Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук

На правах рукописи



Шерстнев Игорь Алексеевич

Электронный транспорт и магнитная структура систем нанооостровов из ферромагнитных материалов

Специальность 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

Москва – 2014

Работа выполнена в Лаборатории физики неоднородных систем Отделения физики твёрдого тела Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физическом институте им. П. Н. Лебедева Российской академии наук.

Научный руководитель:	доктор физико-математических наук, Пудонин Фёдор Алексеевич (ФИАН)
Официальные оппоненты:	доктор физико-математических наук, профессор, Шавров Владимир Григорьевич (ИРЭ РАН)
	кандидат физико-математических наук, Звездин Константин Анатольевич (ИОФ РАН)
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технологический институт Российской академии наук

Защита состоится «28» апреля 2014 г. в 12 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д.002.023.03 при ФИАН по адресу: Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинский проспект, д. 53, ФИАН, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН, с авторефератом — на сайте ФИАН www.lebedev.ru.

Автореферат разослан «____» _____ 2014 г.. Отзывы на автореферат просьба высылать по адресу 119991, Москва, Ленинский проспект, д. 53, ФИАН, Отделение физики твёрдого тела.

Учёный секретарь диссертационного
совета Д.002.023.03 при ФИАН
доктор физико-математических наук,
профессор М. А. Казарян

Общая характеристика работы

Актуальность исследований. В последнее время появилось множество работ, связанных с исследованием физических свойств металлических и магнитных наноструктур. Это связано как с фундаментальными проблемами магнетизма в системах с пониженной размерностью, так и с тем, что размеры структур, используемых при конструировании различных приборов электроники, достигли таких значений, когда необходимо учитывать квантово-размерные эффекты. Большую роль в стимулировании этих исследований сыграло открытие в многослойных системах на основе магнетиков и немагнитных материалов (например Fe/Cr) эффекта гигантского магнетосопротивления (ГМС), который уже нашёл колоссальное применение в компьютерной технике. Для реализации эффектов ГМС необходимы многослойные структуры с толщинами слоёв порядка 0.3–10 нм, что вызвало необходимость исследований физических свойств тонких металлических систем. Изучение магнитных и электронных параметров тонких магнитных плёнок в нанометровом диапазоне толщин является актуальной задачей также потому, что базовые элементы спинтроники (сенсоры магнитных полей, элементы оперативной памяти, магнитные головки, магнитные транзисторы и т. д.) — динамично развивающегося раздела современной квантовой электроники — построены из структур с нанометровыми размерами.

Большую роль в стимулировании исследований тонких и сверхтонких металлических и магнитных слоев сыграло открытие высокотемпературной сверхпроводимости. Поскольку в своём большинстве высокотемпературные сверхпроводники представляют собой многослойные периодические структуры на основе тонких слоев металлов (например меди) и различных окислов, то для изучения механизмов возникновения высокой температуры перехода структур в сверхпроводящее состояние также было необходимо проводить исследования физических свойств сверхтонких металлических плёнок.

Обнаруженный огромный прикладной потенциал нанометровых плёнок, а также фундаментальные проблемы магнитных и электрических явлений в наночастицах, обусловленные их размером [1, 2], подстёгивают дальнейшие исследования их свойств. Так, было обнаружено значительное изменение магнитных параметров тонких плёнок $Fe_{20}Ni_{80}$ в диапазоне толщин от 5 до 12 нм, что связывалось с переходом 3D–2D. В тонких металлических слоях Nb, Ni, Cu и др. наблюдались осцилляции диэлектрической проницаемости, проводимости, плазменной частоты и других параметров слоёв, связанные с квантово-размерными эффектами [3–5].

Особый интерес вызывают структуры, состоящие из систем магнитных и металлических наноостровов. Данные системы обладают рядом необычных электрических, магнитных и магнитооптических свойств, а многослойные системы из магнитных наноостровов («островковые магнитные сверхрешётки») способны реагировать на сверхслабые магнитные поля амплитудой $\sim 10^{-6}$ Э при комнатной температуре. В металлических наноостровковых системах обнаружены фотопроводимость [6], нелинейная зависимость проводимости от электрического поля [7], гигантская низкочастотная диэлектрическая проницаемость [8]. Физические механизмы, ответственные за необычные свойства наноостровковых систем сложны и требуют доскональных исследований. Так, важным становится вопрос о перколяционном переходе, то есть переходе плёнок от прерывистой (островковой) к сплошной структуре. Для металлических образцов этот переход становится особенно важным, так как при переходе меняется характер их проводимости, оптические и магнитные свойства. Особо важным представляются исследования переходов суперпарамагнетик-суперферромагнетик-ферромагнетик [9] для магнитных островковых систем, которые интересны как с точки зрения фундаментальных проблем физики магнетизма, так и в прикладном аспекте.

Цель работы. Целью данной работы является исследование физических процессов происходящих в системах магнитных наноостровов и выяс-

нение физической природы высокой чувствительности этих систем к сверхмалым магнитным полям и механизмов магнетосопротивления. Для достижения этой цели, были решены следующие задачи:

1. Исследованы транспортные и оптические свойства однослойной системы магнитных наноостровов.

2. Изучены магнитные свойства однослойных и многослойных систем магнитных наноостровов.

3. Исследованы гальваномагнитные свойства многослойных систем магнитных наноостровов.

Научная новизна.

1. Методом спектральной эллипсометрии изучены спектральные зависимости диэлектрической проницаемости серии островковых слоёв из $Fe_{20}Ni_{80}$ с различной эффективной толщиной d. Обнаружено, что при эффективной толщине островкового слоя $Fe_{20}Ni_{80}$ $d^* \approx 1.8$ нм наблюдается изменение знака действительной части диэлектрической проницаемости.

2. В процессе исследования температурной зависимости электронного транспорта для островковых плёнок различной толщины была найдена критическая эффективная толщина ($d^* \approx 1.8$ нм), соответствующая перколляционному порогу, при котором металлический характер проводимости сменялся на диэлектрический.

3. Вблизи критической толщины d^* обнаружена нелинейная зависимость проводимости образцов от приложенного напряжения. Построена феноменологическая модель этой проводимости.

4. Впервые проведены исследования процессов намагничивания многослойных систем из магнитных наноостровов. При этом была обнаружена

однонаправленная намагниченность образцов, не связанная с эффектом обменного смещения.

5. Предложен новый тип намагничивания — вихревые состояния, который может реализовываться в исследуемых магнитных островковых структурах.

6. Разработана и испытана установка по возбуждению вихревых состояний в островковых структурах.

Практическая значимость. Результаты проведённых исследований позволяют получить важную информацию о процессах, протекающих в островковых системах различной конфигурации. Электрические и оптические измерения дают информацию о транспортных свойствах подобных структур. Построенная феноменологическая модель позволит оптимизировать параметры структур (приборов), использующих нелинейность проводимости структур из наноостровов, в том числе меток для защиты от подделок.

Исследования процессов намагничивания «островковых магнитных сверхрешёток» позволяют значительно увеличить их чувствительность к сверхслабым магнитным полям и создать датчик сверхслабых магнитных полей, работающий при комнатной температуре.

Достоверность результатов. Достоверность результатов обеспечивается комплексным подходам к измерениям, их многократной повторяемостью, непротиворечивостью результатов, полученных различными методами.

Положения, выносимые на защиту:

1. При эффективной толщине островкового слоя $Fe_{20}Ni_{80}$ $d \approx 1.8$ нм происходит изменение знака действительной части диэлектрической проницаемости и изменение характера температурной зависимости проводимости, то есть диэлектрический отклик сменятся на металлический.

2. Зависимость проводимости однослойной системы магнитных наноостровов от внешнего электрического поля нелинейна в области слабых электрических полей. Предложенная феноменологическая модель адекватно описывает аномальную проводимость в наноостровковых структурах. На основе этой модели оптимизирована схема детектирования нелинейности.

3. В магнитных многослойных островковых структурах реализуется новый тип намагничивания — распределённые вихревые магнитные состояния, который проявляется как однонаправленная намагниченность, несвязанная с обменным взаимодействием.

4. Величина магнетосопротивления магнитных многослойных островковых структур определяется вкладами эффектов гигантского и анизотропного магнетосопротивлений.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались: на «X Всероссийской молодёжной конференции по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике», 2008 г., С.-Петербург; на «XI Всероссийской молодёжной конференции по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике», 2009 г., С.-Петербург; на Международной конференции «Functiomal Materials, ICFM-2009», 2009 г., Партенит, Украина; на XXI Международной конференции «Новое в магнетизме и магнитных материалах», 2009 г., Москва; на IV Байкальской международной конференции «Магнитные материалы. Новые технологии», 2010 г., Иркутск; на XIV Международном симпозиуме «Нанофотоника и наноэлектроника», 2010 г., Н.Новгород; на Международной конференции «Functional Materials, ICFM-2011», 2011 г., Партенит, Украина; на XIII Международной конференции «Physics and technology of the thin films and nanosystems», 2011 г., Ивано-Франковск, Украина; на 5 Всероссийской молодёжной конференции «Инновационные ас-

пекты фундаментальных исследований по актуальным проблемам физики», 2011 г., Москва; на Международной конференции «Nanomaterials: Application & Properties '2012», 2012 г., Алушта, Украина; на «XIX Уральской международной зимней школе по физике полупроводников», 2012 г., Екатеринбург; на «XIII Всероссийской школе-семинаре по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-13)», 2012 г., Екатеринбург; на Международной конференции «Functiomal Materials, ICFM-2013», 2013 г., Гаспра, Украина; на 21 Международном симпозиуме «Nanostructures: Physics and Technology», 2013 г., С.-Петербург; на V Евро-Азиатском симпозиуме «Trends in Magnetism», 2013 г., Владивосток.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 4 статьях в рецензируемых журналах [A1–A4] и 17 тезисов докладов [A5–A21].

Личный вклад автора. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причём вклад диссертанта был определяющим. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором.

Структура диссертации. Работа состоит из введения, 3 глав, заключения и списка цитируемой литературы. Диссертация изложена на 112 страницах машинописного текста, включая 56 рисунков. Библиографический список содержит 69 наименований.

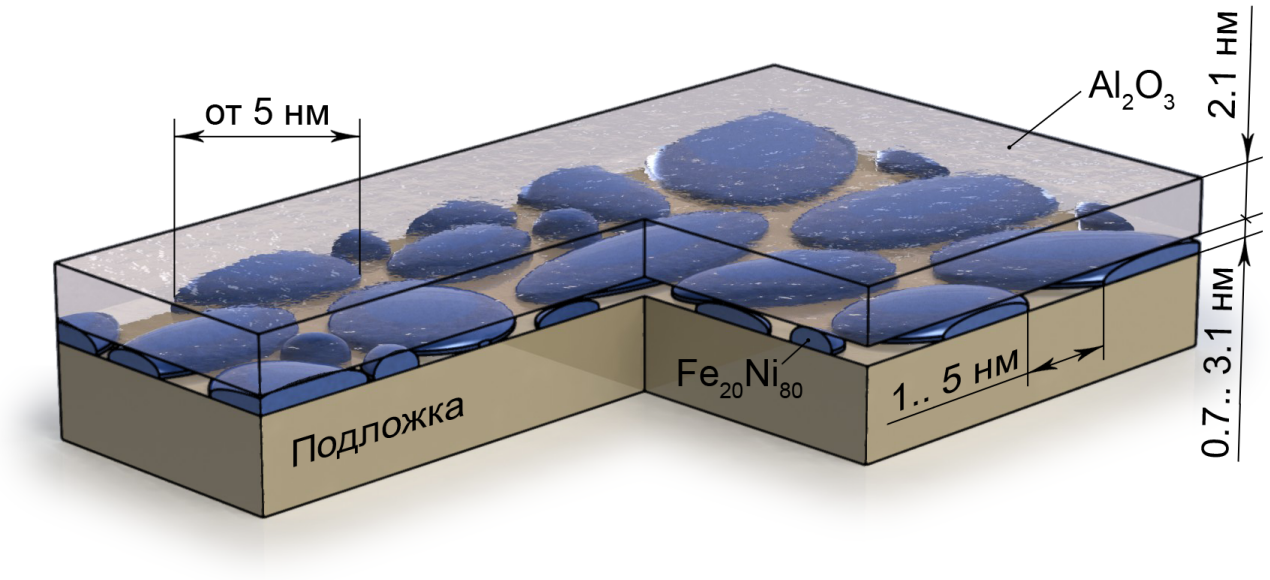


Рис. 1. Схематичное изображение однослойной структуры.

Содержание работы

Во **введении** дано обоснование актуальности темы данной работы, сформулированы цель и задачи исследований, приведены положения, выносимые на защиту, отражены их научная новизна и практическая значимость.

Первая глава является обзорной. В ней рассматривается явление магнетосопротивления, которое спровоцировало интерес к гранулированным и островковым структурам. Дано описание и краткая историческая справка по данным структурам. Также в этой главе приведён обзор широкого спектра исследований данных структур и важнейших открытий сделанных в них. Приведено описание и краткая теория физических явлений, которые исследовались в островковых наноструктурированных образцах в данной работе. В последнем разделе главы описан способ получения сверхтонких островковых плёнок, который использовался для получения исследованных в данной работе образцов. Все образцы, исследованные в данной работе, были изготовлены Пудониным Ф. А. в Лаборатории физики неоднородных систем Отделения физики твёрдого тела Физического института им. П. Н. Лебедева РАН.

Вторая глава посвящена исследованию оптических и транспортных свойств однослойных структур из магнитных наноостровов. Для этого ис-

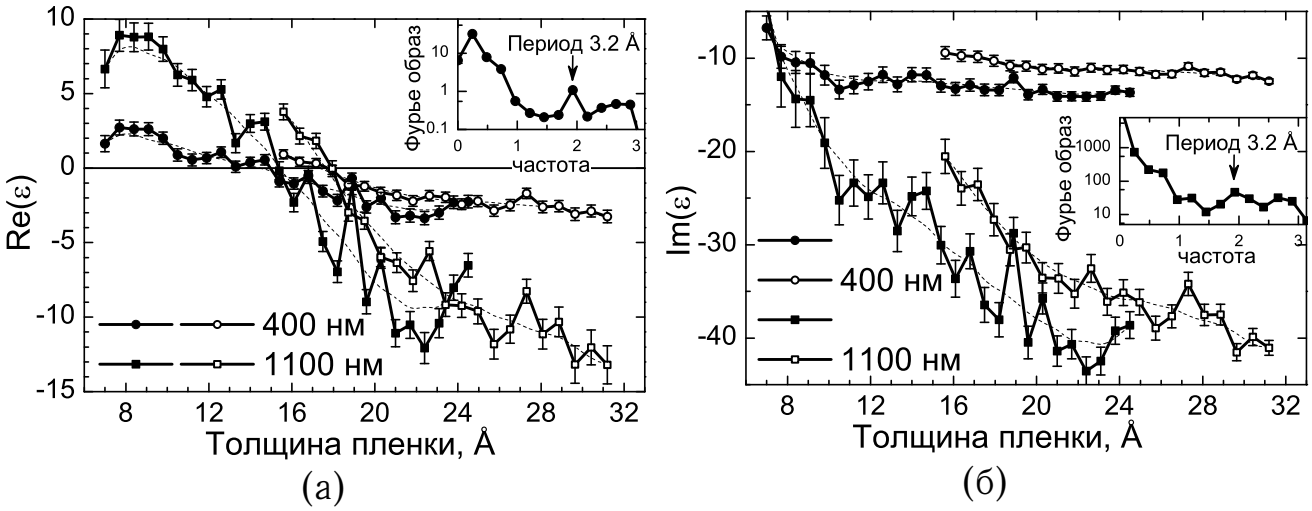


Рис. 2. Зависимость (а) действительной и (б) мнимой части диэлектрической проницаемости от толщины плёнки для двух длин волн. Чёрные и белые символы отвечают за разные серии образцов.

пользовались образцы с плавным клинообразным изменением толщины островкового слоя $Fe_{20}Ni_{80}$. Перед напылением пластина ситалла разрезалась на несколько подложек, на которые последовательно наносились островковые плёнки. По мере нанесения слоя нужной толщины, подложка убиралась за защитный экран, то есть проводилась процедура напыления клина. Далее на полученные плёнки наносился защитный слой Al_2O_3 (см. Рисунок 1). Ранее было показано, что тонкие слои металлов, толщиной 0.4–0.8 нм представляют собой системы нанооостровов, размер которых лежит в диапазоне 5–30 нм, расстояние между нанооостровами — 1–5 нм [10].

Полученные образцы были исследованы на спектральном эллипсометре «Эллипс-1891 САГ», работающем в диапазоне длин волн 400–1100 нм. Из измеренных данных была вычислена эффективная диэлектрическая проницаемость островкового слоя $Fe_{20}Ni_{80}$ с использованием двухслойной модели расчёта, в которой слой $Fe_{20}Ni_{80}$ рассматривался как сплошной с некоторой эффективной диэлектрической проницаемостью. Полученные данные для двух серий образцов приведены на Рисунке 2.

Было обнаружено, что при толщине плёнки $\sim$ 1.8 нм действительная часть диэлектрической проницаемости меняет знак, что может свидетель-

ствовать о переходе металл–диэлектрик. Зависимости $\mathrm{Im}(\varepsilon)$ от d для длины возбуждающего света $\lambda = 400$ нм и 1100 нм различались: для $\lambda = 1100$ нм $\mathrm{Im}(\varepsilon)$ значительно изменяется с толщиной слоя $Fe_{20}Ni_{80}$, а возрастание по величине $\mathrm{Im}(\varepsilon)$ при увеличении d носит осциллирующий характер для обеих серий образцов. Поскольку толщина слоев $Fe_{20}Ni_{80}$ в сериях изменяется плавно, а точность измерения $\mathrm{Im}(\varepsilon)$ (точность измерения ε не хуже 10%) значительно меньше амплитуды осцилляций, обнаруженные осцилляции нельзя считать ошибкой измерений и расчёта или неточного знания эффективной толщины слоев $Fe_{20}Ni_{80}$. Это подтверждается и тем фактом, что осцилляции $\mathrm{Im}(\varepsilon)$ от d практически не наблюдаются для $\lambda = 400$ нм. Поэтому однозначно определить физические причины возникновения подобных осцилляций пока не представляется возможным.

Необходимо отметить, что Фурье-анализ показывает, что зависимость $\mathrm{Im}(\varepsilon)$ от толщины d осциллирует с периодом около 3.2 Å (что близко к половине фермиевской длины волны электрона в Ni). Аналогичные осцилляционные зависимости $\mathrm{Im}(\varepsilon)$ наблюдались ранее в [5] при исследовании размерного квантования в различных сверхтонких металлических плёнках и были связаны с осцилляциями фазы волновой функции электрона на интерфейсе плёнка-подложка при изменении толщины плёнки [11, 12]. Поэтому можно предположить, что осцилляционный характер зависимости $\mathrm{Im}(\varepsilon)$ для островковых систем также может быть обусловлен аналогичными квантово-размерными эффектами. Надо заметить, что эффекты размерного квантования подобного рода в островковых плёнках, аналогичных исследуемым в данной работе, пока совершенно не изучены.

Для подтверждения наличия перехода металл-диэлектрик при толщине 1.8 нм в данных структурах было проведено исследование температурной зависимости низкочастотной проводимости. Результат измерений — процентное изменение проводимости от температуры (при помещении образца в жидкий азот) показано на Рисунке 3.

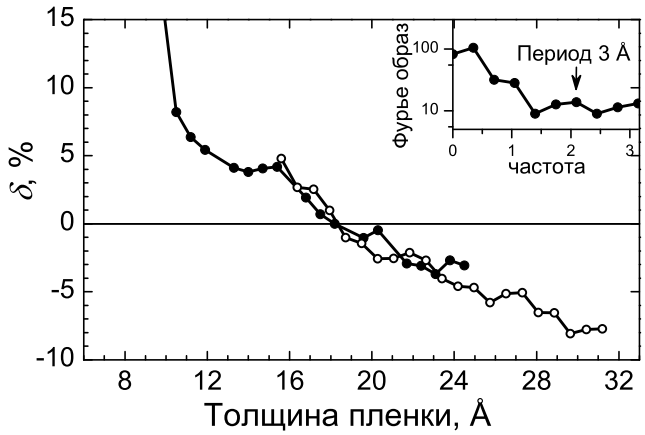


Рис. 3. Зависимость изменения проводимости с температурой от толщины образцов. Чёрные и белые символы отвечают за разные серии образцов.

Видно, что смена температурной зависимости проводимости, и, следовательно, переход металл-диэлектрик происходит при толщине 1.8 нм. Что подтверждает эллипсометрические измерения и позволяет считать вычисленную эффективную диэлектрическую проницаемость достоверной характеристикой островковой плёнки. Также отмечена аналогичная осцилляция зависимости с периодом 0.3 нм.

У данных образцов была обнаружена нелинейная зависимость проводимости от внешнего электрического поля, т.е. отклонение от закона Ома. Эта нелинейность обнаружена у образцов близких к перколяционному переходу, но без явной зависимости от толщины. Также приведены результаты исследований нелинейной проводимости у островковых образцов на основе Ti и W. Данные результаты были использованы для построения феноменологической модели нелинейной проводимости. Основой этой модели было предположение о временной дисперсии энергии, которая имеет место из-за активационного

механизма проводимости в островковых структурах:

$$J(t) = \int_0^\infty \tilde{\sigma}_0(\tau)u(t-\tau)d\tau + \int_0^\infty\int_0^\infty \tilde{\sigma}_1(\tau_1,\tau_2)|u(t-\tau_1)|u(t-\tau_1-\tau_2)d\tau_1 d\tau_2 + \\ + \int_0^\infty\int_0^\infty\int_0^\infty \tilde{\sigma}_2(\tau_1,\tau_2,\tau_3)u(t-\tau_1)u(t-\tau_1-\tau_2)u(t-\tau_1-\tau_2-\tau_3)d\tau_1 d\tau_2 d\tau_3 + \ldots, \tag{1}$$

Видно, что данная нелинейность проводимости соответствует осциллятору с нелинейными потерями (нелинейным трением). Нахождение коэффициентов нелинейности в формуле (1) было важной частью этой главы. В результате построения модели, данные коэффициенты были вычислены, а также найдены их частотные зависимости.

Это интересное свойство островковых плёнок — нелинейность проводимости было предложено использовать в качестве метки — защиты от подделок. В последней части главы построенная феноменологическая теория была применена для оптимизации схемы детектирования нелинейности проводимости. Эта задача важна для создания эффективного устройства проверки подлинности меток, изготовленных на основе островковых плёнок. Было предложено несколько способов детектирования нелинейности, причём эффективный сигнал достигал 10–15%. Такое высокое значение сигнала позволяет создавать достаточно простые портативные детектирующие устройства, что, несомненно, говорит в пользу островковых плёнок как защитных меток.

В **третьей главе** приведены результаты исследований магнитооптических и гальваномагнитных свойств многослойных наноструктурированных образцов из различных магнетиков. Было обнаружено, что сверхтонкие слои магнетиков очень слабо реагируют на внешнее магнитное поле (практически нет магнетосопротивления, слабый магнитооптический отклик). Поэтому было предложено создавать более толстые образцы, сохраняя при этом их островковую структуру. Этого удалось добиться послойным напылени-

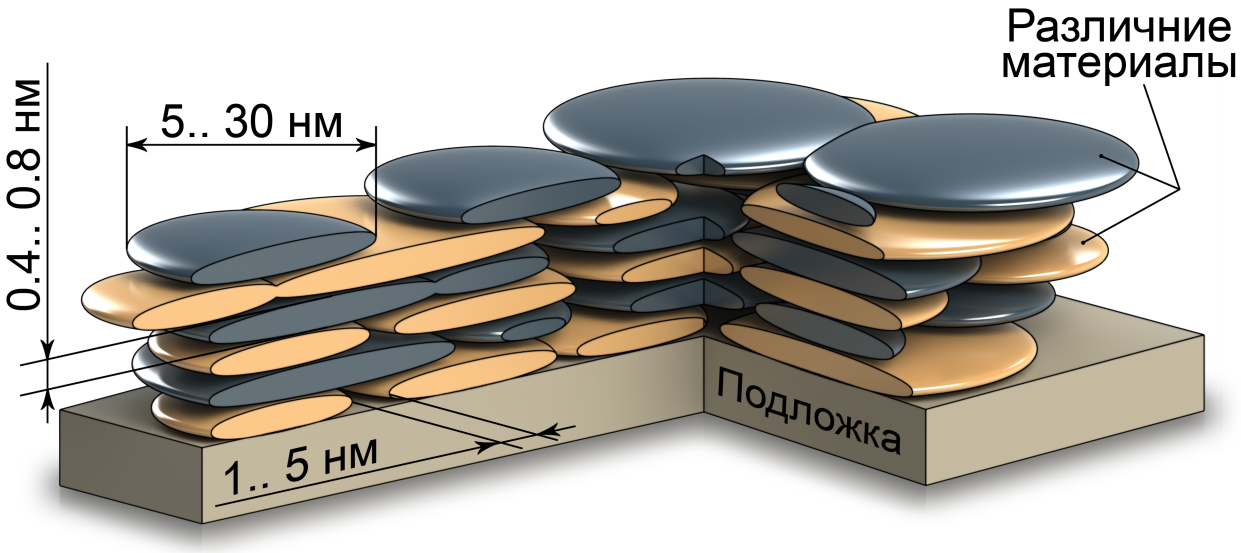


Рис. 4. Схематичное изображение многослойной структуры.

ем тонких слоёв различных магнетиков. Рентгеноструктурный анализ таких многослойных образцов показал [A1], что материал одного слоя не проникает в другой, то есть системы обладают хорошей периодичностью. В качестве подложек использовались ситалл, тонкий лавсан ($\sim$ 100 мкм), бумага или стекло. В качестве магнетиков использовались FeNi, CoNi, FeNiCo, CoCr и Co в различных парных сочетаниях.

Первая часть главы посвящена магнитооптическим измерениям. Измерения проводились на модифицированном эллипсометре «ЛЭФ-2», к которому был добавлен электромагнит, представляющий собой катушку Гельмгольца, что позволило использовать эллипсометр для проведения исследований экваториального и меридионального эффекта Керра. Была исследована магнитная структура полученных образцов. Показано, что величина коэрцитивной силы в образцах составила от 20 Э до $\sim$ 40 Э. Поле насыщения не превысило 40–60 Э. Проведённые измерения показали, что представленные образцы обладают не только ожидаемой магнитной анизотропией (наличие осей лёгкой и трудной намагниченности), но и однонаправленной анизотропией. Этот тип анизотропии выражался в неэквивалентности намагничивания структур в противоположных направлениях (см. Рисунок 5).

Была предпринята удачная попытка воздействия на обнаруженную ани-

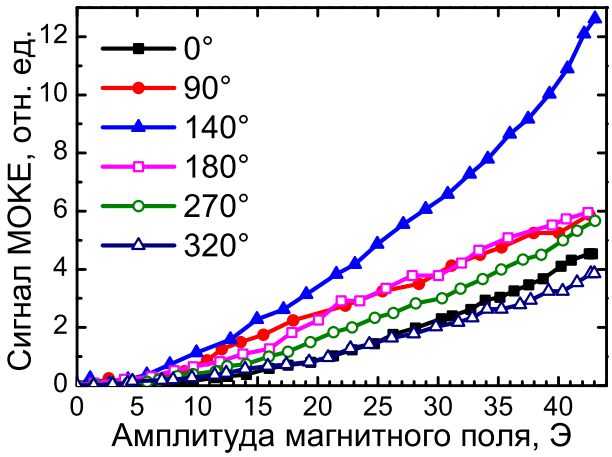


Рис. 5. Отклик эффекта Керра при различных направлениях приложенного поля для $(\mathrm{FeNi}(0.4\,\text{нм})/\mathrm{CoNi}(0.6\,\text{нм}))_{20}$ на ситалле.

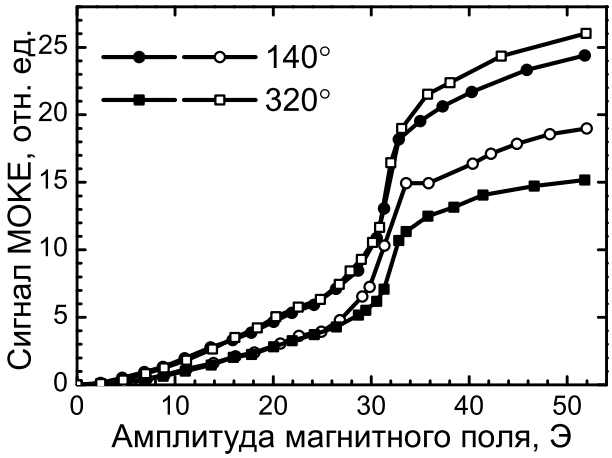


Рис. 6. Полевая зависимость отклика эффекта Керра в направлении 140–320° для намагниченной плёнки $(\mathrm{FeNi}/\mathrm{CoNi})_{20}$ на ситалле в эксперименте с переворотом оси. Тёмные маркеры — намагничивание в прямом направлении, светлые — в обратном.

зотропию, а именно «перевернуть» её. После воздействия сильным ($\sim 2\,\text{Тл}$) внешним магнитным полем, направленным параллельно плоскости образца, направление анизотропии сменилось на противоположное (см. Рисунок 6).

Однонаправленная анизотропия не является новым явлением в физике магнитных структур и чаще всего она объясняется взаимодействием между слоями магнетиков с различными параметрами. Основным проявлением такого взаимодействия является смещение петли гистерезиса вдоль оси абсцисс, а величина смещения характеризует это взаимодействие. Для проверки этого факта с помощью меридионального эффекта Керра на установке были

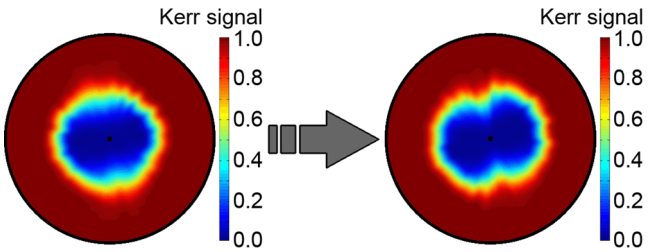


Рис. 7. Полярные диаграммы намагничивания для структуры $(FeNiCo/CoCr)_{10}$, демонстрирующие намагниченность образца в различных направлениях до воздействия вихревого магнитного поля (слева) и после (справа).

сняты петли гистерезиса представленных структур. Ни одна из них не была смещена. Следовательно, обнаруженную анизотропию нельзя объяснить чистыми обменными взаимодействиями между подрешётками в структурах или между магнитными решётками материалов.

Для объяснения однонаправленной анизотропии было выдвинуто предположение о формировании в островковых структурах особых квазистационарных вихревых магнитных состояний. Основной их особенностью будет распределение намагниченности по нескольким островам. Возможность существования таких состояний косвенно подтверждается измерениями, сделанными на магнитном микроскопе, а также расчётами. Была сделана попытка возбуждения вихревых магнитных состояний в многослойных островковых структурах. Для этого было сконструировано устройство, позволяющее подвергнуть образцы воздействию слабого вихревого внешнего магнитного поля, что, как предполагалось, изменит их магнитную структуру. В подтверждение выдвинутого предположения, магнитная структура островковых образцов значительно изменилась после воздействия внешнего вихревого магнитного поля (см. Рисунок 7).

В последней части главы переведены результаты исследований гальваномагнитных свойств представленных структур. Была собрана простая схема измерения, работающая в режиме источника тока; падение напряжения на образце измерялась с помощью высокоточного дифференциального вольт-

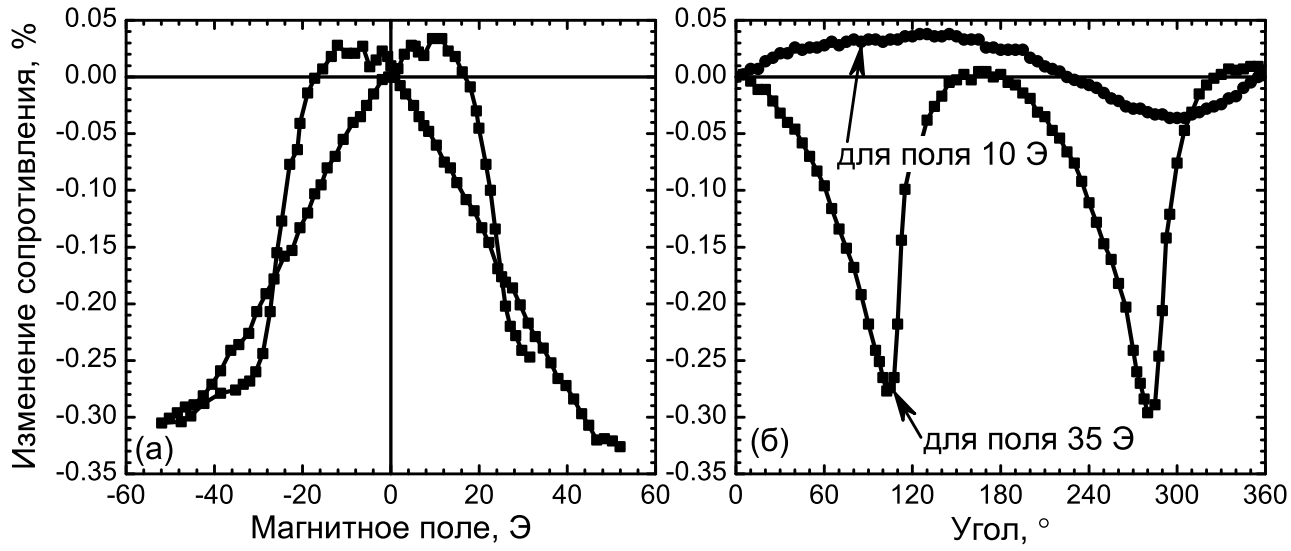


Рис. 8. Относительная зависимость сопротивления для $(FeNi/CoNi)_{20}$ на ситалле от (а) величины поля и (б) от угла φ между направлением приложения внешнего магнитного поля и осью в образце.

метра. Величина обнаруженного магнетосопротивления достигала 2–3%. Было обнаружено, что структуры проявляют как положительное, так и отрицательное магнетосопротивление. Также была обнаружена угловая зависимость величины магнетосопротивления от направления приложения внешнего магнитного поля относительно выбранной оси в образце. На Рисунке 8 приведены типичные картины магнетосопротивления и его угловой зависимости.

При более подробном изучении этого явления было обнаружено, что величина магнетосопротивления слабо зависит от угла между направлением протекания тока в образце и направлением внешнего магнитного поля, чего следовало бы ожидать в первую очередь. Но существует сильная зависимость величины магнетосопротивления от угла между направлением внешнего магнитного поля и выделенной осью в образце. Это говорит о преимущественном влиянии структуры островковой плёнки на эффект. В заключении выдвинуто предположение об одновременном действии эффектов гигантского и анизотропного магнетосопротивления.

В **заключении** диссертации кратко сформулированы основные результаты работы.

Заключение

1. В процессе эллипсометрических исследований диэлектрической проницаемости ε наноостровковых слоёв из $Fe_{20}Ni_{80}$ различной толщины d было обнаружено, что действительная часть ε изменяет знак с положительного значения на отрицательное, что соответствует изменению характера отклика системы с диэлектрического на металлический.

2. Исследование транспортных свойств наноостровковых слоёв $Fe_{20}Ni_{80}$ продемонстрировали наличие перколляционного порога при эффективной толщине слоёв $Fe_{20}Ni_{80}$ $d \approx 1.8$ нм.

3. Вблизи перколяционного перехода обнаружена нелинейная зависимость проводимости островковых слоёв $Fe_{20}Ni_{80}$ от слабого электрического поля. Построена феноменологическая модель, описывающая основные закономерности возникновения аномальной проводимости в наноостровковых структурах.

4. В многослойных магнитных островковых системах обнаружена однонаправленная магнитная анизотропия, которая не связана с обменной анизотропией.

5. Предложен новый тип намагничивания — вихревые состояния, который может реализовываться в магнитных островковых структурах, и продемонстрирована возможность влияния на магнитную структуру островковых слоёв $Fe_{20}Ni_{80}$ внешних слабых вихревых магнитных полей.

6. Исследованы гальваномагнитные свойства многослойной системы магнитных наноостровов. В структурах обнаружено магнетосопротивление, зависящее от направления приложения магнитного поля в плоскости образца. Выдвинуто предположение об одновременном проявлении эффектов ГМС и анизотропного магнетосопротивления.

Список публикаций по теме диссертации

A1. Болтаев А. П., Пудонин Ф. А., Шерстнев И. А. Особенности магнитосопротивления многослойных систем магнитных наноостровков в слабых магнитных полях // ФТТ. 2011. Т. 53, № 5. С. 892.

A2. Boltaev A. P., Pudonin F. A., Sherstnev I. A. Vortex-like magnetization of multilayer magnetic nanoisland systems in weak magnetic fields // Applied Physics Letters. 2013. Vol. 102, no. 14. P. 142404.

A3. Boltaev A. P., Pudonin F. A., Protsenko I. E., Uskov A. V., Sherstnev I. A. Non-Contact Detection of Nonlinear Conductance in Island Metal Films // Journal of Russian Laser Research. 2013. Vol. 34, no 6. P. 537.

A4. Boltaev A. P., Pudonin F. A., Sherstnev I. A. Conductance of island and granular metal films // Solid State Communications. 2014. Vol. 180. P. 39.

A5. Шерстнев И. А., Пудонин Ф. А. Магнитосопротивление и одноосная магнитная анизотропия многослойных систем магнитных наноостровов // Тезисы докладов X Всероссийской молодёжной конференции по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой и опто- и наноэлектронике. С.-Петербург. С. 26. 2008.

A6. Шерстнев И. А., Пудонин Ф. А. Процессы намагничивания периодических многослойных систем из магнитных наноостровов // Тезисы докладов XI Всероссийской молодёжной конференции по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой и опто- и наноэлектронике. С.-Петербург. С. 75. 2009.

A7. Boltaev A. P., Pudonin F. A., Sherstnev I. A. Some features of magnetoresistance of multilayered systems of magnetic nanoislamds // International conference «Functiomal Materials, ICFM-2009». Ukraine, Crimea, Partenit. Abstracts. P. 81. 2009.

A8. Болтаев А. П., Пудонин Ф. А., Шерстнев И. А. Магнитосопротивление многослойных систем магнитных наноостровов // Труды XXI Международной конференции «Новое в магнетизме и магнитных материалах». Москва. С. 795. 2009.

A9. Болтаев А. П., Пудонин Ф. А., Шерстнев И. А. Особенности намагничивания и магнитосопротивление многослойных периодических структур из магнитных наноостровов // Тезисы докладов на IV Байкальской международной конференции «Магнитные материалы. Новые технологии». Иркутск. С. 63. 2010.

A10. Болтаев А. П., Пудонин Ф. А., Шерстнев И. А. Исследование процессов намагничивания и магнитосопротивление периодических систем из магнитных наноостровов // Труды XIV междунардного симпозиума Нанофотоника и наноэлектроника. Н.Новгород. С. 154. 2010.

A11. Boltaev A. P., Pudonin F. A., Sherstnev I. A. Some features of magnetic reversal of magnetic multilayer periodical nanoislans structures // International conference «Functional Materials, ICFM-2011». Ukraine, Crimea, Partenit. Abstracts. P. 149. 2011.

A12. Boltaev A. P., Bothe K., Kazaryan S. A., Krotova K. E., Pors A., Protsenko I. E., Pudonin F. A., Sherstnev I. A., Starodubtsev N. F., Uskov A. V., Willatzen M. Metal nano-particles in the applications for photovoltaic, light emission and microelectronic: experiments and theory (INVITED) // Proceedings of XIII International Conference Physics and technology of the thin films and nanosystems. Ivano-Frankivsk, Ukraine. P. 21, 2011.

A13. Шерстнев И. А., Пудонин Ф. А. Процессы намагничивания периодических многослойных систем из магнитных наноостровов // 5 Всероссийская молодёжная конференция «Инновационные аспекты фунда-

ментальных исследований по актуальным проблемам физики». Москва. Сборник трудов. С. 100. 2011.

A14. Boltaev A. P., Pudonin F. A., Sherstnev I. A. Electrical and Dielectric Properties of Nanoisland Systems Below Percollasion Threshold // Nanomaterials: Application & Properties '2012. Alushta, Crimea, Ukraine. Proceedings. P. 01PCN10. 2012.

A15. Boltaev A. P., Pudonin F. A., Sherstnev I. A. Multilayered Structures from Periodically Alternating Magnetic Island Layers: Magnetization Processes and Magnetoresistance // Nanomaterials: Application & Properties '2012. Alushta, Crimea, Ukraine. Proceedings. P. 04MFPN01. 2012.

A16. Болтаев А. П., Пудонин Ф. А., Шерстнев И. А. Диэлектрические свойства структур на основе металлических островковых плёнок // Тезисы докладов XIX Уральской международной зимней школы по физике полупроводников. Екатеринбург. С. 126. 2012.

A17. Болтаев А. П., Пудонин Ф. А., Шерстнев И. А. Магнитная анизотропия многослойных периодических структур из магнитных наноостровов // Тезисы докладов XIX Уральской международной зимней школы по физике полупроводников. Екатеринбург. С. 222. 2012.

A18. Пудонин Ф. А., Шерстнев И. А, Болтаев А. П. Электропроводность и диэлектрическая проницаемость разупорядоченной системы магнитных наноостровов

Тезисы докладов XIII Всероссийской школа-семинара по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-13). Екатеринбург С. 114. 2012.

A19. Boltaev A. P., Pudonin F. A., Sherstnev I. A. Vortex-like states im multylayer magnetic nanoisland systems // V Euro-Asian Symposium «Trends

in MAGnetism». Vladivostok. Abstracts. P. 226. 2013.

A20. Boltaev A. P., Pudonin F. A., Sherstnev I. A. Metal-insulator transition in systems of magnetic nanoislands // International conference «Functional Materials, ICFM-2013». Ukraine, Crimea, Partenit. Abstracts. P. 169. 2013.

A21. Boltaev A. P., Pudonin F. A., Sherstnev I. A. Photoconductivity of nano-island metal films // International conference «Functional Materials, ICFM-2013». Ukraine, Crimea, Partenit. Abstracts. P. 413. 2013.

Цитированная литература

1. Dormann J. L., Fiorani D., Giammaria F., Lucari F. Magneto-optical Kerr rotation on Fe-Al_2O_3 granular thin films // J. Appl. Phys. 1991. Vol. 69, no. 8. P. 5130.

2. Shigeto K., Okuno T., Mibu K. et al. Magnetic force microscopy observation of antivortex core with perpendicular magnetization in patterned thin film of permalloy // Appl. Phys. Lett. 2002. Vol. 80, no. 22. P. 4190.

3. Villagomez R., Keller O., Pudonin F. A. Experimental measurements of the thickness dependence of the IR reflectance from Al quantum wells // Physics Letters A. 1997. Vol. 235, no. 6. P. 629.

4. Villagomez R., Pudonin F. A., Keller O. Infrared reflectivity and dielectric permeability of ultra-thin Cu and Al films // Optics Comm. 1999. Vol. 170, no. 4—6. P. 181.

5. Kuzik L. A., Yakovlev V. A., Pudonin F. A., Mattei G. Quantum size effects in the optical conductivity of ultrathin metal films // Surface Science. 1996. Vol. 361–362, no. 0. P. 882.

6. Болтаев А. П., Пенин Н. А., Погосов А. О., Пудонин Ф. А. Обнаружение фотопроводимости в сверхтонких металлических пленках в видимой и инфракрасной областях спектра // ЖЭТФ. 2003. Т. 123, № 5. С. 1067.

7. Болтаев А. П., Пудонин Ф. А. Влияние слабого электрического поля на проводимость в тонких металлических пленках // ЖЭТФ. 2006. Т. 130, № 3. С. 500.

8. Болтаев А. П., Пудонин Ф. А. Аномально высокая низкочастотная эффективная диэлектрическая проничаемость в системе металлических наноостровов // ЖЭТФ. 2008. Т. 134, № 3. С. 587.

9. Sousa J. B., Santos J. A. M., Silva R. F. A. et al. Peculiar magnetic and electrical properties near structural percolation in metal-insulator granular layers // J. Appl. Phys. 2004. Vol. 96, no. 7. P. 3861.

10. Болтаев А. П., Пенин Н. А., Погосов А. О., Пудонин Ф. А. Активационная проводимость в островковых металлических пленках // ЖЭТФ. 2004. Т. 126, № 4. С. 954.

11. Kagan Y., Dubovskii L. B. Quantum oscillations of the superconducting transition temperature in metal-nonmetal systems // J. Exp. Theor. Phys. 1977. Vol. 45, no. 2. P. 339.

12. Кротов Ю. А., Суслов И. М. Проблема повышения T_c сверхпроводников с точки зрения поверхностных эффектов // ЖЭТФ. 1995. Т. 107, № 2. С. 512.