

На правах рукописи



Павлов Александр Валерьевич
**Электронная спектроскопия спиновых
состояний поверхности**

01.04.04 – Физическая электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2022

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель:

Петров Владимир Никифорович, доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Шикин Александр Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры электроники твердого тела, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет», Санкт-Петербург

Пронин Владимир Петрович, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры теоретической физики и астрономии, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена», Санкт-Петербург

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт аналитического приборостроения Российской академии наук**, Санкт-Петербург

Защита состоится 13 апреля 2022 года в 14:00 на заседании диссертационного совета У.01.04.04 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, корпус 2, аудитория 249).

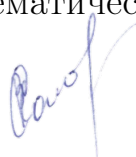
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://www.spbstu.ru> федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Автореферат разослан « » марта 2022 года

Ученый секретарь диссертационного совета У.01.04.04,

кандидат физико-математических наук,

доцент



Соловьев Константин Вячеславович

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Для увеличения производительности логических микросхем и увеличения ёмкости систем хранения информации требуется применение устройств, работающих на новых физических принципах. Одним из направлений, реализующих такой подход, является спиновая электроника (спинтроника). Она, в отличие от классической электроники, оперирующей зарядами, предлагает использовать для работы с информацией магнитный момент электрона [1] и является перспективной, активно развивающейся областью физики. В настоящее время ведётся поиск новых спинтронных эффектов и материалов [2].

В работе представлены результаты экспериментального исследования спиновых состояний поверхности кристалла $\text{FeNi}_3(110)$ и тонких плёнок на его поверхности. Также представлены анализ полученных экспериментальных данных и следующие из него модели изучаемых явлений, основанные на методах теории функционала плотности и физической кинетики. В последней главе диссертации описана методика вторично-электронного эксперимента с применением разработанного и испытанного спинового детектора - многоканального детектора Мотта.

Полученные результаты представляют фундаментальный и практический интерес. Анализ температурных зависимостей магнитных свойств поверхности $\text{FeNi}_3(110)$ важен для понимания физики поверхностного магнетизма. Значения длин спиновой релаксации, полученные для материалов с различным типом проводимости, могут быть использованы при разработке новых твердотельных источников [3] и детекторов [4] поляризованных электронов. Новая методика вторично-электронного эксперимента и прибор, созданный для её реализации, повысят эффективность экспериментов, что сократит время регистрации и сделает возможным исследование новых систем.

Целями работы являются:

1. Определение спиновой структуры поверхности $\text{FeNi}_3(110)$, а также нанесённых на неё тонких плёнок.
2. Разработка методики проведения эксперимента по вторично-электронной

спектроскопии с помощью многоканального детектора Мотта.

Были поставлены следующие **задачи**:

1. Измерить поляризацию вторичных электронов различных энергий, выходящих из $\text{FeNi}_3(110)$ в широком диапазоне температур. Систематизировать полученные результаты.
2. Провести расчёт магнитных свойств системы $\text{FeNi}_3(110)$ с применением теории функционала плотности.
3. Измерить длину спиновой релаксации в плёнках Pd и LiF на поверхности монокристалла $\text{FeNi}_3(110)$ для электронов средних энергий. Построить модель, описывающую зависимости поляризации от толщины плёнки.
4. Создать новый многоканальный детектор Мотта, провести испытания прибора. Разработать методику спин-поляризованного эксперимента с его использованием.

Научная новизна работы заключается в том, что:

1. Впервые систематически исследован и посредством численного анализа объяснён эффект антипараллельного магнитного упорядочения поверхности кристалла $\text{FeNi}_3(110)$ относительно его объёма вблизи температуры Кюри.
2. Впервые определены длины спиновой релаксации электронов средних энергий для диэлектрика LiF и металла Pd.
3. Создан новый прибор для детектирования поляризации потока электронов - многоканальный детектор Мотта. Разработана методика эксперимента с его использованием.

Практическое значение работы:

1. Эффект антипараллельного магнитного упорядочения поверхности $\text{FeNi}_3(110)$ относительно объёма вблизи температуры Кюри может

быть использован для создания логических элементов в новых приборах спинтроники.

2. Материалы с существенной длиной свободного пробега относительно спиновой релаксации (Pd и LiF) могут быть использованы в качестве покрытий при создании твердотельных детекторов поляризации [3] и источников поляризованных частиц [4].
3. Новый многоканальный детектор Мотта, благодаря своей эффективности, может быть использован в новых экспериментах по детектированию магнитных эффектов в двумерных системах и на интерфейсах спинтронных систем [5, 6].

Апробация результатов работы. Основные результаты данной работы представлены на конференции с международным участием "Неделя науки СПбПУ" (Санкт-Петербург, 2016, 2017, 2019), международной конференции "Emerging Trends in Applied and Computational Physics (ETACP) 2019" (Санкт-Петербург, 2019), международной конференции ECOSS-33 (Сегед, Венгрия, 2017), международной конференции ECOSS-34 (Орхус, Дания, 2018), международный симпозиум "НАНОФИЗИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА" (Нижний Новгород, 2020), на семинарах кафедры "Экспериментальная физика" СПбПУ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 работ, 6 из них в журналах, индексируемых в SCOPUS и/или входящих в список ВАК. Список приведён в конце работы.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Эффект антипараллельного магнитного упорядочения поверхностного слоя кристалла относительно его объёма зарегистрирован методом спин-поляризованной электронной спектроскопии. Поляризация вторичных электронов кристалла $\text{FeNi}_3(110)$ с энергией 35 и 50 эВ меняет знак вблизи температуры Кюри, тогда как для энергий 100 и 250 эВ перемены знака не происходит.
2. Возможность антипараллельного магнитного упорядочения поверхностного слоя $\text{FeNi}_3(110)$ в условиях наличия поверхностной сегрегации

подтверждена модельным расчётом с использованием теории функционала плотности.

3. Величины длин спиновой релаксации электронов средних энергий в тонких плёнках LiF в 8-10 раз превышают длины свободного пробега относительно неупругих соударений, а для Pd в 2.5–3 раза.
4. Методика проведения эксперимента по вторично-электронной спектроскопии с использованием многоканального классического детектора Мотта. Использование данного прибора позволило увеличить эффективность проведения эксперимента за счёт измерения спиновой поляризации потока электронов с сохранением информации о пространственной структуре его сечения.

Структура и объём диссертации

Полный объём диссертации составляет 118 страниц, включая 39 рисунков, 2 таблицы и список цитируемой литературы из 95 наименований.

Работа выполнена в лаборатории поверхностного и двумерного магнетизма кафедры физики физико-механического института, ФГАОУ ВО "СПбПУ".

Содержание работы

Во введении обоснованы актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, её научная и практическая значимость, приведены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации носит обзорный характер.

Первый параграф посвящён описанию методов вторично-электронной спектроскопии.

Во втором параграфе вводятся основные понятия, связанные со спин-поляризованными электронами. Рассматриваются механизмы, обуславливающие спиновую зависимость процессов рассеяния электронов твёрдым телом: спин-орбитальное и обменное взаимодействие. Обсуждаются основные принципы работы классического анализатора спиновой поляризации потока электронов – детектора Мотта.

Третий параграф посвящён описанию экспериментальной установки на основе сверхвысоковакуумного шасси УСУ-4, использованной для проведения электронной спектроскопии с разрешением по спину.

В четвертом параграфе описаны использованные в данной работе экспериментальные методики и режимы работы установки.

В пятом параграфе изложены основы теории функционала плотности. Описан формализм Кона-Шема и продемонстрирован вывод одноименных уравнений. Показано, как из полученных уравнений построить алгоритмы для численного анализа свойств многоэлектронных систем.

В шестом параграфе приведены примеры использования методов теории функционала плотности для описания свойств кристаллических систем. На этих методах основано описание магнитных свойств поверхностей $\text{FeNi}_3(110)$ в условиях поверхностной сегрегации.

Вторая глава посвящена исследованию магнитных свойств поверхности монокристалла $\text{FeNi}_3(110)$ в широком диапазоне температур. Во вступлении к главе дополнительно обосновывается актуальность данного исследования.

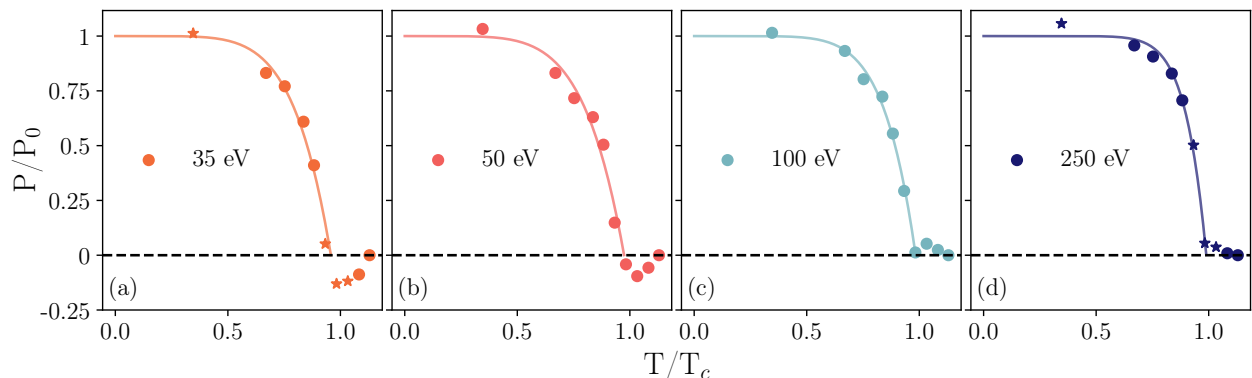


Рис. 1: Зависимость поляризации вторичных электронов с энергией (а) - 35 эВ, (б) - 50 эВ, (с) - 100 эВ, (д) - 250 эВ от температуры образца. Значение $T/T_c = 1$ соответствует температуре Кюри. Точками представлены экспериментальные значения. Сплошная линия представляет собой аппроксимацию по описанному ниже закону.

В первом параграфе описываются результаты магнитных измерений. В них входило получение петель гистерезиса поляризации вторичных электронов разных энергий при изменении температуры образца от 300 К до 950 К. Зависимости амплитуды петель от температуры для электронов с энергиями 35, 50, 100 и 250 эВ представлены на рисунке 1.

Известно, что температурная зависимость намагниченности насыщения M_s описывается законом Блоха: $M_s = M_0 (1 - T/T_c)^\beta$, где M_0 - намагниченность насыщения при $T = 0$ К, T_c - температура Кюри, β - критический параметр. В статье Зигмана [7] утверждается, что поляризация идущих из образца вторичных электронов пропорциональна его намагниченности. Из этого следует, что закон, описывающий поведение максимальной поляризации вторичных электронов образца, носит такой же характер зависимости от температуры поверхности ферромагнетика: $P(T) = P(0) (1 - T/T_c)^\beta$.

Можно заметить, что при приближении к температуре Кюри поляризация для электронов с энергиями 35 и 50 эВ меняет знак. Однако для электронов с энергиями 100 и 250 эВ данного эффекта не наблюдается.

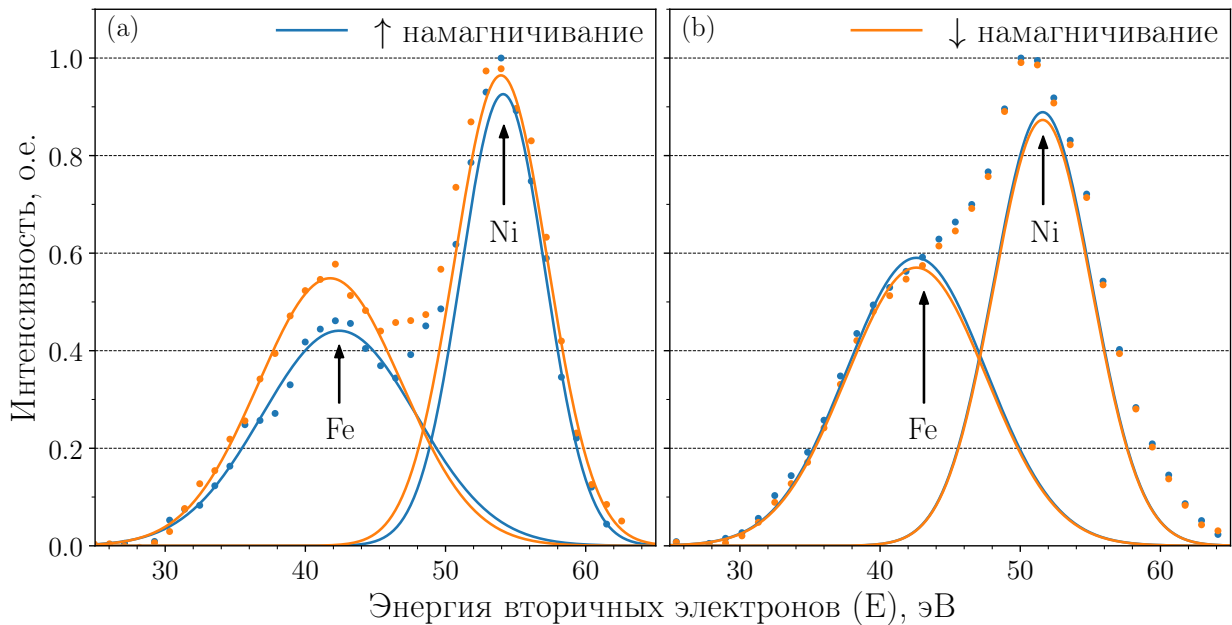


Рис. 2: Спин-разрешённые оже-спектры поверхности $\text{FeNi}_3(110)$ при различной температуре. (a) - $T/T_c = 0.35$ соответствует 300К, (b) - $T/T_c = 0.98$ соответствует 846К. Точки представляют собой экспериментальный результат после вычитания полиномиального фона. Следует отметить, что в данном случае интенсивность пропорциональна количеству электронов, а не производной, как в классической оже-спектроскопии. Сплошные линии - аппроксимации функцией Гаусса. На рисунке представлены оже-пики Fe $M_3M_{45}M_{45}$ ($3p3d3d$) и Ni $M_3M_{23}M_{23}$ ($3p3d3d$).

Анализ спин-разрешённых оже-спектров подтверждает гипотезу о наличии антипараллельного упорядочения поверхности образца относительно объёма (рисунок 2).

Из анализа спектров можно заключить, что при температуре, близкой

к температуре Кюри, поляризация пиков железа и никеля имеет обратный знак относительно поляризации, наблюдаемой при комнатной температуре. Также стоит отметить, что амплитуда пика железа увеличилась с увеличением температуры, что свидетельствует о наличии поверхностной сегрегации.

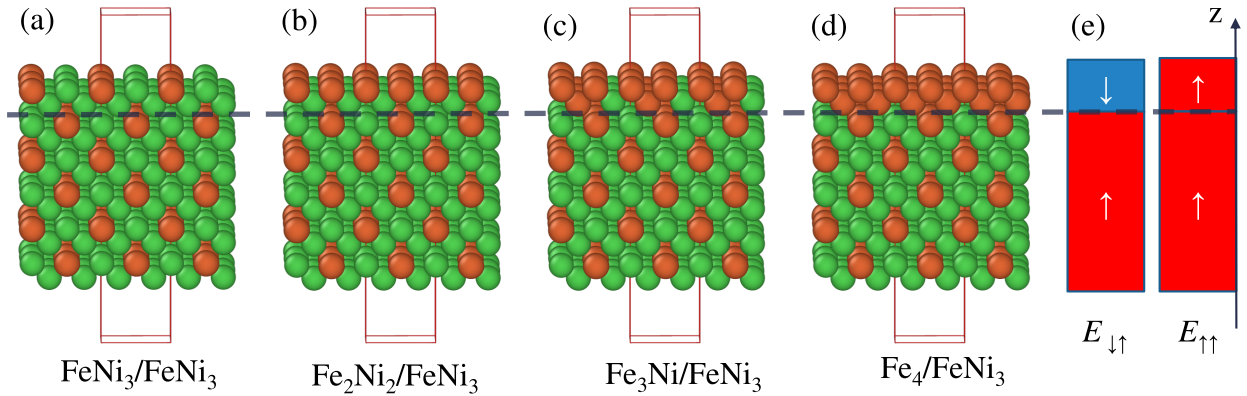


Рис. 3: Изображение начального состояния исследуемых структур и схематическое изображение направлений магнитных моментов. Подписи под рисунками показывают химический состав поверхности: (a) чистый FeNi₃(110), (b) плёнка Fe₂Ni₂ на поверхности FeNi₃(110), (c) плёнка Fe₃Ni на поверхности FeNi₃(110), (d) чистая плёнка железа Fe₄ на поверхности FeNi₃(110). Красный параллелепипед показывает границы супер-ячейки. (e) схематическое изображение двух ситуаций описанных выше, белыми стрелками показано направление магнитных моментов плёнки и подложки. $E_{\downarrow\uparrow}$ - соответствует энергии системы при антипараллельном магнитном упорядочении поверхности относительно объёма, $E_{\uparrow\uparrow}$ - энергии для параллельного упорядочения. z - ось вдоль которой направлены магнитные моменты в системе.

Во втором параграфе описан механизм расчётов с использованием теории функционала плотности, используемых для объяснения полученных результатов. Исследование модельных систем дает ответ о механизмах появления эффекта антипараллельного упорядочения поверхности относительно объёма и его связи с поверхностной сегрегацией.

В качестве модельной системы была выбрана ячейка, состоящая из 6 слоёв FeNi₃, разделённых вакуумным зазором 10 Å. Ориентация атомов была выбрана соответствующей поверхности (110). Были рассмотрены системы с различной концентрацией железа на поверхности. Чистый FeNi₃ (рисунок 3 (a)) и системы, где от 1 до 3 атомов никеля были заменены на атомы железа (рисунок 3 (b) – (d) соответственно). Для каждой системы были вычислены энергии, отвечающие параллельному ($E_{\uparrow\uparrow}$) и ан-

типараллельному ($E_{\uparrow\downarrow}$) упорядочению поверхности относительно объёма (рисунок 3 (e)).

Из анализа результатов расчётов следует, что антипараллельное упорядочение поверхности относительно объёма нестабильно в случае чистого FeNi_3 . В процессе оптимизации система с изначальным антипараллельным направлением магнитных моментов переходит в систему с параллельно направленными моментами. В то же время при увеличении концентрации железа состояния с антипараллельным упорядочением становятся стабильными. При этом энергетический зазор ($E_{\uparrow\uparrow} - E_{\uparrow\downarrow}$) между состояниями с разным упорядочением оказывается меньше энергии теплового движения при температурах близких к температурам Кюри, что свидетельствует о возможности существования суперпозиции антипараллельно и параллельно упорядоченных областей на поверхности.

Третья глава посвящена измерению длин спиновой релаксации в материалах с различным типом проводимости: диэлектрике LiF и металле Pd .

Во вступлении к главе обосновывается актуальность и практическая важность подобных измерений.

Первый параграф носит обзорный характер, в нём описаны различные механизмы спиновой релаксации, мотивирован выбор материалов LiF и Pd в качестве предметов исследования.

Во втором параграфе предлагается методика проведения измерений, позволяющая экспериментально зафиксировать длину спиновой релаксации электронов средних энергий.

В третьем параграфе описывается *in-situ* рост тонких плёнок. Изложен процесс калибровки скорости напыления, проанализированы калибровочные зависимости, сделаны выводы о скорости роста и о качестве получаемых покрытий.

В четвертом параграфе описан эксперимент по определению длин спиновой релаксации. Для этого пленки калиброванной толщины наносились на поверхность ферромагнитного монокристалла. Для определения поляризации снимались петли гистерезиса поляризации вторичных электронов. Размах петли гистерезиса позволяет определить степень поляризации по-

тока электронов определённой энергии, вышедших из материала. Напыляя на поверхность пленки разной толщины и наблюдая за изменением поляризации, можно определить параметры изучаемого материала. Примеры зависимостей поляризации вторичных электронов для плёнки Pd представлены на рисунке 4 (слева), а для пленок LiF на рисунке 4 (справа).

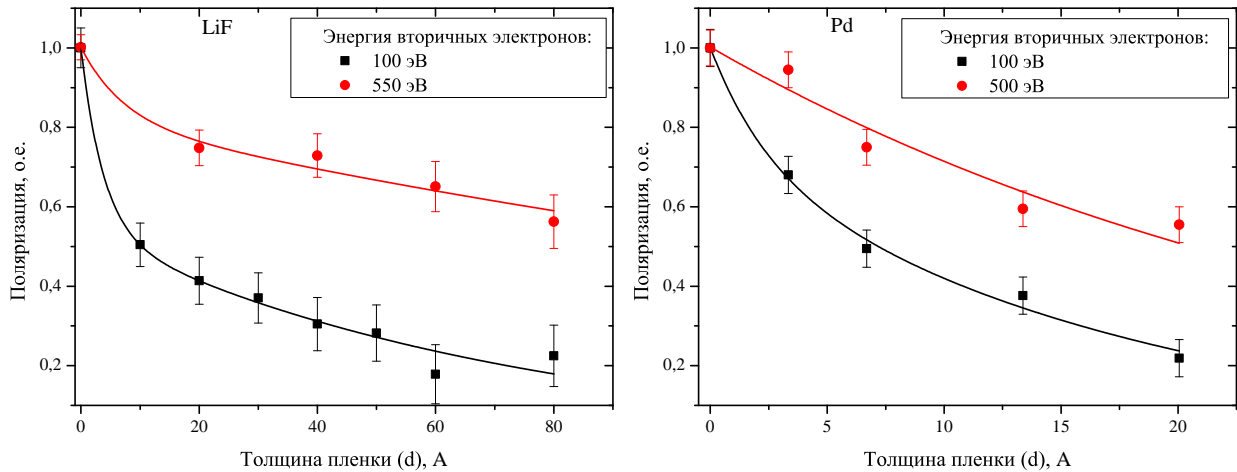


Рис. 4: Зависимости поляризации потока вторичных электронов для различных толщин плёнки LiF (слева) для энергий вторичных электронов 100 и 550 эВ, для плёнок Pd (справа) для энергий электронов 100 и 500 эВ. Точками представлены экспериментальные результаты. Сплошная линия показывает аппроксимацию по формуле 1.

Анализ экспериментальных результатов показывает, что характер зависимостей поляризации от толщины пленки для LiF и Pd различен. Для фторида лития зависимость носит двухступенчатый характер (резкий провал вначале, потом плавное убывание). В случае же с пленкой Pd зависимость не меняет своего характера. Отличия можно объяснить различными свойствами интерфейса пленка/подложка, а также различными эмиссионными свойствами материалов [8].

В пятом параграфе построена кинетическая модель, которая описывает выход потока электронов из поляризованной ферромагнитной подложки в вакуум через исследуемую пленку. Поляризация системы с учетом модельных приближений может быть представлена как:

$$P = A \exp\left(-\frac{x}{\lambda}\right) \exp\left(-\frac{x}{d_1}\right) + B \exp\left(-\frac{x}{d_2}\right), \quad (1)$$

где λ - длина свободного пробега относительно неупругих соударений, d_1 - длина спиновой релаксации в области интерфейса, d_2 - длина спиновой релаксации в области плёнки.

Данная модель делает возможным разделение вкладов процессов спиновой релаксации на интерфейсе плёнка/подложка и потерь поляризации в материале плёнки. Используя уравнение 1 получили значения длин спиновой релаксации для случая Pd и LiF. Основным параметром, характеризующим скорость спиновой релаксации в материале, является d_2 . Из сравнения d_2 с λ следует, что длина спиновой релаксации превосходит длину свободного пробега для LiF в 8 – 10 раз, для Pd в 2.5 – 3 раза. Разница в длинах спиновой релаксации для металла и диэлектрика позволяет говорить о важной роли процессов электрон-электронного взаимодействия и спин-орбитального взаимодействия в процессах спиновой релаксации.

Четвертая глава посвящена многоканальному детектору Мотта. В главе приводится как описание разработки нового прибора, так и создание методики его использования.

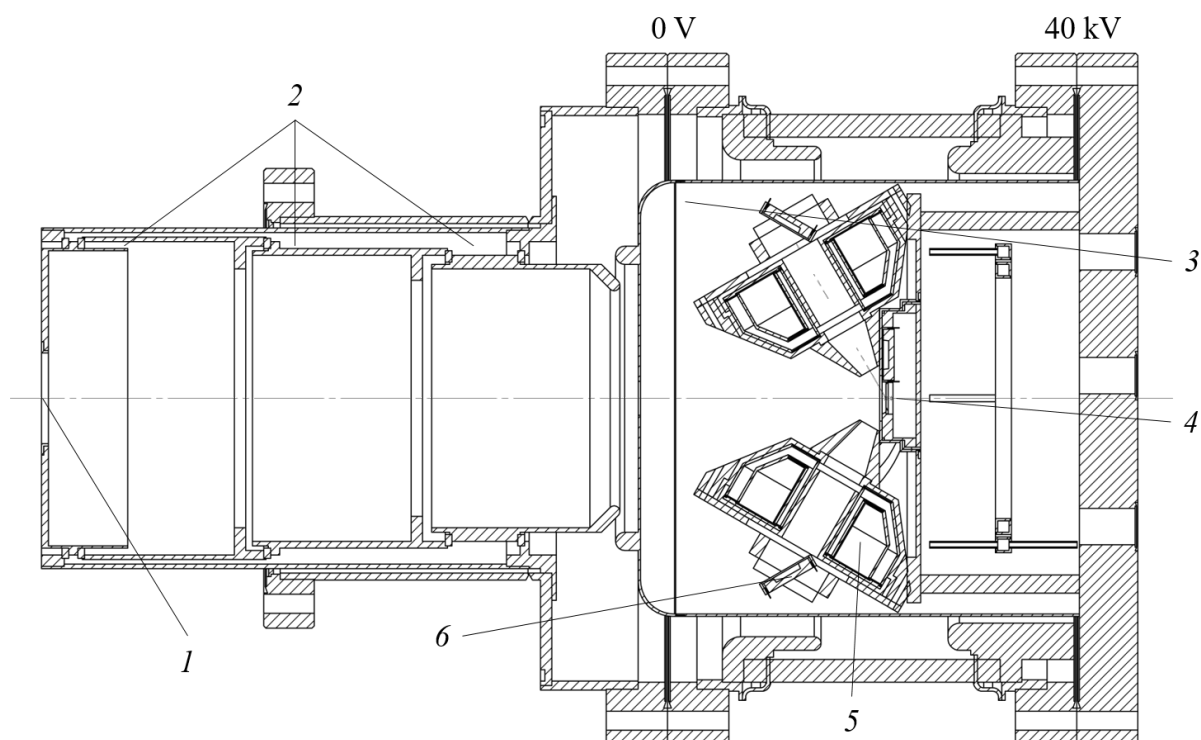


Рис. 5: Чертёж многоканального детектора Мотта. Стрелками указаны основные компоненты прибора, 1 – входная апертура, 2 – фокусирующая электростатическая линза, 3 – электростатический экран, 4 – золотая фольга, 5 – магнитная линза, 6 – ПЗС-матрица. Метки "0 V" и "40 kV" показывают значения потенциалов, приложенных к соответствующим частям прибора.

Во вступлении мотивируется важность создания многоканального детектора спиновой поляризации, прибора в котором возможности спинового

анализа сочетались бы с пространственной чувствительностью детекторов электронов.

В первом параграфе описываются основная идея и процесс создания детектора Мотта. На рисунке 5 представлен эскиз прибора. Детектор был спроектирован с учетом необходимости монтажа сразу за выходной апертурой полусферического энергоанализатора SPECS RHOIBOS-150. Прошедшие через энергоанализатор электроны попадают во входную апертуру детектора Мотта. Далее поток электронов проходит через 4-секционную электростатическую линзу, которая выполняет его фокусировку. После прохождения линзы электроны ускоряются потенциалом 40 кВ и попадают в дрейфовое пространство внутри детектора Мотта. Затем ускоренный поток электронов попадает на золотую фольгу, после рассеяния на которой электроны попадают в магнитные линзы. Последние фокусируют электронный поток на ПЗС-матрицы, с помощью которых осуществляется детектирование. При этом на матрицах возникает изображение потока электронов, разделённого полусферическим анализатором по энергии и углу.

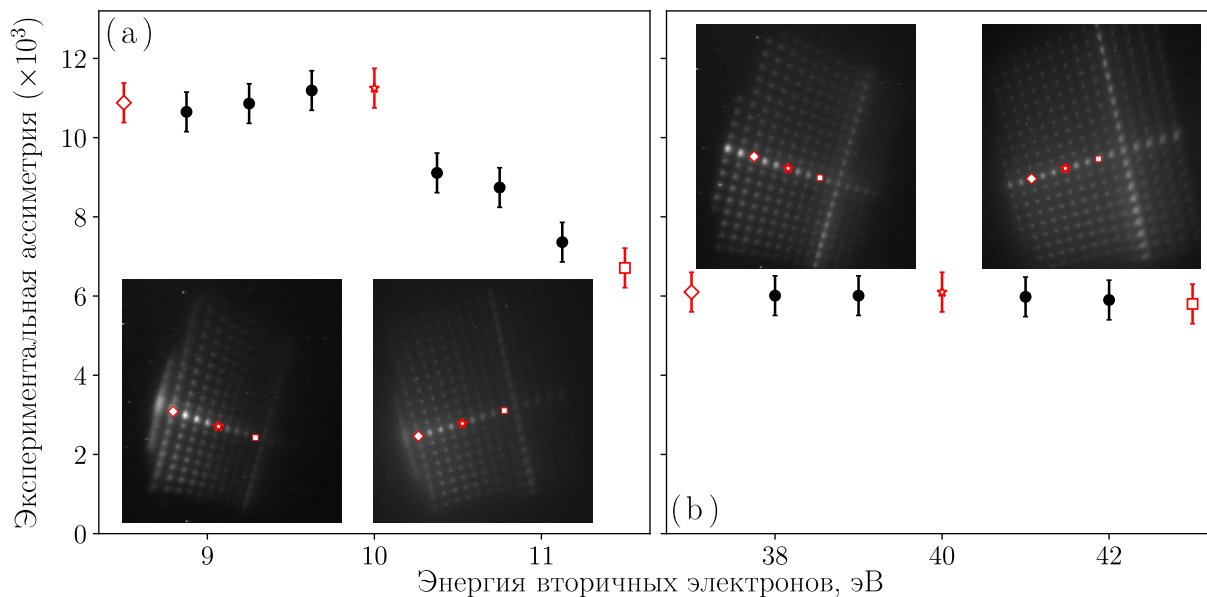


Рис. 6: Зависимость асимметрии от энергии электронов, идущих от намагниченного FeV образца, измеренная с помощью детектора Мотта. На вставке показаны изображения с двух ПЗС матриц. Пустыми символами показаны области изображения, сигнал с которых использовался для расчёта асимметрии, отмеченной такими же символами на графике. (a) зависимость для электронов с центральной энергией 10 эВ. (b) зависимость для электронов с центральной энергией 40 эВ.

Во втором параграфе описаны испытания и калибровка созданного прибора. Для этого внутрь энергоанализатора был вставлен шаблон – прямоугольный массив отверстий разного размера. Чёткое изображение шаблона на матрицах свидетельствует об отсутствии проблем с фокусировкой.

Последним произведённым испытанием данной системы было измерение асимметрии рассеяния электронов, эмитированных из намагниченного образца. В качестве источника вторичных электронов использовался аморфный образец бориды железа (FeB). Данное вещество, будучи магнитным мягким материалом с прямой петлёй гистерезиса, обладает стабильным поверхностным магнетизмом, что делает его удобным для испытаний.

Рисунок 6 демонстрирует полученную прибором зависимость асимметрии от энергии эмитированных из образца электронов для двух диапазонов энергий. При прохождении через энергоанализатор с шаблоном поток электронов преобразуется в изображение массива точек, электроны в каждой из которых обладают близкими энергиями и углами эмиссии. Это свойство использовалось для определения зависимости асимметрии потока электронов от энергии. Зависимость состоит из двух частей: низкоэнергетической части, связанной с возбуждением электронов проводимости, и части с энергиями, примерно соответствующими максимуму коэффициента эмиссии истинно-вторичных электронов. Следует отметить, что зависимость асимметрии от энергии в данном случае была получена для нескольких значений энергий одновременно.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы, полученные в диссертации:

1. Из анализа петель гистерезиса поляризации вторичных электронов и спин-разрешённых оже-спектров установлено, что для вторичных электронов FeNi₃(110) энергий 35 и 50 эВ поляризация меняет знак вблизи температуры Кюри. Для электронов более высоких энергий (100 и 250 эВ) данный эффект не наблюдается.
2. Модельный расчёт с применением теории функционала плотности подтвердил возможность антипараллельного магнитного упорядочения поверхностного слоя при наличии поверхностной сегрегации FeNi₃(110).

3. Определены значения длин спиновой релаксации при комнатной температуре для Pd и LiF для электронов средних энергий.
4. Предложена кинетическая модель, описывающая зависимость поляризации вторичных электронов от толщины плёнки наносимого материала. Для LiF – длина спиновой релаксации оказалась в 8-10 раз больше длины свободного пробега, а для Pd в 2.5-3 раза.
5. Разработана методика проведения эксперимента по вторично-электронной спектроскопии с использованием многоканального детектора Мотта. Продемонстрирована высокая эффективность прибора, построенного с использованием данной методики.

Список опубликованных по теме диссертации статей

Публикации в рецензируемых изданиях, удовлетворяющих требованиям ВАК:

1. Pavlov A. et al. Crystal polarity discrimination in GaN nanowires on graphene //Journal of Materials Chemistry C. – 2021. – Т. 9. – №. 31. – С. 9997-10004.
2. Pavlov A. et al. DFT analysis of crystal polarity on graphene surface //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Т. 2015. – №. 1.
3. Kneschaurek E. V., Pavlov A.V, Rjabow R.W., Ustinov A.B. Device for wideband ratio pyrometry //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – Т. 1236. – №. 1.
4. Pavlov A., Ustinov A., Petrov V. Spin relaxation length for medium energy electrons in Pd and LiF ultrathin films //Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena. – 2018. – Т. 223. С. 62-66.
5. Pavlov A. V., Ustinov A. B., Petrov V. N. Spin relaxation length for medium-energy electrons in palladium thin films //Journal of Physics. Conference Series. – 2016. – Т. 769., №. 85.

6. Петров В.Н., Габдуллин П.Г., Павлов А.В., Устинов А.Б., Строков В.Н., Дил Ж.Х. Проекционный классический детектор Мотта // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2021. Т. 14. № 3. С. 112–121.

Цитируемая литература:

- [1] Žutić Igor, Fabian Jaroslav, Sarma S Das. Spintronics: Fundamentals and applications // Reviews of modern physics. — 2004. — Vol. 76, no. 2. — P. 323.
- [2] Xu Yongbing, Awschalom David, Nitta Junsaku. Handbook of spintronics. — Springer Netherlands, 2016.
- [3] Optical detection of spin-filter effect for electron spin polarimetry / Li X, Tereshchenko OE, Majee S, Lampel G, Lassailly Y, Paget D, and Peretti J // Applied Physics Letters. — 2014. — Vol. 105, no. 5. — P. 052402.
- [4] Spin polarized low-energy positron source / Petrov VN, Samarin SN, Sudarshan K, Pravica Luka, Guagliardo Paul, and Williams JF // Journal of Physics: Conference Series. — 2015. — Vol. 618, no. 1. — P. 012043.
- [5] Strocov Vladimir N, Petrov Vladimir N et al. Concept of a multichannel spin-resolving electron analyzer based on Mott scattering // Journal of synchrotron radiation. — 2015. — Vol. 22, no. 3. — P. 708–716.
- [6] Cancellieri Claudia, Strocov Vladimir N. Spectroscopy of Complex Oxide Interfaces. — Springer, 2018.
- [7] Siegmann HC. Surface and 2D magnetism // Journal of Physics: Condensed Matter. — 1992. — Vol. 4, no. 44. — P. 8395.
- [8] Jensen Kevin L. Introduction to the physics of electron emission. — John Wiley & Sons, 2017.