а также на темплаты наноструктурированных анодированных оксидов титана и алюминия с варьируемыми диаметрами пор и расстоянием между их центрами в диапазоне 10-180 нм и 20-420 нм, соответственно.

Предметом исследований являются морфология, структурно-фазовый состав и магнитные свойства сплошных и нанопористых пленок Co/Pd в зависимости от химического состава, толщины и последовательности слоев, а также рельефа поверхности используемых темплатов.

Научная новизна

Систематический анализ существующих экспериментальных результатов показывает, что ключевую роль в формировании комплекса магнитных параметров нанопористых пленок играет структурно-фазовое состояние и морфология их поверхности, которые определяются способом синтеза. Одним из наиболее простых и экономичных методов синтеза пористых пленок, по сравнению с методами нанолитографии, является их нанесение на различные пористые темплаты (например, из анодированного оксида алюминия или титана). Развитый рельеф темплатов, как правило, приводит к искажению перпендикулярной магнитной анизотропии, то есть, отклонению значительной части магнитных моментов от нормали к плоскости пленок. Это отрицательно сказывается на их функциональных характеристиках и возможности практического использова-

ния. В этой связи, актуальной является задача экспериментального выявления и модельного объяснения закономерностей изменения магнитных характеристик нанопористых пленок Co/Pd во взаимосвязи с их морфологией и кристаллической структурой для разработки новых физико-технологических подходов к получению пленок с выраженной магнитной анизотропией вдоль нормали к их поверхности.

Положения, выносимые на защиту

1. На основании закономерностей изменения структурно-фазового состояния и магнитных свойств пленок $[\text{Co}_{t\text{Co}}/\text{Pd}_{t\text{Pd}}] \times 15$ ($t_{\text{Co}}=0,2; 0,3; 0,4$ нм и $t_{\text{Pd}}=0,6; 1,0$ нм) в зависимости от толщины и чередования слоев Co и Pd, основанных на экспериментальном и модельном анализе результатов рефлектометрии, рентгеновской дифракции и магнитометрии, впервые доказано, что формирование тонких пленок с наибольшей магнитной анизотропией вдоль нормали к их плоскости, у которых эффективные константы магнитной анизотропии и квадратичности петли гистерезиса достигают $4,2 \cdot 10^5$ Дж/м³ и 0,9, соответственно, обусловлено образованием твердого раствора CoPd в присутствии выраженных границ раздела между слоями Co/Pd с соотношением атомов Co:Pd в твердом растворе, равным 2:5 и характерным размером кристаллитов в форме эллипса, ориентированных перпендикулярно плоскости пленок, в диапазоне 8-13 нм, что позволяет проектировать и создавать магнитоанизотропные материалы с заданными параметрами.

2. Впервые установлено сохранение непланарной магнитной анизотропии в нанопористых пленках $[\text{Co}_{t\text{Co}}/\text{Pd}_{t\text{Pd}}] \times N$, осажденных на анодированный темплат Al_2O_3 , с преимущественной ориентацией магнитных моментов под углом α в диапазоне 8-35° к нормали пленки, с эффективной константой магнитной анизотропии $(1,1-2,1) \cdot 10^5$ Дж/м³, коэрцитивной силой H_c в диапазоне 95-270 кА/м и квадратичностью петли гистерезиса в диапазоне 0,50-0,99, в которых перемагничивание происходит по механизму вращения магнитных моментов, что подтверждается систематическим экспериментальным и модельным анализом полевых зависимостей намагниченности под разными углами к плоскости пленки и что может быть использовано при разработке устройств записи информации высокой плотности.

3. Формирование нанопористых пленок $\text{Pd}_{10\text{нм}}[\text{Co}_{0,3\text{нм}}/\text{Pd}_{0,6\text{нм}}] \times 15/\text{Pd}_{2\text{нм}}$ с непланарной магнитной анизотропией, эффективной константой магнитной анизотропии $1,5 \cdot 10^5$ Дж/м³, коэрцитивной силой H_c до 240 кА/м и квадратичностью петли гистерезиса в диапазоне 0,71-0,79, в которых перемагничивание происходит по механизму вращения магнитных моментов, путем их осаждения на анодированный темплат TiO_2 со сглаженным релье-

фом поверхности, что позволяет создавать магнитоанизотропные среды для магнитной сенсорики и высокоплотной записи информации.

Личный вклад соискателя

Результаты, выносимые на защиту, получены лично соискателем. Работа выполнялась под руководством доктора физико-математических наук Ю.А.Федотовой, которой были сформулированы научная идея, цель и задачи исследования. Автором работы самостоятельно получена бóльшая часть нанопористых темплатов и полностью выполнен синтез многослойных пленок, а также экспериментальные исследования структуры и магнитных свойств пленок методами рентгеноструктурного анализа, атомно-силовой и магнито-силовой микроскопии, СКВИД-магнитометрии, выполнена модельная обработка всех полученных экспериментальных результатов, произведены все основные расчеты, осуществлена систематизация и анализ результатов.

Соавторы приведенных публикаций М. Вольны-Маршалек и Ю. Касюк участвовали в анализе и моделировании магнитных свойств пленок. А. Зажицкий, М. Пежановский и М. Крупинский участвовали в обсуждении результатов магнитометрии и рентгеноструктурного анализа. О.А. Купреева и С.К. Лазарук синтезировали часть нанопористых темплатов. Е. Забила участвовал в проведении экспериментов методом атомно-силовой микроскопии. Ф. Крок и Б. Яни проводили исследования методом сканирующей электронной микроскопии, Ю. Хоенка участвовал в проведении магнитосиловой микроскопии. Результаты, принадлежащие соавторам по совместным публикациям, не вошли в диссертацию.

Апробация диссертации и информация об использовании её результатов

Результаты диссертационных исследований докладывались и обсуждались на научных семинарах физического факультета БГУ, НИИ ЯП БГУ, Института ядерной физики им. Г. Неводничанского Польской академии наук (Краков, Польша), а также на следующих научных конференциях: 50 Zakopane School of Physics “Breaking frontiers: submicron structures in physics and biology” (Zakopane, 2015); Nanomeeting-2015 (Minsk, 2015); 20th International Conference on Magnetism "ICM-2015" (Barcelona, 2015); 22nd International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces "ICMFS-2015" (Cracow, 2015); 8th Joint European Magnetic Symposia JEMS 2016 (Glasgow, UK, August 21-26, 2016); Nanomeeting-2017 (Minsk, 2017); Physics of Magnetism 2017 (Poznan, 2017); 9th Joint European Magnetic Symposia JEMS-2018 (Mainz, Germany, 2018).

Результаты диссертации используются в учебном процессе на физическом факультете БГУ (имеется акт о практическом использовании результатов).

Опубликованность результатов диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 17 научных работах: 8 статьях в научных журналах в соответствии с п.18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь (общим объемом 6,1 авторского листа), 3 статьях в сборниках материалов научных конференций, 6 тезисах докладов на научных конференциях.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из перечня условных обозначений, введения, общей характеристики работы, пяти глав основной части, заключения, библиографического списка и одного приложения. Полный объем диссертации составляет 184 страницы, включая 113 рисунков на 52 страницах, 20 таблиц на 11 страницах, 1 приложение занимает 1 страницу. Библиографический список содержит 193 наименования, включая собственные публикации автора (занимает 15 страниц).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **Главе 1** представлен аналитический обзор литературы, в котором систематизированы экспериментальные и теоретические результаты изучения морфологии, структурно-фазового состава и магнитных свойств сплошных и нанопористых пленок в системе Co/Pd. Проанализированы факторы, влияющие на перпендикулярную магнитную анизотропию пленок, такие как кристаллическая структура и качество интерфейсов между отдельными слоями.

Для нанопористых пленок систематизированы экспериментальные данные, показывающие влияние их морфологии на магнитную анизотропию, коэрцитивную силу, механизм перемагничивания и размер магнитных доменов. Рассмотрены способы получения нанопористых пленок и преимущества их формирования посредством осаждения на нанопористые темплаты анодированных оксидов. Также рассмотрена процедура получения упорядоченных нанопористых анодированных темплатов на примере анодированного оксида алюминия и титана.

В **Главе 2** описаны методики получения сплошных и нанопористых пленок, а также методы их экспериментальных исследований. Тонкие многослойные пленки составов $[\text{Co}_{t\text{Co}}/\text{Pd}_{t\text{Pd}}] \times 15$ и $\text{Pd}_{10\text{нм}}/[\text{Co}_{t\text{Co}}/\text{Pd}_{t\text{Pd}}] \times 15/\text{Pd}_{2\text{нм}}$, где $t_{\text{Co}} = 0,2 \text{ нм}; 0,3 \text{ нм}; 0,4 \text{ нм}$ и $t_{\text{Pd}} = 0,6 \text{ нм}; 1,0 \text{ нм}$, осаждались на плоских и пористых подложках путем термического напыления в сверхвысоком вакууме ($\sim 10^{-7}$ Па). Тонкая пленка состава $\text{Ta}_{5\text{нм}}/\text{Pd}_{15\text{нм}}/[\text{Co}_{0,5\text{нм}}/\text{Pd}_{1,0\text{нм}}] \times 5/\text{Pd}_{3\text{нм}}/\text{Ta}_{5\text{нм}}$ осаждалась на плоскую и пористую подложки с использованием магнетронной системы по напылению в среде инертного газа Ar. В качестве темплатов использовались нанопористые Al_2O_3 и TiO_2 с различной морфологией поверхности.

Для комплексного исследования морфологии, структурно-фазового состава пленок, а также их магнитных свойств применялись следующие экспериментальные методики: сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), атомно-силовая микроскопия (АСМ), рентгеноструктурный анализ (РСА), рентгеновская рефлектометрия, магнито-силовая микроскопия (МСМ), СКВИД-магнитометрия и магнитометрия с использованием переменного градиентного магнитометра.

В **Главе 3** представлены результаты исследования структуры и магнитных свойств тонких пленок $[\text{Co}_{t\text{Co}}/\text{Pd}_{t\text{Pd}}]\times 15$ перед и после их отжига в вакууме при температуре 300°C , а также тонких пленок с палладиевым буферным слоем $\text{Pd}_{10\text{нм}}/[\text{Co}_{t\text{Co}}/\text{Pd}_{t\text{Pd}}]\times 15/\text{Pd}_{2\text{нм}}$ ($t_{\text{Co}}=0,2\text{ нм}; 0,3\text{ нм}; 0,4\text{ нм}$ и $t_{\text{Pd}}=0,6\text{ нм}; 1,0\text{ нм}$), которые осаждались на плоские подложки Si/SiO_2 . Предшествующие исследования показывают, что наиболее выраженная перпендикулярная магнитная анизотропия для пленок наблюдалась при толщине кобальта $0,2\text{-}0,4\text{ нм}$ и палладия $0,6\text{-}1,0\text{ нм}$.

Методом рентгеновской рефлектометрии и методом РСА показано, что структурно-фазовый состав пленок без буферного слоя и с буферным слоем Pd представляет собой твердый раствор Co_xPd_y с ГЦК структурой, что объясняется значительной диффузией атомов кобальта в слой палладия уже при комнатной температуре. Соотношение атомов $\text{Co}:\text{Pd}$ в твердом растворе зависит от t_{Co} и t_{Pd} . Появление периодических интерфейсов для пленок с $t_{\text{Co}}=0,4\text{ нм}$ (кроме пленок после отжига), а также для пленки $\text{Pd}_{10\text{нм}}/[\text{Co}_{0,3\text{нм}}/\text{Pd}_{1,0\text{нм}}]\times 15/\text{Pd}_{2\text{нм}}$ можно предположить по наличию пиков Брэгга на рефлектограммах и спутанных пиков - 1 порядка на дифрактограммах данных пленок. Однако малая интенсивность пиков свидетельствует об их сильно прерывистой структуре. Показано, что буферный слой способствует более однородному осаждению пленок и появлению более выраженных периодических интерфейсов [7, 15]. Из сравнения интенсивностей дифракционных линий установлено, что преимущественным направлением ориентации роста (текстуры) кристаллитов в пленке Co_xPd_y является направление $[111]$.

Методом РСА, где при измерениях в стандартной геометрии $\theta\text{-}2\theta$ изменялся наклон вектора дифракции (ψ) относительно нормали к поверхности (измерения $\text{XRD-}\psi$), выявлено, что большинство кристаллитов $(111)\text{ Co}_x\text{Pd}_y$ в пленках сориентированы перпендикулярно к поверхности пленки и обладают вытянутой эллиптической формой с длинной осью, параллельной нормали к поверхности пленок [7].

Магнитометрия показала, что все исследуемые сплошные пленки характеризуются перпендикулярной магнитной анизотропией с квадратичностью пе-

тель гистерезиса $M_r(B_{\perp})/M_S$ около 0,9 и увеличением коэрцитивной силы $H_{C\perp}$ до 10 раз при измерениях в перпендикулярной геометрии, по сравнению с кривыми, полученными в плоскости пленки ($H_{C\perp} \approx 263$ кА/м и $H_{C\parallel} \approx 29$ кА/м для пленки $\text{Pd}_{10\text{нм}}/[\text{Co}_{0,2\text{нм}}/\text{Pd}_{0,6\text{нм}}] \times 15/\text{Pd}_{2\text{нм}}$).

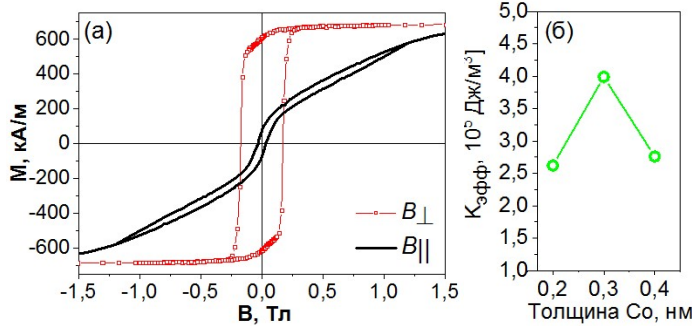


Рисунок 1. – (а) Зависимость $M(B)$ пленки $\text{Pd}_{10\text{нм}}/[\text{Co}_{0,3\text{нм}}/\text{Pd}_{0,6\text{нм}}] \times 15/\text{Pd}_{2\text{нм}}$; (б) зависимость $K_{\text{эфф}}(t_{\text{Co}})$ для пленок $\text{Pd}_{10\text{нм}}/[\text{Co}_{t_{\text{Co}}}/\text{Pd}_{0,6\text{нм}}] \times 15/\text{Pd}_{2\text{нм}}$ ($t_{\text{Co}}=0,2$ нм; 0,3 нм; 0,4 нм)

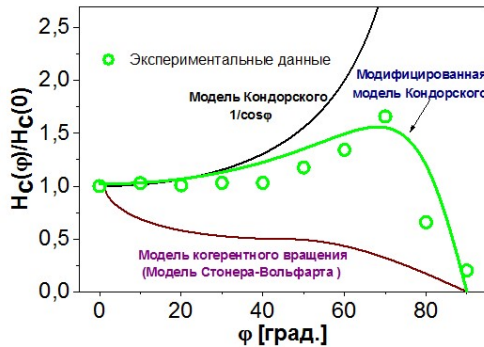


Рисунок 2. – Зависимость $H_C(\phi)/H_C(0)$ для пленки $\text{Pd}_{10\text{нм}}/[\text{Co}_{0,3\text{нм}}/\text{Pd}_{0,6\text{нм}}] \times 15/\text{Pd}_{2\text{нм}}$

и 1,0 нм и соотношением атомов Co:Pd в твердом растворе Co_xPd_y равным 2:3 и 2:5, соответственно). Поэтому пленки с данным составом впоследствии были выбраны для наноструктурирования путем осаждения на пористые темплаты (рисунок 1 а, б) [8,15].

Сравнение экспериментальных угловых зависимостей коэрцитивной силы $H_C(\phi)$ от угла приложения внешнего магнитного поля с соответствующими теоретическими зависимостями $H_C(\phi)$, предсказанными из модели Кондорского, модифицированной модели Кондорского и модели Стонера-Вольфарта позволило определить, что перемагничивание сплошных пленок до и после отжига, а также с буферным слоем, может быть корректно описано в рамках модифици-

Анализ магнитных свойств пленок показал, что пленки $\text{Pd}_{10\text{нм}}/[\text{Co}_{0,3\text{нм}}/\text{Pd}_{t_{\text{Pd}}}] \times 15/\text{Pd}_{2\text{нм}}$ ($t_{\text{Pd}}=0,6$ нм и 1,0 нм) обладают оптимальным сочетанием таких магнитных параметров как M_S ($M_S(t_{\text{Pd}}=0,6 \text{ нм})=683$ кА/м и $M_S(t_{\text{Pd}}=1,0 \text{ нм})=525$ кА/м), которые значительно превосходят M_S для пленок с $t_{\text{Co}}=0,2$ нм ($M_S(t_{\text{Pd}}=0,6 \text{ нм})=466$ кА/м и $M_S(t_{\text{Pd}}=1,0 \text{ нм}) \approx 378$ кА/м) и незначи-

тельно меньше M_S для пленок с $t_{\text{Co}}=0,4$ нм ($M_S(t_{\text{Pd}}=0,6 \text{ нм}) \approx 716$ кА/м и $M_S(t_{\text{Pd}}=1,0 \text{ нм}) \approx 570$ кА/м). Кроме того, эти пленки характеризуются значениями $H_{C\perp}$ ($H_{C\perp}(t_{\text{Pd}}=0,6 \text{ нм})=143$ кА/м и $H_{C\perp}(t_{\text{Pd}}=1,0 \text{ нм}) \approx 135$ кА/м), которые существенно выше, чем $H_{C\perp}$ для пленок с $t_{\text{Co}}=0,4$ нм ($H_{C\perp}(t_{\text{Pd}}=0,6 \text{ нм})=72$ кА/м и $H_{C\perp}(t_{\text{Pd}}=1,0 \text{ нм}) \approx 80$ кА/м). Также для пленок $\text{Pd}_{10\text{нм}}/[\text{Co}_{0,3\text{нм}}/\text{Pd}_{t_{\text{Pd}}}] \times 15/\text{Pd}_{2\text{нм}}$ наблюдались максимальные значения констант эффективной магнитной анизотропии $K_{\text{эфф}}$ ($3,9 \cdot 10^5$ Дж/м³ и $4,2 \cdot 10^5$ Дж/м³ для пленок с $t_{\text{Pd}}=0,6$ нм

рованной модели Кондорского, как движение доменных стенок с учетом вклада когерентного вращения магнитных моментов в области больших углов φ (рисунок 2) [2, 8].

Методом МСМ установлено, что доменная структура (тип доменов, а также их размер) для исследуемых сплошных пленок может варьироваться путем отжига данных пленок или путем их осаждения на палладиевый буферный слой. Обнаружено, что переход от доменов кластерного типа к доменам с полосовой структурой сопровождается существенным ростом магнитной анизотропии пленок (для пленок $\text{Pd}_{10\text{нм}}/[\text{Co}_{0,3\text{нм}}/\text{Pd}_{t\text{Pd}}]\times 15/\text{Pd}_{2\text{нм}}$ ($t_{\text{Pd}}=0,6$ нм и 1,0 нм) [8].

В Главе 4 представлены исследования по влиянию морфологии нанопористых темплатов оксида алюминия на структуру и магнитные свойства осажденных на них пленок Co/Pd . Анализ морфологии поверхности используемых темплатов методом СЭМ и АСМ показал, что их поверхность при синтезе методом двухэтапного анодирования не является плоской, и гексагонально-упорядоченные поры расположены в центре полусферических ячеек с вершинами и впадинами. Было установлено, что, варьируя параметры анодизации, возможно изменять диаметры ячеек (D_C) и пор (D_P) синтезированных темплатов Al_2O_3 в диапазонах 20-420 нм и 10-180 нм, соответственно. Помимо этого, возможна модификация субструктуры ячеек, которая проявляется в формировании нескольких пор внутри каждой ячейки [5,10,11,12]. Обнаружено, что метод ионно-плазменного травления в атмосфере Ar позволяет выравнивать рельеф поверхности темплатов Al_2O_3 , морфология поверхности которых характеризуется отсутствием ячеек с вершинами и впадинами, наблюдаемыми для темплатов перед травлением [6].

Методом СЭМ и АСМ установлено, что морфология пленок, осажденных на темплаты с различными особенностями рельефа поверхности, полностью наследует рельеф используемых пористых темплатов Al_2O_3 , пленки однородно осаждаются на поверхности ячеек вокруг пор (рисунок 3 а,б), и представляют собой ячеисто-пористую наноструктуру (массив гексагонально упорядоченных «антиточек») [1,5,6,15,16,17].

Методом РСА установлено, что структура пленок, осажденных на пористые темплаты Al_2O_3 , аналогична структуре соответствующих сплошных пленок и многослойная часть осажденных Co/Pd систем может быть описана, как твердый раствор Co_xPd_y с текстурой (111), стехиометрия которого определяется толщиной осаждаемых слоев кобальта и палладия. Таким образом,

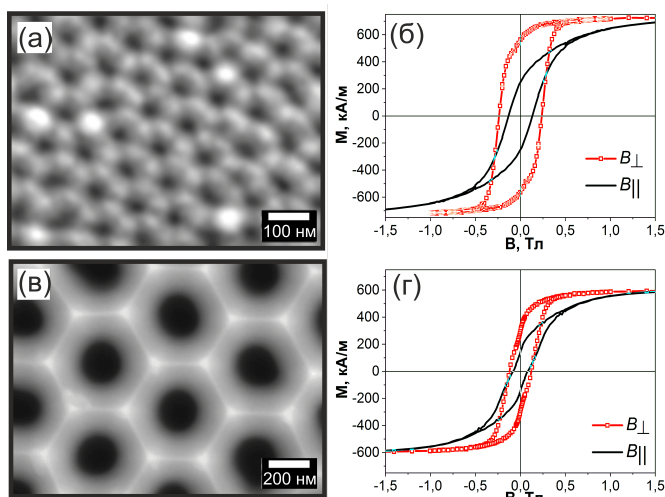


Рисунок 3. – Изображения СЭМ пленок $\text{Pd}_{10\text{nm}}/[\text{Co}_{0,3\text{nm}}/\text{Pd}_{0,6\text{nm}}]\times 15/\text{Pd}_{2\text{nm}}$, осажденных на темплату Al_2O_3 с $D_c=95$ нм, $D_p=30$ нм (а) и $D_c=420$ нм, $D_p=180$ нм (в). (б) и (г) Зависимости $M(B)$ для соответствующих пористых пленок

женных электронов, что позволяло сопоставить морфологические особенности пленок и их фазовый состав.

Методами магнитометрии и МСМ для всех пористых пленок подтверждено сохранение перпендикулярной магнитной анизотропии (рисунок 3 б, г), аналогично сплошным пленкам. Отличительной чертой пористых пленок на темплатах, характеризующихся присутствием массива гексагонально-упорядоченных пор и ячеек с вершинами и впадинами, является снижение квадратичности зависимостей $M(B_{\perp})$ до $\sim 0,50$ – $0,88$ и более чем двухкратное уменьшение значения эффективной константы магнитной анизотропии (с $K_{\text{эфф}} \approx 3,9 \cdot 10^5$ Дж/м³ для сплошной пленки $\text{Pd}_{10\text{nm}}/[\text{Co}_{0,3\text{nm}}/\text{Pd}_{0,6\text{nm}}]\times 15/\text{Pd}_{2\text{nm}}$ до $K_{\text{эфф}} \approx 2,1 \cdot 10^5$ Дж/м³ для пористой пленки с $D_c \approx 20$ нм и $D_p \approx 10$ нм; $K_{\text{эфф}} \approx 1,1 \cdot 10^5$ Дж/м³ для пористой пленки $D_c \approx 420$ нм и $D_p \approx 180$ нм), что объясняется нарушением со-направленности магнитных моментов в пленках, осажденных на различные области ячеек в темплатах [1,5,12,17]. Пористые пленки $\text{Pd}_{10\text{nm}}/[\text{Co}_{0,3\text{nm}}/\text{Pd}_{1,0\text{nm}}]\times 15/\text{Pd}_{2\text{nm}}$ с одной порой и несколькими пора́ми в ячейке ($D_c \approx 100$ нм, $D_p \approx 30$ нм) показывают подобные значения $K_{\text{эфф}} \approx 1,8 \cdot 10^5$ Дж/м³ и $H_{C1} \approx 271$ кА/м. Однако форма кривых намагниченности пленок с несколькими пора́ми в ячейке демонстрирует ступеньку на зависимости $M(B_{\perp})$. Формирование данной ступеньки для пленки с несколькими пора́ми в ячейке объясняется высокой степенью разупорядочения магнитных моментов пленки вблизи пор, которые перемагничиваются раньше, чем области с более плоскими участками

несмотря на развитую морфологию пористых темплатов Al_2O_3 , которая может приводить к неоднородной структуре осажденных на них пленок, где, например, границы ячеек могут являться центрами кристаллизации наносимого материала и способствовать неоднородному распределению осаждаемых химических элементов по поверхности темплата, пленки осаждаются однородно на поверхности между пора́ми [1,5,15]. Данный факт также подтверждался наложением изображений СЭМ в режимах регистрации вторичных и отра-

пленки, находящимся между порами. Для пленки с одной порой в ячейке такая ступенька отсутствует, так как её морфология характеризуется большей площадью плоских участков между порами [5,12]. Для пленки $\text{Ta}_{5\text{нм}}/\text{Pd}_{15\text{нм}}/[\text{Co}_{0,5\text{нм}}/\text{Pd}_{1,0\text{нм}}]\times 5/\text{Pd}_{3\text{нм}}/\text{Ta}_{5\text{нм}}$ осажденной на темплат Al_2O_3 со сглаженной морфологией поверхности, не наблюдается уменьшение квадратичности петли в сравнении с плоской пленкой. Это свидетельствует о том, что сглаженная поверхность между порами способствует меньшему отклонению магнитных моментов от перпендикулярного направления [6].

Для пористых пленок с малыми диаметрами пор (< 80 нм) наблюдается резкое возрастание значений $H_{C\perp}$ (практически в 1,5-2,0 раза, по сравнению со сплошными пленками), которое связано с пиннингом магнитных моментов на искусственно созданных дефектах (порах и границах ячеек). Более чем двухкратное увеличение $H_{C\parallel}$ наблюдается для пористых пленок во всем исследуемом диапазоне диаметров пор, что объясняется пиннингом магнитных моментов, отклоненных от нормали к пленкам на краях пор. Из изображений МСМ для сплошной и пористых пленок в размагниченном состоянии установлено, что для пористых пленок области, в которых магнитные моменты ориентированы в двух противоположных направлениях, значительно меньше, по сравнению со сплошной пленкой [1,5]. Подобное уменьшение областей с одинаковым направлением намагниченности также объясняется эффектом пиннинга магнитных доменов на границах пор, а также на границах квази-сферических ячеек. Сопоставление экспериментальных зависимостей $H_C(\varphi)$ для сплошной и пористых пленок с теоретическими модельными зависимостями позволило установить, что формирование пористой морфологии в пленках приводит к изменению механизма перемагничивания на вращательный механизм согласно модели Стонера–Вольфарта. Смена механизма перемагничивания также связана с эффектами пиннинга стенок магнитных доменов на границах пор, а также на границах квазисферических ячеек [5, 15, 16, 17].

В **Главе 5** представлены и обсуждены результаты исследования морфологии, структуры и магнитных свойств многослойной пленки $\text{Pd}_{10\text{нм}}/[\text{Co}_{0,3\text{нм}}/\text{Pd}_{0,6\text{нм}}]\times 15/\text{Pd}_{2\text{нм}}$, осажденной на темплат пористого анодированного оксида титана. Анализ морфологии синтезированных темплатов методом СЭМ показал, что удаление сплошного оксидного слоя на темплатах после анодирования методом ионно-плазменного травления, в отличие от метода воздействия ультразвуком, позволяет получать наноструктурированные темплаты с пологими областями между порами [3,4,9,13,14]. Было установлено, что оксид титана, синтезированный на поверхности титановой фольги, состоит из отдельных нанотрубок ($D_{\text{Внешн}} \approx 214 \pm 22$ нм), вершина которых представляет собой

отдельную ячейку типа воронки с пологими стенками и острыми краями, внутри которой находится собственно пора ($D_{Внутр} \approx 32 \pm 7$ нм) [4]. В случае оксида, синтезированного на поверхности пленки титана на кремниевой подложке, нанотрубчатая структура не столь очевидна, и видна только на поперечных изображениях СЭМ, демонстрирующих нанотрубчатую структуру с плоскими областями между порами ($D_{Внеш} \approx 90 \pm 20$ нм и $D_{Внутр} \approx 20 \pm 6$ нм) [13,14].

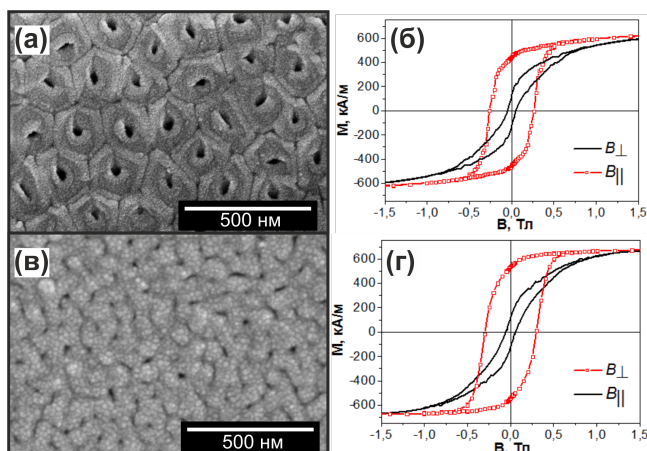


Рисунок 4. – Изображения СЭМ пленок $\text{Pd}_{10\text{нм}}/[\text{Co}_{0,3\text{нм}}/\text{Pd}_{0,6\text{нм}}] \times 15/\text{Pd}_{2\text{нм}}$, осажденных на темплатах TiO_2/Ti фольга с $D_{Внеш} \approx 214$ нм, $D_{Внутр} \approx 32$ нм (а) и $\text{TiO}_2/\text{Ti}/\text{Si}$ с $D_{Внеш} \approx 90$ нм и $D_{Внутр} \approx 20$ нм (в); (б) и (г) соответствующие зависимости $M(B)$

пленки и многослойная часть пленок (Co/Pd) представляет собой твердый раствор Co_2Pd_3 . Анализ измерений XRD- ψ для пористой пленки на темплате TiO_2 на подложке кремния показал, что, как и в случае со сплошной пленкой, кристаллиты твердого раствора Co_2Pd_3 имеют текстуру (111) и большинство из них ориентированно перпендикулярно поверхности подложки, однако они имеют форму, приближенную к сферической [15,17]. Пористые пленки на темплатах TiO_2 , сформированных на подложках фольги Ti и кремния, характеризуются перпендикулярной магнитной анизотропией с величиной эффективной константы магнитной анизотропии $K_{\text{эфф}} \approx 1,5 \cdot 10^5 \cdot 10^5$ Дж/м³. Однако, для них наблюдается заметный рост вклада от плоскостной анизотропии в результате отклонения магнитных моментов от перпендикулярного направления на границах пор и стенках нанотрубок, который проявляется в снижении квадратичности петель гистерезиса $M(B_{\perp})$ (M_r/M_s до 0,71-0,79), в сравнении со сплошной пленкой ($M_r/M_s \approx 0,89$), а также в более «открытой» форме кривых $M(H_{\parallel})$. Пленки на темплатах TiO_2 также характеризуются более высокими значениями $H_{C\perp}$ (215 кА/м и 239 кА/м, соответственно) и $H_{C\parallel}$ (39 и 45 кА/м, соответственно), по

Методами СЭМ при различных углах падения электронного пучка относительно поверхности пленок установлено, что, как и в случае пленок, осажденных на поверхность темплатов нанопористого анодированного оксида алюминия, морфология осажденных пленок наследует основные особенности и в деталях повторяет рельеф темплатов TiO_2 (рисунок 4 а, в) [4,9,13,15,17].

Рентгеноструктурный анализ пленок на темплатах TiO_2 показал, что структура пористых пленок аналогична структуре сплошной

сравнению с коэрцитивными силами для сплошной пленки ($H_{C\perp}=143$ кА/м и $H_{C\parallel}=28$ кА/м), что связано с пиннингом магнитных моментов на немагнитных дефектах таких как границы нанопор и границы нанотрубок [2,4,9,13,14]. Эффектом пиннинга также объясняется разница коэрцитивной силы между пленками на двух типах темплатов TiO_2 . Учитывая, что эффект пиннинга зависит от размера и плотности расположения дефектов, больший пиннинг наблюдается для пленок на темплате, сформированном на подложке кремния, по сравнению с пленками на темплате на подложке Ti фольги (рисунок 4 б,г), ввиду большей плотности дефектов (пор) при одинаковом их размере ($D_{\text{Внутр}} \approx 20\text{-}30$ нм).

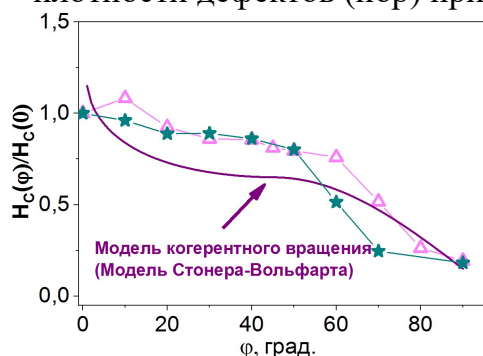


Рисунок 5. –Зависимость $H_c(\phi)/H_c(0)$ для пленки $\text{Pd}_{10\text{нм}}/[\text{Co}_{0,3\text{нм}}/\text{Pd}_{0,6\text{нм}}]\times 15/\text{Pd}_{2\text{нм}}$, осажденной на темплатах TiO_2/Ti фольга (звездочки) и $\text{TiO}_2/\text{Ti}/\text{Si}$ (треугольники)

Методом МСМ установлено, что нанопористая структура пленок приводит к снижению размеров областей с ортогональной ориентацией магнитных моментов, по сравнению со сплошной пленкой [4,9].

Для пористых пленок анализ зависимости от угла приложения внешнего магнитного поля $H_c(\phi)$ заметно отличается от кривой для сплошной пленки (рисунок 5). Установлено, что в угловом диапазоне $\phi=0\text{-}50^\circ$ значения H_c не чувствительны к изменениям направления магнитного поля и медленно уменьшаются только при $\phi > \approx 50^\circ$. Данная тенденция объясняется эффектом пиннинга магнитных момен-

тов на немагнитных дефектах в виде пор и границ нанотрубок и свидетельствует о смене механизма перемагничивания для пористых пленок на механизм близкий к когерентному/некогерентному вращению магнитных моментов (механизм Стонера-Вольфарта). Кривые намагниченности $M(B_\perp)$ пористых пленок аппроксимировались в рамках модели Стонера-Вольфарта [2]. Аппроксимация экспериментальной кривой намагниченности $M(B_\perp)$ позволяет оценить значения угла, определяющего положение оси легкого намагничивания пленок относительно их нормали, и $B_{\text{эфф}}$. Используя полученные значения $B_{\text{эфф}}$ в формуле $B_{\text{эфф}}=2K_{\text{эфф}}/M_s$ определены значения эффективной константы магнитной анизотропии $K_{\text{эфф}}$. Аппроксимации кривых намагниченности $M(B_\perp)$ в рамках модели Стонера-Вольфарта коррелируют с ходом экспериментальных кривых для пористых пленок на темплатах $\text{TiO}_2/\text{Ti}/\text{Si}$ (рисунок 6). Кроме того, значения $K_{\text{эфф}}$, рассчитанные в рамках этой модели, коррелируют со значениями $K_{\text{эфф}}$, определенными по методу расчета энергии магнитной анизотропии, исходя из разницы площадей между кривым намагниченности в двух ор-

тогональных ориентациях внешнего магнитного поля, что подтверждает возможность описания перемагничивания в пористых пленках в соответствии с вращательными механизмами и указывает на применимость модели Стонера-Вольфарта [2,16,17].

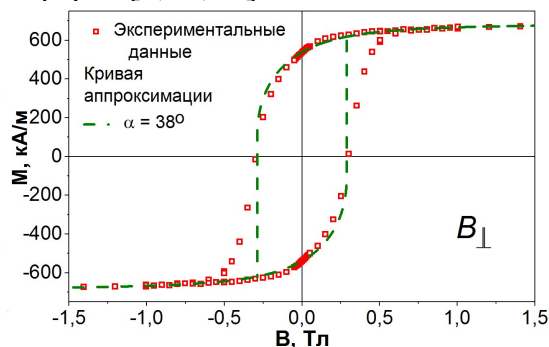


Рисунок 6. – Зависимость $M(B_{\perp})$ пористой пленки $\text{TiO}_2/\text{Ti}/\text{Si}$ вместе с модельными кривыми перемагничивания по механизму Стонера–Вольфарта

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Комплексное исследование методами рентгеновской рефлектометрии и рентгеноструктурного анализа сплошных пленок $[\text{Co}_{t\text{Co}}/\text{Pd}_{t\text{Pd}}] \times 15$ ($t_{\text{Co}}=0,2; 0,3; 0,4$ нм и $t_{\text{Pd}} = 0,6; 1,0$ нм) до и после отжига, а также сплошных пленок $\text{Pd}_{10\text{нм}}/[\text{Co}_{0,3\text{нм}}/\text{Pd}_{t\text{Pd}}] \times 15/\text{Pd}_{2\text{нм}}$ ($t_{\text{Pd}}=0,6$ нм и $1,0$ нм) доказывает формирование твердого раствора Co_xPd_y с преимущественной ориентацией квазисферических либо эллипсоидных кристаллитов (111) с размером 8-13 нм вдоль нормали к поверхности пленок [7,16,17].

2. Методами магнитометрии SQUID установлено, что сплошные пленки $\text{Pd}_{10\text{нм}}/[\text{Co}_{0,3\text{нм}}/\text{Pd}_{t\text{Pd}}] \times 15/\text{Pd}_{2\text{нм}}$ ($t_{\text{Pd}}=0,6$ нм и $1,0$ нм), осажденные с буферным слоем Pd характеризуются наиболее выраженной магнитной анизотропией с ориентацией оси легкого намагничивания вдоль нормали пленки, что подтверждается квадратичностью петель гистерезиса $M_r(B_{\perp})/M_s=0,9$ и коэрцитивной силой H_C до ≈ 263 кА/м при измерении вдоль нормали к плоскости образца, по сравнению со значениями $H_C \approx 24$ кА/м, измеренными вдоль плоскости пленки [1,2,8].

3. Систематическое модельное исследование кривых намагниченности $M(B_{\perp})$ сплошных пленок $[\text{Co}_{t\text{Co}}/\text{Pd}_{t\text{Pd}}] \times 15$ ($t_{\text{Co}}=0,2; 0,3; 0,4$ нм и $t_{\text{Pd}} = 0,6; 1,0$ нм) до и после отжига, а также $\text{Pd}_{10\text{нм}}/[\text{Co}_{0,3\text{нм}}/\text{Pd}_{t\text{Pd}}] \times 15/\text{Pd}_{2\text{нм}}$ ($t_{\text{Pd}}=0,6$ нм и $1,0$ нм), а также зависимостей коэрцитивной силы H_C от угла ϕ между магнитным полем H и нормалью к пленке указывает на возможность описания перемагничивания в рамках модифицированной модели Кондорского, а именно движением доменных стенок, с учетом вклада когерентного вращения магнитных моментов в области углов $\phi > 65^\circ$ [2,4,8].

4. На основании систематического анализа морфологии поверхности и структурно-фазового состава пористых пленок $\text{Pd}_{10\text{нм}}/[\text{Co}_{0,3\text{нм}}/\text{Pd}_{0,6\text{нм}}]\times 15/\text{Pd}_{2\text{нм}}$ и $\text{Ta}_{5\text{нм}}/\text{Pd}_{15\text{нм}}/[\text{Co}_{0,5\text{нм}}/\text{Pd}_{1,0\text{нм}}]\times 5/\text{Pd}_{3\text{нм}}/\text{Ta}_{5\text{нм}}$, осажденных на темплаты анодированного Al_2O_3 со средним диаметром пор $\langle D_p \rangle$ в диапазоне 10-180 нм, выявлено, что пленки наследуют рельеф поверхности исходного темплата и характеризуются тремя основными типами рельефа: ячеисто-пористым рельефом со средним диаметром гексагонально-упорядоченных пор в диапазоне $\langle D_p \rangle = 10-180$ нм; ячеисто-пористым рельефом и развитой субструктурой ячеек с $\langle D_p \rangle = 20-30$ нм; сглаженной морфологией поверхности с $\langle D_p \rangle \approx 20$ нм. Фазовый состав пленок представляет собой твердый раствор кобальта и палладия со стехиометрией Co_2Pd_3 с параметром решетки $a = 0,3808 \pm 0,0003$ нм и средним размером областей когерентного рассеяния 11 ± 2 нм [1,5,15].

5. В пористых пленках $\text{Pd}_{10\text{нм}}/[\text{Co}_{0,3\text{нм}}/\text{Pd}_{0,6\text{нм}}]\times 15/\text{Pd}_{2\text{нм}}$, $\text{Pd}_{10\text{нм}}/[\text{Co}_{0,3\text{нм}}/\text{Pd}_{1,0\text{нм}}]\times 15/\text{Pd}_{2\text{нм}}$ и $\text{Ta}_{5\text{нм}}/\text{Pd}_{15\text{нм}}/[\text{Co}_{0,5\text{нм}}/\text{Pd}_{1,0\text{нм}}]\times 5/\text{Pd}_{3\text{нм}}/\text{Ta}_{5\text{нм}}$ на основе темплатов Al_2O_3 экспериментально доказано сохранение непланарной магнитной анизотропии с преимущественной ориентацией магнитных моментов под углом $\alpha = 8-35^\circ$ относительно нормали к плоскости пленки, проявляющееся в высокой коэрцитивной силе $H_{C\perp}$ в диапазоне 95 - 271 кА/м и квадратичностью петли гистерезиса в диапазоне 0,50-0,99, по сравнению со значениями при измерении в плоскости пленок, и эффективной константой магнитной анизотропии $(1,1-2,1) \cdot 10^5$ Дж/м³ [1,5,6,12,15-17].

6. На основании систематического экспериментального анализа угловых зависимостей коэрцитивной силы H_C , а также модельного анализа кривых намагниченности $M(B_\perp)$, выполненного в рамках модели Стонера-Вольфарта, показано, что перемагничивание в пористых пленках $\text{Pd}_{10\text{нм}}/[\text{Co}_{0,3\text{нм}}/\text{Pd}_{0,6\text{нм}}]\times 15/\text{Pd}_{2\text{нм}}$, $\text{Pd}_{10\text{нм}}/[\text{Co}_{0,3\text{нм}}/\text{Pd}_{1,0\text{нм}}]\times 15/\text{Pd}_{2\text{нм}}$ и $\text{Ta}_{5\text{нм}}/\text{Pd}_{15\text{нм}}/[\text{Co}_{0,5\text{нм}}/\text{Pd}_{1,0\text{нм}}]\times 5/\text{Pd}_{3\text{нм}}/\text{Ta}_{5\text{нм}}$ на основе темплатов Al_2O_3 происходит по механизму когерентного/некогерентного вращения магнитных моментов [5,6,15,17].

7. Впервые получены многослойные тонкие нанопористые пленки $\text{Pd}_{10\text{нм}}/[\text{Co}_{0,3\text{нм}}/\text{Pd}_{0,6\text{нм}}]\times 15/\text{Pd}_{2\text{нм}}$, содержащие твердый раствор Co_2Pd_3 с постоянной решетки $a = 0,380-0,381$ нм, со средним диаметром пор $D_{\text{Внутр}} \approx 20-30$ нм на поверхности темплатов анодированного TiO_2 с нанотрубчатой структурой, что подтверждено результатами сканирующей электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа [2,3,4,9,13].

8. Анализ экспериментальных кривых $M(B_\perp)$ для пористых пленок $\text{Pd}_{10\text{нм}}/[\text{Co}_{0,3\text{нм}}/\text{Pd}_{0,6\text{нм}}]\times 15/\text{Pd}_{2\text{нм}}$, осажденных на темплат TiO_2 , указывает на сохранение непланарной магнитной анизотропии, характеризующейся эффектив-

ной константой магнитной анизотропии $K_{\text{эф}} \approx 1,5 \cdot 10^5 \text{ Дж/м}^3$, коэрцитивной силой H_C до 239 кА/м и квадратичностью петли гистерезиса M_r/M_S в диапазоне 0,71-0,79 [2,4,13].

9. Аппроксимации кривых намагниченности $M(B_{\perp})$ для пористых пленок $\text{Pd}_{10\text{нм}}/[\text{Co}_{0,3\text{нм}}/\text{Pd}_{0,6\text{нм}}] \times 15/\text{Pd}_{2\text{нм}}$, синтезированных на темплате TiO_2 , в рамках модели Стонера-Вольфарта, а также анализ зависимостей $H_C(\varphi)$ указывает на перемагничивание в пленках по механизму когерентного/некогерентного вращения [2,15-17].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Результаты исследований могут быть использованы при разработке пленочных магнитоэлектронных устройств, где требуется варьирование коэрцитивной силы и магнитной анизотропии в широких диапазонах. Например, высокие значения коэрцитивной силы ($H_{C\perp} \sim 80 \text{ кА/м}$) и малая чувствительность зависимости H_C к углу приложенного поля относительно легкой оси намагничивания для пористых пленок позволяет рассматривать данные структуры в качестве сред магнитной записи с высоким значением коэффициента сигнал-шум. Отклонение магнитных моментов от нормали к поверхности на границе пор и ячеек (нанотрубок) определяет большое значение градиента магнитного поля в малых масштабах, что может приводить к использованию данных пористых пленок для создания скирмионных текстур, а также для использования подобных возмущений магнитного поля на установление клеточных сетей из-за клеточного отклика на высоко-градиентное магнитное поле.

Результаты работы используются при чтении курса «Физика поверхности и методы её диагностики» для специальности магистратуры «Физика конденсированного состояния» на кафедре физики твердого тела физического факультета БГУ и могут использоваться на естественных факультетах других университетов.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях

1. Magnetic characteristics of CoPd and FePd antidot arrays on nanoporous Al_2O_3 templates /A. Maximenko, J. Fedotova, M. Marszałek, A. Zarzycki, Y. Zabala //Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2016. – Vol. 400. – P. 200–205.
2. Effect of the morphology on the mechanisms of the magnetization reversal of multilayered thin Co/Pd films /J.V. Kasiuk, A.A. Maksimenko, J.A. Fedotova, M. Marszałek, S.K. Lazaruk, O.V. Kupreev //Physics of the Solid State. – 2016. – Vol. 58, №11. – P. 2312–2319.

3. The influence of nanoporous anodic titanium oxide substrates on the growth of the crystalline hydroxyapatite coatings /K. Suchanek, M. Hajdyla, A. Maximenko, A. Zarzycki, M. Marszałek, B.R. Jany, F. Krok //Materials Chemistry and Physics. – 2017. –Vol. 186. – P.167-178.

4. Structure and magnetic properties of Co/Pd multilayers prepared on porous nanotubular TiO₂ substrate /A. Maximenko, M. Marszałek, J. Fedotova, A. Zarzycki, Y. Zabala, O. Kupreeva, S. Lazarouk, J. Kasiuk, S. Zavadski //Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2017. – Vol. 434. – P. 157–163.

5. Magnetic Properties of Co/Pd Multilayered Films on Porous Al₂O₃ Templates with Developed Cell Substructure /A.A. Maximenko, J.V. Kasiuk, J.A. Fedotova, M. Marszałek, Y. Zabala, J. Chojenka //Physics of the Solid State. – 2017. – Vol. 59, №9. – P. 1762–1770.

6. Effect of flattened surface morphology of anodized aluminum oxide templates on the magnetic properties of nanoporous Co/Pt and Co/Pd thin multilayered films /T.N. Anh Nguyen, J. Fedotova, J. Kasiuk, V. Bayev, O. Kupreeva, S. Lazarouk, D.H. Manh, D.L. Vu, S. Chung, J. Åkerman, V. Altynov, A. Maximenko //Applied Surface Science. – 2018. – Vol. 427. – P. 649–655.

7. Максименко, А.А. Структура тонких пленок Co/Pd с перпендикулярной магнитной анизотропией /А.А. Максименко //Проблемы физики, математики и техники. – 2018. –№2(35). –Р.11-20.

8. Федотова, Ю.А. Перпендикулярная магнитная анизотропия, механизмы переманичивания и структура магнитных доменов в тонких пленках Co/Pd /Ю.А. Федотова, А.А. Максименко, Ю.В. Касюк //Проблемы физики, математики и техники. – 2018. –№2(35). –Р.38-45.

Статьи в сборниках трудов конференций

9. CoPd antidot arrays with perpendicular magnetic anisotropy fabricated on TiO₂/Si templates /A. Maximenko, J. Fedotova, M. Marszałek, O. Kupreeva, S. Zavadski //Physics, Chemistry and Applications of Nanostructures: Proceedings of International Conference Nanomeeting – 2015, Minsk, Belarus, May 26-29 2015 /World Scientific; ed.: V. E. Borisenko, S. V. Gaponenko, V. S. Gurin, C. H. Kam. – Singapore, 2015. – P. 132-135.

10. Unique porous alumina formed in phosphoric acid electrolytes at high anodic voltages /X. Huang, W. Su, L. Sun, A. A. Maximenko, M. Marszałek, J. A. Fedotova, S. K. Lazarouk //Physics, Chemistry and Applications of Nanostructures: Reviews and Short Notes to Nanomeeting-2017, Minsk, Belarus, 30 May – 2 June, 2017 /World Scientific; ed.: V. E. Borisenko, S. V. Gaponenko, V. S. Gurin. –Singapore, 2017. – P.381-385.

11. Morphology of anodic porous alumina membranes fabricated on substrates with different electric conductivity/ A. Maximenko, M. Marszałek, Y. Zabala, A. Zarzycki //Physics, Chemistry and Applications of Nanostructures: Reviews and Short Notes to Nanomeeting-2017, Minsk, Belarus, May 30 – June 2, 2017 /World Scientific; ed.: V. E. Borisenko, S. V. Gaponenko, V. S. Gurin. –Singapore, 2017. – P. 390-393.

Тезисы

12. Sub-10 nm porous templates of anodized aluminium oxide with developed surface: a route towards high density magnetic antidot arrays /A. Maximenko, M. Marszałek, J. Fedotova, A. Zarzycki, B. Petelenz, Y. Zabala, M. Hajdyla, B.R. Jany, F. Krok //50 Zakopane School of Physics “Breaking frontiers: submicron structures in physics and biology”: Book of abstracts, Zakopane, 18-23 May, 2015/The Henryk Niewodniczanski Institute of Nuclear Physics Polish Academy of Sciences; ed.: Wojciech M. Kwiatek and Marta Marszalek. – Cracow, 2015. –P. 111.

13. Magnetic characteristics of CoPd and FePd antidot arrays on nanoperforated Al_2O_3 and TiO_2 Templates /A. Maximenko, M. Marszalek, J. Fedotova, A. Zarzycki, Y. Zabala, B. Jany, F. Krok //20th International Conference on Magnetism "ICM-2015": Book of abstracts, Barcelona, Spain, 5-10 July 2015. – Barcelona, 2015. – P.327. – Mode of access: <http://www.barcelocongresos.com.es/archivo/2015ICM/abstracts.pdf>. – Date of access: 03.10.2018.

14. Magnetic characteristics of CoPd antidot arrays on nanoperforated TiO_2 templates /A. Maximenko, M. Marszałek, J. Fedotova, A. Zarzycki, Y. Zabala //22nd International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces "ICMFS-2015": Book of Abstracts, Cracow, Poland, July 12-17, 2015 /AGH University of Science and Technology. –Cracow, 2015. – P.420.

15. CoPd antidots on Nanoperforated Al_2O_3 and TiO_2 Templates: Interrelation between Microstructure, Co Atom Chemical Environment and Magnetic Properties /A. Maximenko, Y. Zabala, M. Marszałek, J. Fedotova, A. Zarzycki, J. Chojenka, B.R. Jany, F. Krok //8th Joint European Magnetic Symposia (JEMS 2016): Book of abstracts, Glasgow, UK, 21-26 August, 2016/Institute of Physics. – London, 2016. – P.519. – Mode of access: http://jems2016.iopconfs.org/IOP/media/uploaded/EVIOP/event_590/JEMS_ALL_Abstracts_Single_File_-_Grouped_in_Sessions_UNORDERED.pdf. – Date of access: 03.10.2018.

16. Perpendicular magnetic anisotropy of nanoporous Co/Pd multilayers/ A. Maximenko, J. Kasiuk, A. Zarzycki, J. Fedotova, M. Marszałek// The European Conference Physics of Magnetism 2017 (PM'17): Book of abstracts, Poznan, Poland, 26-30 June, 2017/ Institute of Molecular Physics Polish Academy of Sciences; ed.: R. Micnas, B. Idzikowski, P. Leśniak, A. Szajek. – Poznan, 2017. –P.172.

17. Nanopatterning of the magnetic Co/Pd thin films by the perforated oxide templates /A.Maximenko, A.Zarzycki, Y.Zabila, J.Kasiuk, J.Fedotova, M.Marszałek //9th Joint European Magnetic Symposia (JEMS 2018): Book of abstracts, Mainz, Germany, 3-7 September, 2017 [Electronic resource]. – Mode of access: <https://jems2018.smart-abstract.com/sessionplanner/#/persons/84520>. – Date of access: 03.10.2018.

РЕЗЮМЕ

Максименко Алексей Алексеевич

Структурно-фазовое и магнитное состояние наноструктурированных тонких пленок Co/Pd, осажденных на нанопористые анодированные оксиды алюминия и титана

Ключевые слова: нанопористые тонкие пленки Co/Pd, перпендикулярная магнитная анизотропия, структура тонких плёнок, механизмы перемангничивания, анодированные оксиды алюминия и титана.

Цель работы: выявление взаимосвязи между магнитными характеристиками, морфологией и структурно-фазовым состоянием тонких магнитных нанопористых пленок Co/Pd с перпендикулярной магнитной анизотропией, сформированных на темплатах анодированных оксидов алюминия и титана; выявление механизмов перемангничивания пористых пленок.

Методы исследования и аппаратура: рентгеновская рефлектометрия и рентгеноструктурный анализ (дифрактометр Panalytical X'Pert Pro), магнитометрия (магнетометр MPMS XL SQUID, Quantum Design), атомно-силовая и магнито-силовая микроскопия (сканирующие зондовое микроскопы XE-120 Park System Corporation и NT-MDT Solver-Pro 47), сканирующая электронная микроскопия (микроскопы FEI Inspect S50 и Hitachi S-4800).

Полученные результаты и их новизна: 1) впервые был проведен комплексный анализ возможности наноструктуризации пленок Co/Pd с перпендикулярной магнитной анизотропией при использовании нанопаттернированных темплат оксида алюминия и оксида титана с различными морфологическими особенностями, где темплат оксида титана характеризуется гладкими участками между порами, а темплат оксида алюминия характеризуется гексагонально-упорядоченными углублениями с одной или несколькими порами в центре; 2) впервые представлено как данный интегрированный подход позволяет изменять поле коэрции (95-271 кА/м), квадратичность кривой намагниченности (0,5-0,9) и константу магнитной анизотропии (1,1-4,0 Дж/м³), а также механизм перемангничивания тонких пленок путем подбора темплат с соответствующими размерами пор и расстояния между ними; 3) впервые показано как сглаживание поверхности оксида алюминия методом ионно-плазменного травления позволяет расширить возможности по наноструктуризации пленок с перпендикулярной магнитной анизотропией.

Область применения: физика магнитных наноструктурированных материалов, материаловедение, разработка пленочных магнито-электронных устройств.

РЭЗЮМЭ

Максіменка Аляксей Аляксеевіч

Структурна-фазавы і магнітны стан нанаструктураваных тонкіх плёнак Co/Pd, асаджаных на нанопорыстыя анадаваныя аксіды алюмінія і тытана

Ключавыя словы: нанопорыстыя тонкія плёнкi Co/Pd, перпендыкулярная магнітная анізатрапія, структура тонкіх плёнак, механізмы перамагнічвання, анадаваны аксід алюмінія і тытана.

Мэта работы: выяўленне ўзаемасувязі паміж магнітнымі характарыстыкамі, марфалогіяй і структурна-фазавым складам тонкіх магнітных нанопорыстых плёнак Co/Pd з перпендыкулярнай магнітнай анізатрапіяй, сфармаваных на тэмплатах анадаваных аксідаў алюмінія і тытана; выяўленне механізмаў перамагнічвання порыстых плёнак.

Метады даследавання і апаратура: рэнтгенаўская рефлектаметрыя і рэнтгенаструктурны аналіз (дыфрактометр Panalytical X'Pert Pro), магнітометрыя (магнетометр MPMS XL SQUID, Quantum Design), атамна-сілавая і магніта-сілавая мікраскапія (сканавальныя зондавыя мікраскопы XE -120 Park System Corporation і NT-MDT Solver-Pro 47), сканавальная электронная мікраскапія (мікраскопы FEI Inspect S50 і Hitachi S-4800).

Атрыманыя вынікі і іх навізна: 1) упершыню быў праведзены камплексны аналіз магчымасці нанаструктурызацыі плёнак Co/Pd з перпендыкулярнай магнітнай анізатрапіяй пры выкарыстанню нанопатэрнінгаваных тэмплат аксіда алюмінія і аксіда тытана з рознымі марфалагічнымі асаблівасцямі, дзе тэмплаты аксіда тытана характарызуюцца гладкімі ўчасткамі паміж парамі, а тэмплаты аксіда алюмінія характарызуюцца гексагональна-упарадкаванымі паглыбленнямі з адной або некалькімі парамі ў цэнтры; 2) упершыню прадстаўлена як дадзены інтэграваны падыход дазваляе змяняць поле коэрцыі (95-271 кА/м), квадратычнасць крывой намагнічанасці (0,5-0,9) і канстанту магнітнай анізатрапіі (1,1-4,0 Дж/м³), а таксама механізм перамагнічвання тонкіх плёнак шляхам падбора тэмплат з адпаведнымі дыяметрам пор і адлегласці паміж імі; 3) упершыню паказана як згладжванне паверхні аксіда алюмінія метадам іённа-плазменнага травлення дазваляе пашырыць магчымасці па нанаструктурызацыі плёнак з перпендыкулярнай магнітнай анізатрапіяй.

Галіна прымянення: фізіка магнітных нанаструктураваных матэрыялаў, матэрыялазнаўства, распрацоўка плёнкавых магніта-электронных прылад.

SUMMARY

Maximenko Alexey

Structure and magnetic state of nanopatterned thin Co/Pd films deposited on nanoporous anodized aluminum and titanium oxides

Key words: nanoporous thin Co/Pd films, perpendicular magnetic anisotropy, crystal structure of thin films, mechanisms of magnetization reversal, anodized aluminum oxide and anodized titanium oxide.

The aim of the work is to find the correlation between the magnetic parameters, morphology and structure of thin magnetic nanoporous Co/Pd films with perpendicular magnetic anisotropy deposited on the porous templates of anodized aluminum and titanium oxides; revealing the mechanisms of magnetization reversal for nanoporous films.

Methods of investigation and facilities: X-ray reflectometry and X-ray diffraction (diffractometer Panalytical X'Pert Pro), magnetometry (MPMS XL SQUID, Quantum Design), atomic force and magnetic force microscopy (scanning probe microscopes XE -120 Park System Corporation and NT-MDT Solver-Pro 47), scanning electron microscopy (microscopes FEI Inspect S50 and Hitachi S-4800).

Obtained results and their novelty: 1) For the first time it was shown the possibility of nanopatterning of Co/Pd films with perpendicular magnetic anisotropy by application of two types of porous templates with different surface morphology: TiO_2 with the almost flat interpore regions and Al_2O_3 with the pores located in the middle of hexagonal packed hemispherical wells; 2) It was shown that this approach allows us to tune the coercive field (95-271 kA/m), squariness (0,5-0,9), the effective magnetic anisotropy constant (1,1-4,0 J/m³) and magnetization reversal mechanism of thin films by engineering the porosity and/or pore size of the templates; 3) for the first time it is shown how smoothing of the aluminum oxide surface by the ion-plasma etching allows to expand the possibilities for nanostructuring of thin films with perpendicular magnetic anisotropy.

Application areas: physics of magnetic nanostructured materials, materials science, the development of thin-film magneto-electronic devices.