

Министерство образования и науки Российской Федерации
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Кафедра физики ИФНиТ

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
АСПИРАНТА**

Оже-электронная спектроскопия спиновых состояний
поверхности

Направление подготовки 03.06.01 Физика и астрономия
Направленность 03.06.01_05 Физика конденсированного состояния

Выполнил
аспирант кафедры физики

Павлов Александр Валерьевич

Научный руководитель
профессор, д.ф.-м.н.

Петров Владимир Никифорович

Санкт-Петербург
2020

Научно-квалификационная работа выполнена на кафедре физики
Института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций федерального
государственного автономного образовательного учреждения высшего
образования
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Заведующий кафедрой: Апушкинский Евгений Геннадьевич
профессор, д.ф.-м.н.

Научный руководитель: Петров Владимир Никифорович
профессор, д.ф.-м.н.

Рецензент: Полозков Роман Григорьевич
к.ф.-м.н. доцент физико-технического факультета, Университет ИТМО.

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и
на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>

Общая характеристика работы

Актуальность работы.

В основе процесса развития современной микроэлектроники лежит постоянное уменьшение размеров электронных схем. Характерный размер транзистора в микроэлектронике принято называть техпроцессом. В настоящее время, данный параметр вплотную приближается к фундаментальному пределу, который связан с появлением квантовых эффектов. Дальнейшее увеличение производительности логических микросхем и увеличение ёмкости устройств хранения информации требует применения устройств, работающих на других физических принципах.

Одним из таких направлений является бурно развивающаяся область спиновой электроники или спинтроники. Спинтроника, в отличие от классической электроники, оперирующей зарядами, предлагает использовать для передачи сигналов магнитный момент электрона [1]. Спинтроника является перспективной и активно развивающейся областью физики твёрдого тела. В настоящее время ведётся поиск новых спинтронных эффектов и материалов [2].

Оже-электронная спектроскопия с разрешением по спину является мощным и надёжным инструментом, делающим возможным отдельно изучать магнитные свойства каждой из подсистем сложной магнитной системы. Так как глубина выхода оже-электронов редко превышает несколько, данный вид спектроскопии является методом для изучения поверхностного и двумерного магнетизма.

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования спиновых состояний поверхности кристалла и тонких плёнок на его поверхности. Полученные наработки могут быть использованы при разработке новых спинтронных устройств или новых методов детектирования спиновой поляризации.

Цель работы: Определение спиновой структуры поверхности FeNi_3 , а так же нанесённых на неё тонких плёнок. Создание и испытание компонентов нового детектора поляризации электронов, многоканального детектора Мотта.

Были поставлены следующие **задачи**:

1. Откалибровать скорости роста плёнок Pd и LiF на поверхности монокристалла FeNi₃.
2. Измерить длину спиновой релаксации для электронов разных энергий.
3. Построить модель описывающую зависимости поляризации от толщины плёнки.
4. Произвести исследование магнитных свойств поверхности FeNi₃ вблизи температуры Кюри для различных энергий вторичных электронов.
5. Проанализировать зависимости поляризации от температуры для электронов разных энергий, предложить модель объясняющую полученные результаты.
6. Создать оборудование и провести испытания нового многоканального детектора Мотта, созданного в группе поверхностного магнетизма.

Научная новизна работы заключается в том, что:

1. Определены длины спиновой релаксации в материалах с различными свойствами проводимости, диэлектрик LiF и металл Pd.
2. Получен и проанализирован эффект антиферромагнитного упорядочения поверхности FeNi₃ относительно объёма, с рассмотрением распределения электронов по глубине выхода.
3. Разработано и создано оборудование для нового прибора для детектирования поляризации потока электронов, многоканального детектора Мотта.

Практическое значение работы:

1. Материалы с большой длиной свободного пробега Pd и LiF могут быть использованы в качестве покрытий при создании твердотельных детекторов поляризации [3] и источников поляризованных частиц [4].

2. Эффект антиферромагнитного упорядочения поверхности FeNi_3 относительно объёма вблизи температуры Кюри может быть использован для создания логических элементов в новых приборах спинтроники.
3. Новый многоканальный детектор Мотта, благодаря своей эффективности, может быть использован в новых экспериментах по детектированию спиновых эффектов двумерных систем на поверхности [5] и в интерфейсе спинтронных систем [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), на семинарах кафедры экспериментальной физики СПбПУ.

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 8 работ, 3 из них в журналах из списка ВАК. Список приведён в конце работы.

Основные положения:

1. Значения длин спиновой релаксации электронов с энергией 100 - 500 эВ при комнатной температуре для Pd оказались в пределах от 18 до 27 Å .
2. Значения длин спиновой релаксации электронов с энергией 35 - 550 эВ при комнатной температуре для LiF оказались в пределах от 18 до 27 Å .
3. Из анализа петель гистерезиса поляризации для вторичных электронов разных энергий и результатов спин-поляризованной Оже-спектроскопии было установлено, что поверхность FeNi_3 (110) антиферромагнитно упорядочивается относительно объёма.
4. Оборудование для нового многоканального детектора Мотта, обладающего высокой эффективностью.

Содержание

1	Введение	7
1.1	Экспериментальная установка	7
2	Экспериментальное измерение длин спиновых релаксаций	11
3	Температурные эффекты на поверхности кристалла $\text{FeNi}_3(110)$	17
4	Разработка и создание оборудования для испытания многоканального детектора Мотта	19
5	Заключение	23

1 Введение

Спинтроника — бурно развивающаяся область современной физики твердого тела [1, 2]. Эта область физики исследует способы контроля транспорта электронов — частиц, обладающих электрическим зарядом, но и спином, собственным магнитным моментом. Спин частиц является дополнительной степенью свободы, которая может быть использована для значительного повышения рабочих частот логических компонентов. Первым важным открытием спинтроники, который получил широкое распространение, является эффект гигантского магнетосопротивления [7, 8]. За открытие данного эффекта и Ферт и Грюнберг были удостоены Нобелевской премии по физике в 2007 году, а его влияние на развитие средств хранения информации сложно переоценить. Жёсткие диски, в основе работы которых лежал данный эффект, значительно превзошли своих предшественников по плотности записи, что позволило значительно снизить стоимость хранения информации. Дальнейшее развитие области требует исследования эффектов, опирающихся на спиновую степень свободы частиц, и создание новых материалов. В данной работе представлен обзор результатов экспериментального измерения магнитных свойств поверхности методом электронной оже-спектроскопии с разрешением по спину. Приведён обзор процесса разработки и испытания нового типа детекторов спиновой поляризации — многоканального детектора Мотта.

1.1 Экспериментальная установка

В экспериментах была использована установка на основе универсальной сверхвысоковакуумной системы УСУ-4. Установка состоит из двух камер, расположенных друг над другом. В нижней камере располагается вспомогательное экспериментальное оборудование, насосы, вакууметр, системы напуска газов. В верхней камере располагается основное экспериментальное оборудование (см. рисунок 1). Манипулятор, который позволяет перемещать образец в трёх направлениях, а также поворачивать его вокруг вертикальной оси. Держатель образца включает в себя катушку намагничивания и узел нагревателя. Намагничивание образца осуществлялось пу-

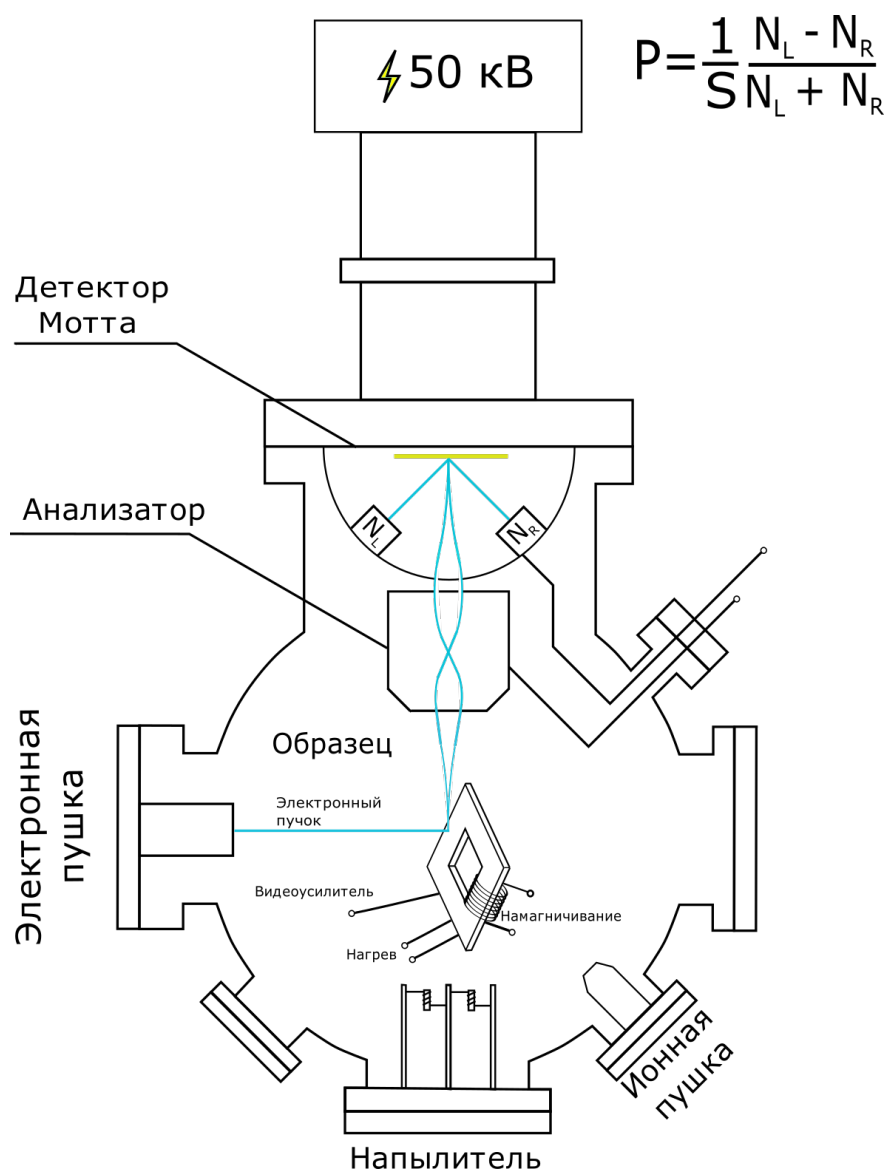


Рис. 1: Схема расположения экспериментального оборудования в верхней камере установки УСУ-4.

тём пропускания электрического тока через катушку намагничивания. Во время проведения экспериментов управление током намагничивания производилось компьютером с использованием самостоятельно разработанных программ. Источником первичных электронов является электронная пушка с возможностью изменения энергии пучка электронов E_p от 300 до 1500 эВ и током эмиссии до I_e до 10 мкА. Электронная пушка связана с блоком управления, позволяющим регулировать энергию пучка, его интенсивность, осуществлять отклонение пучка и его фокусировку.

Вторичные электроны, идущие из образца, детектировались с помощью спектрометра, разработанного в нашей научной группе. Комплекс

состоит из двупролётного энергоанализатора типа цилиндрическое зеркало [9] и анализатора спиновой поляризации электронов (детектора Мотта) [10, 11]. Управление работой энергоанализатора и сбор данных эксперимента осуществлялись компьютером по специально разработанным программам. При исследовании поляризации электронного пучка в детекторе Мотта измеряется лево-правая асимметрия рассеяния A . Для измерения одной проекции спина необходимо регистрировать рассеянные электроны двумя детекторами, расположенными симметрично относительно оси пучка. При записи энергетических спектров регистрировались зависимости количества электронов в двух каналах от энергии вторичных электронов. Для проведения измерений образец был установлен таким образом, чтобы плоскость образца составляла угол 45° с направлением первичного пучка электронов. Для нахождения оптимального положения образца относительно анализатора рассматривался пик упруго отраженных электронов. В точке, соответствующей оптимальному положению образца, интенсивность пика была максимальна, а его ширина - минимальна (т. е. при таком положении достигалось наилучшее разрешение по энергии).

После настройки положения образца проводилась процедура его очистки. Очистка представляла собой серию последовательных отжигов и ионных травлений в атмосфере аргона. Количество отжигов и травлений зависело от степени загрязненности образца. Контроль качества очистки осуществлялся путем записи оже-спектров и анализа их на предмет наличия пиков характерных загрязнителей. Показателем атомно-чистой поверхности является отсутствие пиков типичных загрязнителей, таких как C(271 эВ), O(503 эВ), S(152 эВ), наличие хорошо различимых пиков Fe (47, 86 эВ) и Ni (61, 102 эВ), а также то, что пики Fe(47 эВ) и Ni(61 эВ), с учётом факторов элементной чувствительности, соотносятся по амплитуде как 1 к 3, что соответствует стехиометрии кристалла. В эксперименте возможно измерение одной проекции поляризации, параллельной направлению намагниченности образца. В эксперименте производилось намагничивание образца, и направление намагниченности выбиралось с учетом направления вектора поляризации, перпендикулярного плоскости, в которой располагались два рабочих детектора. В этом случае детекторами регистрировалась макси-

мально возможная асимметрия рассеяния. В ходе измерений в каждом из каналов записывалась зависимость числа электронов от их энергии. Значения энергетического диапазона, шага по энергии, времени записи спектра вводились в программу, управляющую экспериментом. Энергетический диапазон определялся энергией исследуемого Оже-пика. Шаг по энергии во всех экспериментах составлял 1 эВ и был выбран исходя из среднего энергетического разрешения анализатора.

Асимметрия рассеяния, которая измеряется с помощью детектора Мотта, складывается из так называемой «истинной» асимметрии, пропорциональной поляризации пучка, и «ложной» асимметрии, которая вызвана небольшими отклонениями условий проведения любого эксперимента от идеальных и не связана с поляризацией пучка и намагниченностью образца. Поэтому при обработке экспериментальных данных требовалось каким-либо образом исключить «ложную» асимметрию. При проведении измерений образец намагничивался, и величина поляризации, а, следовательно, и «истинной» асимметрии, была пропорциональна намагниченности образца. После изменения направления намагниченности величины поляризации и «истинной» асимметрии также меняли свой знак. При этом «ложная» асимметрия в обоих случаях оставалась неизменной. В дальнейшем, при совместной обработке данных для двух противоположных направлений намагниченности образца «ложная» асимметрия исключалась. Следовательно, при проведении измерений всегда снимались данные для двух направлений намагниченности.

С использованием этого спектрометра так же возможно снятие петель гистерезиса поляризации вторичных электронов, идущих из ферромагнитного образца. Для этого вокруг одной из граней образца была намотана катушка намагничивания, через которую пропускался ток. При снятии петли гистерезиса энергия электронов, которую пропускал анализатор, фиксировалась, а ток, проходящий через спираль намагничивания, менялся с заданным шагом. При этом в детекторе Мотта измерялось изменение поляризации пучка, что соответствовало перемагничиванию ферромагнетика. В целом установка позволяет производить снятие интенсивности и поляризации вторичных электронов в зависимости от энергии. Таким образом

установка может собирать данные в следующих режимах:

1. Режим записи спектра вторичных электронов, в этом режиме записывается количество вторичных электронов при изменении энергии пропускания анализатора. $N(E)$
2. Режим записи спектра вторичных электронов с разрешением по спину, в этом режиме снимается зависимость разности счёта в двух каналах детектора Мотта при изменении энергии анализатора и периодическом намагничивании образца. $P(E)$
3. Режим снятия петли гистерезиса, в этом режиме энергия анализатора фиксируется и происходит измерение асимметрии в каналах детектора Мотта, в зависимости от тока в катушке намагничивания. $P(I)$

2 Экспериментальное измерение длин спиновых релаксаций

Для создания твердотельных детекторов спиновой поляризации [3] и источников поляризованных частиц [4] требуется знать длины спиновой релаксации различных веществ. Длина спиновой релаксации - длина, на которой поляризация потока электронов уменьшается в e раз. Длина спиновой релаксации зависит от электронной структуры вещества, в котором распространяются электроны, и их энергии [12]. Возможным способом измерения длин спиновой релаксации для электронов средних энергий является электронная спектроскопия с разрешением по спину.

При использовании электронной спектроскопии предполагается следующая процедура: пучок первичных электронов облучает ферромагнитный кристалл, в этом случае поток вторичных электронов оказывается поляризованным в соответствии с намагниченностью образца [12]. После этого на поверхность напыляется плёнка исследуемого вещества и измеряется поляризация вторичных электронов. В итоге получается зависимость поляризации вторичных электронов от толщины плёнки. В результате обработки становится возможным извлечь длину спиновой релаксации.

Для приготовления тонких пленок исследуемого материала использовался метод термического распыления в условиях сверхвысокого вакуума. Термическое распыление производилось из нагретого керамического тигля. Нагрев производился с помощью вольфрамовой спирали, намотанной вокруг тигля. Стабильность температуры обеспечивалась постоянством тока в спирали и массивными держателями, которые эффективно отбирали тепло от тигля. Для калибровки скорости напыления использовалась следующая процедура: ток в нагревателе фиксировался, и на чистую поверхность производилось осаждение пленок равными интервалами времени. Измерение амплитуд оже-пиков пленки и подложки после каждого этапа напыления позволяло получить зависимости тока напыления от времени напыления. Пример зависимостей оже-пиков от времени напыления представлена на рисунке 2 (сверху) для плёнки Pd и рисунке 2 (снизу) для плёнки LiF.

В случае послойного роста, для пика подложки эта зависимость будет представлять собой функцию следующего вида: $I = I_0 \exp(-t/t_0)$, где I – интенсивность после t минут напыления, I_0 – интенсивность пика при нулевой толщине плёнки, t_0 время спада интенсивности в e раз. Времени t_0 можно поставить в соответствие величину λ – длину свободного пробега. Таким образом времени напыления можно поставить в соответствие толщину плёнки на поверхности образца. Так же для контроля однородности снимлась зависимость амплитуды пиков F(43 эВ) и Pd (330 эВ) от времени напыления. В их случае зависимость должна носить следующий вид: $I = I_0(1 - \exp(-t/t_0))$. Большой разброс экспериментальных точек F(43 эВ) по сравнению с зависимостью для никеля можно объяснить неравномерностью роста пленки на поверхности (образованию кристаллитов различного размера). Подобное поведение тонких пленок исследовалось, например, Кэмбеллом [13]. Однако скорости спада для обоих экспонент схожи, что позволяет в целом делать вывод о послойном её росте. Неоднородность полученной плёнки можно связать с особенностями роста диэлектрических пленок на поверхности металла, а также с рассогласованием постоянных решетки 10%. Следует отметить, что данный эффект не наблюдается для плёнок Pd, где убывающая и растущая экспоненты обладают схожими показателями.

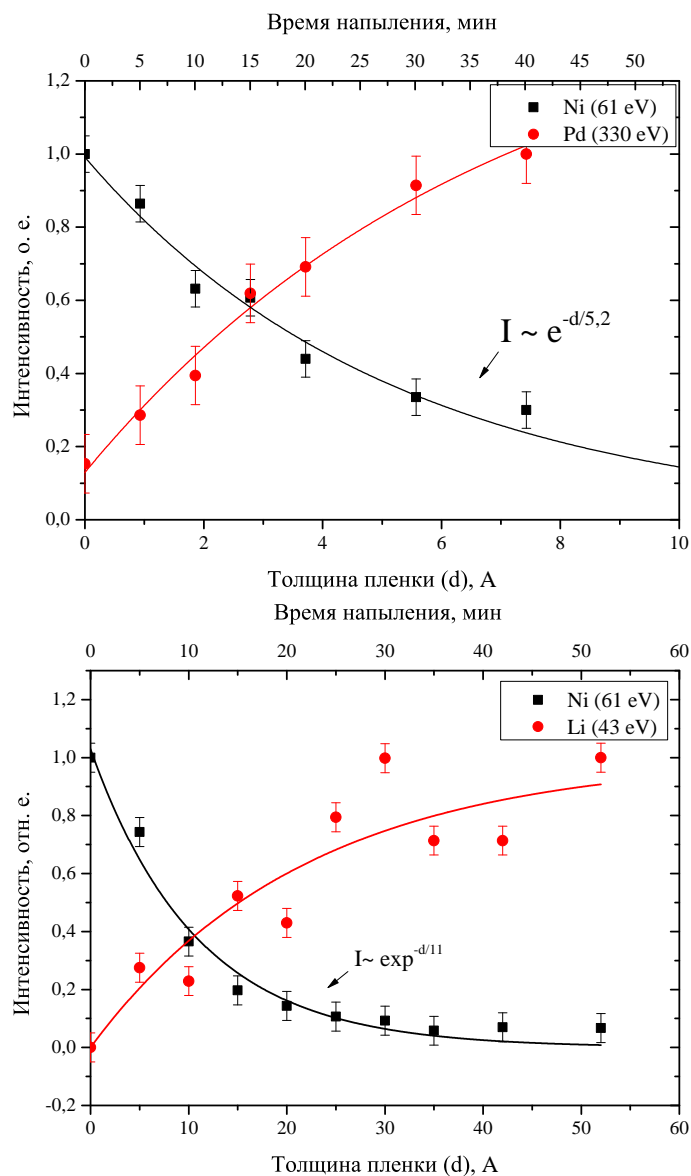


Рис. 2: Калибровочная кривая скорости роста плёнки (сверху) Pd (снизу) LiF на поверхности FeNi₃. Точки показывают относительные амплитуды соответствующих пиков. Сплошная кривая показывает аппроксимацию экспонентой.

Из литературы [14] известно, что длина свободного пробега относительно неупругих столкновений в LiF соударений для электронов с энергией 61 эВ составляет примерно 11 \AA . Из этого можно сделать вывод, что скорость напыления пленки LiF на поверхность FeNi₃ составляла 1 \AA в минуту. Для тонких пленок Pd длина свободного пробега относительно неупругих столкновений может быть взята из работ Сиха и Денча [15] и для электронов с энергией 61 эВ составляет примерно $5,2 \text{ \AA}$. Из чего можно сказать, что скорость напыления пленки Pd на поверхность FeNi₃ составляла $0,19 \text{ \AA}$ в минуту.

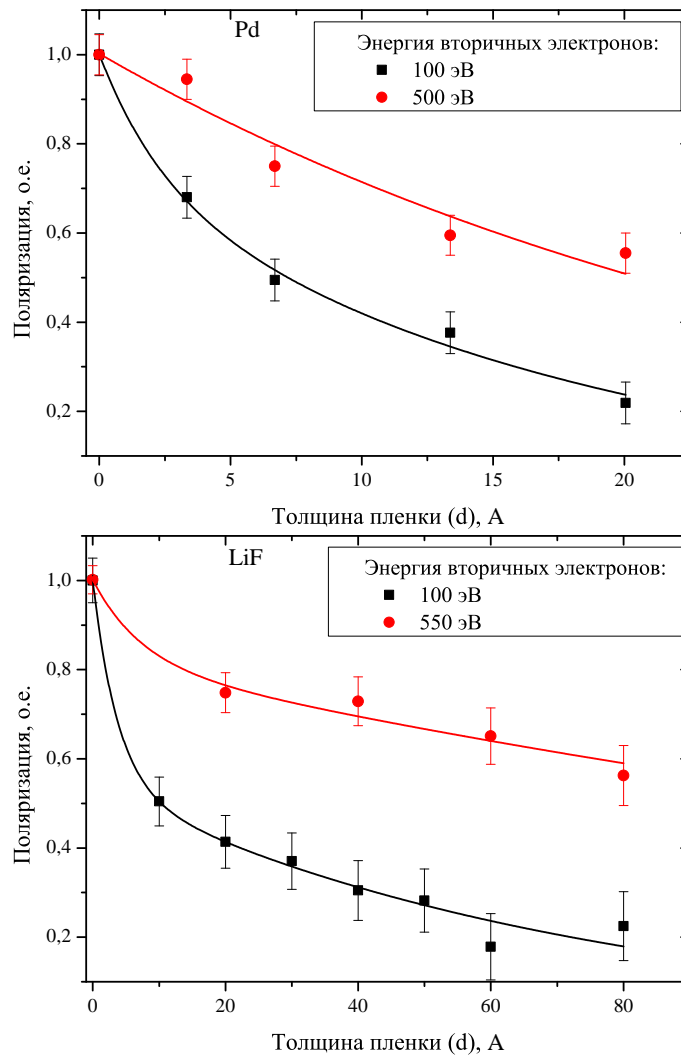


Рис. 3: Зависимость поляризации пучка от толщины для (сверху) пленки Pd для энергии электронов 100 эВ и 500 эВ и для (снизу) пленки LiF для энергии электронов 100 эВ и 550 эВ. Точками представлены экспериментальные результаты. Сплошная кривая показывает аппроксимацию с использованием уравнения 1

Для определения длины спиновой релаксации пленки откалиброванной толщины наносились на поверхность ферромагнитного монокристалла. Для определения поляризации снимались петли гистерезиса поляризации вторичных электронов для пленок разной толщины. Размах петли гистерезиса позволяет определить степень поляризации потока электронов определённой энергии, вышедших из материала. Напыляя на поверхность пленки разной толщины и следя за изменением поляризации, можно определить параметры изучаемого материала. Примеры зависимостей поляризации вторичных электронов для плёнки Pd представлены на рисунке 3 (слева), а для пленок LiF на рисунке 3 (справа).

Сравнение экспериментальных результатов показывает, что вид 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 [16].

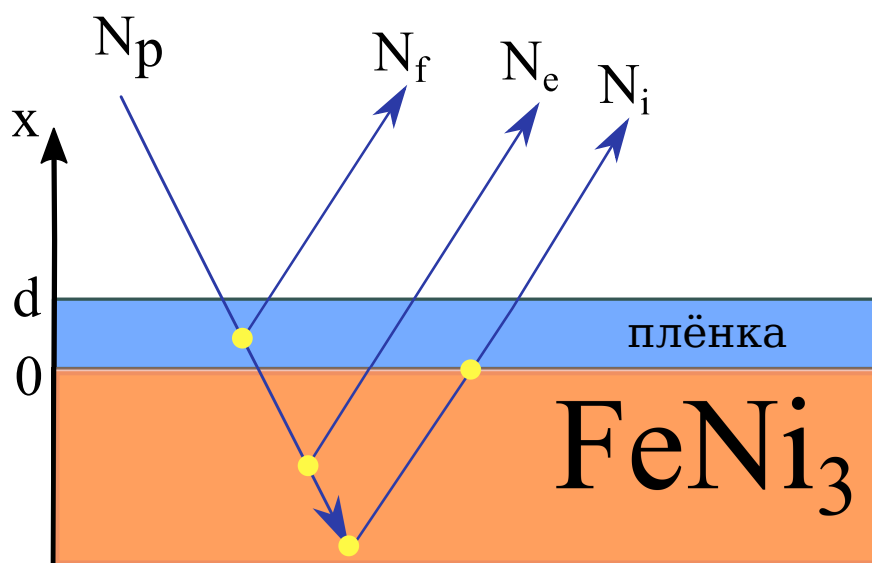


Рис. 4: Схема возможных процессов, происходящих с системой пленка/подложка, при облучении пучком первичных электронов

Для объяснения экспериментальных данных построена модель, которая описывает выход потока электронов из поляризованной ферромагнитной подложки через исследуемую пленку в вакуум [17]. Схема возможных процессов, происходящих при вторичной эмиссии из системы представлена на рисунке 4. Под воздействием первичного пучка электронов N_p могут происходить следующие процессы:

1. Эмиссия электронов из пленки N_f , поскольку пленка не магнитная, поток электронов из неё не поляризован $N_f^\uparrow = N_f^\downarrow$ и не будет вносить вклад в поляризацию.
2. Эмиссия электронов подложки и выход их через плёнку без рассеяния N_e . Эти электроны поляризованы $N_e^\uparrow \neq N_e^\downarrow$.
3. Эмиссия электронов из подложки и выход их в вакуум с потерями

Е, эВ	$d_1, \text{Å}$	$d_2, \text{Å}$	$\lambda, \text{Å}$
35	8,8	81 ± 5	11
50	5,7	75 ± 3	11
100	4,5	$72,2 \pm 8$	11
250	3,8	$105,4 \pm 13,5$	11
550	9,0	245 ± 33	26

Таблица 1: Параметры аппроксимации для плёнок LiF

Е, эВ	$d_1, \text{Å}$	$d_2, \text{Å}$	$\lambda, \text{Å}$
100	4,5	18 ± 4	5,2
500	9,0	$29,6 \pm 4,4$	10

Таблица 2: Параметры аппроксимации для Pd

энергии в процессе рассеяния N_i . Они тоже поляризованы, так как в процессе рассеяния переворот спина случается не со стопроцентной вероятностью $N_i^\uparrow \neq N_i^\downarrow$.

Данная модель позволяет построить систему дифференциальных уравнений, из решения которой следует выражение для поляризации пучка вторичных электронов:

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

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

Используя уравнение 1 были получены аппроксимации, представленные на рисунках 3. Полученные при аппроксимации значения представлены в таблицах 1 для LiF и 2 для Pd.

Основным параметром, характеризующим скорость спиновой релаксации в материале, является d_2 . Из сравнения d_2 с λ можно сказать, 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 в процессах спиновой релаксации. Другим важным фактором является спин-орбитальное взаимодействие, для LiF его воздействие на процессы релаксации мало по сравнению с Pd.

3 Температурные эффекты на поверхности кристалла $\text{FeNi}_3(110)$

Фазовая диаграмма сплавов $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}$ иллюстрирует множество структурных, механических и магнитных свойств, которые послужили толчком к многочисленным исследованиям и разнообразным приложениям данных эффектов [18]. Например, сплавы состоящие из 80% никеля, имеющие граничноцентрированную решётку, обладают практически нулевой магнитострикцией и высокой магнитной восприимчивостью. В данном параграфе экспериментально исследуются температурные эффекты, возникающие на поверхности монокристалла FeNi_3 .

Первым шагом стала калибровка зависимости температуры поверхности от тока нагревателя. Для этого использовался специально созданный оптический пирометр. Подробнее процедура калибровки описана в статье [19].

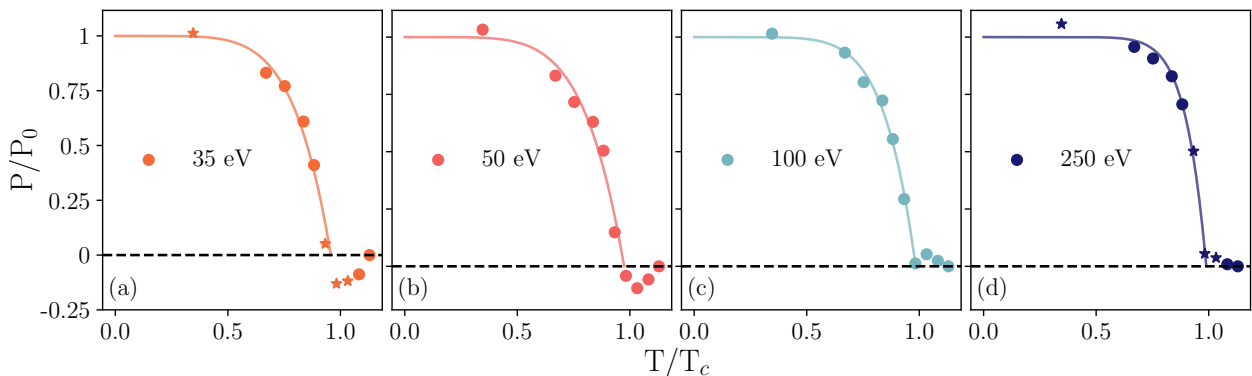


Рис. 5: Зависимость поляризации вторичных электронов с энергией (а) - 35 эВ, (б) - 50 эВ, (с) - 100 эВ, (д) - 250 эВ от температуры образца. Значение $T/T_c = 1$ соответствует температуре Кюри. Точками представлены экспериментальные значения. Сплошная линия представляет собой аппроксимацию с использованием уравнения 2.

После этого производилось снятие петель гистерезиса поляризации вто-

ричных электронов разных энергий, при этом температура образца менялась от 300К до 950К. Зависимость амплитуды петель для электронов с энергией 35, 50, 100 и 250 эВ представлены на рисунке 5. 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 $T = 0K$, T_c - температура Кюри, β - критический параметр. В статье Зигмана [12] утверждается, что поляризация вторичных электронов, идущих из образца пропорциональна его намагниченности. Отсюда можно вывести закон, описывающий поведение максимальной поляризации образца (амплитуды петли гистерезиса поляризации вторичных электронов) в зависимости от температуры поверхности ферромагнетика:

$$P(T) = P(0) (1 - T/T_c)^\beta \quad (2)$$

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

Для того, чтобы подробнее изучить данный феномен, были измерены оже-спектры переходов Fe $M_3M_{45}M_{45}$ и Ni $M_3M_{23}M_{23}$ ($3p3d3d$). Использование спин-поляризованной оже-спектроскопии может позволить определить вклад в эффект каждой из подсистем сложной магнитной системы. Результаты обработки экспериментальных результатов представлены на рисунке 6.

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.

Для того, чтобы объяснить данный эффект, стоит рассмотреть глубины выхода электронов разной энергии. Глубина выхода электронов напрямую связана с длиной свободного пробега относительно неупругих соударений. Зависимость длины свободного пробега от энергии для неорганических веществ имеет минимум в районе 40 эВ и быстро растёт с увеличением энергии [15]. Таким образом можно заключить, что одни электроны с энергией 35 и 50 эВ выходят из приповерхностной области образца, а 100 и 250 эВ из можно относить к «объёмным». Следует отметить, что при измерении

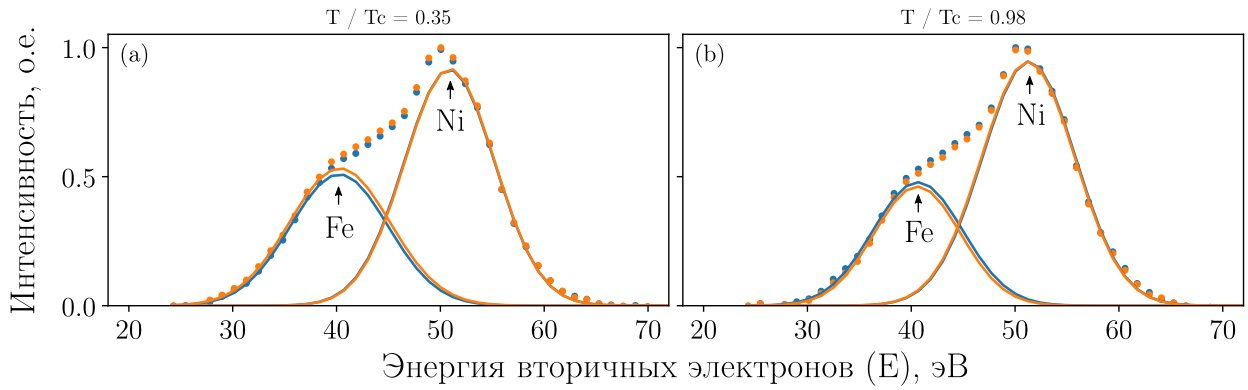


Рис. 6: Спин-разрешённые оже-спектры поверхности $\text{FeNi}_3(110)$ при различной температуре. (a) - $T/T_c = 0.35$ соответствует 300К, (b) - $T/T_c = 0.98$ соответствует 846К. Точки представляют собой экспериментальный результат после вычитания полиномиального фона. Сплошные прямые - аппроксимацию функцией Гаусса. На рисунке представлены оже-пики Fe $M_3M_{45}M_{45}$ ($3p3d3d$) и Ni $M_3M_{23}M_{23}$ ($3p3d3d$).

петель гистерезиса измеряется поляризация фона, образованного вторичными электронами. Такие электроны могут испытывать как упругие, так и не упругие соударения в процессе выхода из образца. В случае же оже-спектроскопии с разрешением по спину измеряется поляризация электронов, относящихся к конкретному переходу в твёрдом теле, что уменьшает их глубину выхода и, как следствие, увеличивает поверхностную чувствительность.

Таким образом получается, что поляризация электронов, идущих из приповерхностного слоя, меняет свой знак при приближении к температуре Кюри, в то время как поляризация «объёмных» электронов убывает до нуля. Исчезновение поляризации (намагниченности) при температурах выше температуры Кюри является ожидаемым физическим явлением. Однако появление (под действием температуры) на поверхности структуры, антиферромагнитно связанной с объёмом, является новым эффектом, который может быть использован при создании новых спинтронных устройств.

4 Разработка и создание оборудования для испытания многоканального детектора Мотта

Спин электрона играет решающую роль во многих физических явлениях, начиная от очевидного примера - магнетизма, основы для спинтрони-

ки, до высокотемпературной сверхпроводимости. Прямое измерение спина сыграло важнейшую роль в понимании таких эффектов как гигантское магнетосопротивление [7], формирование магнитных доменов [20], эффекта Рашбы [21], топологические изоляторы [22]. Начиная с пионерских работ Schönhense [23] стало понятно, что фотоэлектронная спектроскопия с разрешением по углу (angle-resolved electron spectroscopy, ARPES) даёт доступ к спин-поляризованным измерениям. Однако самым прямым способом измерения электронной структуры твёрдых тел с разрешением по моменту и спину является спин-разрешённая ARPES.

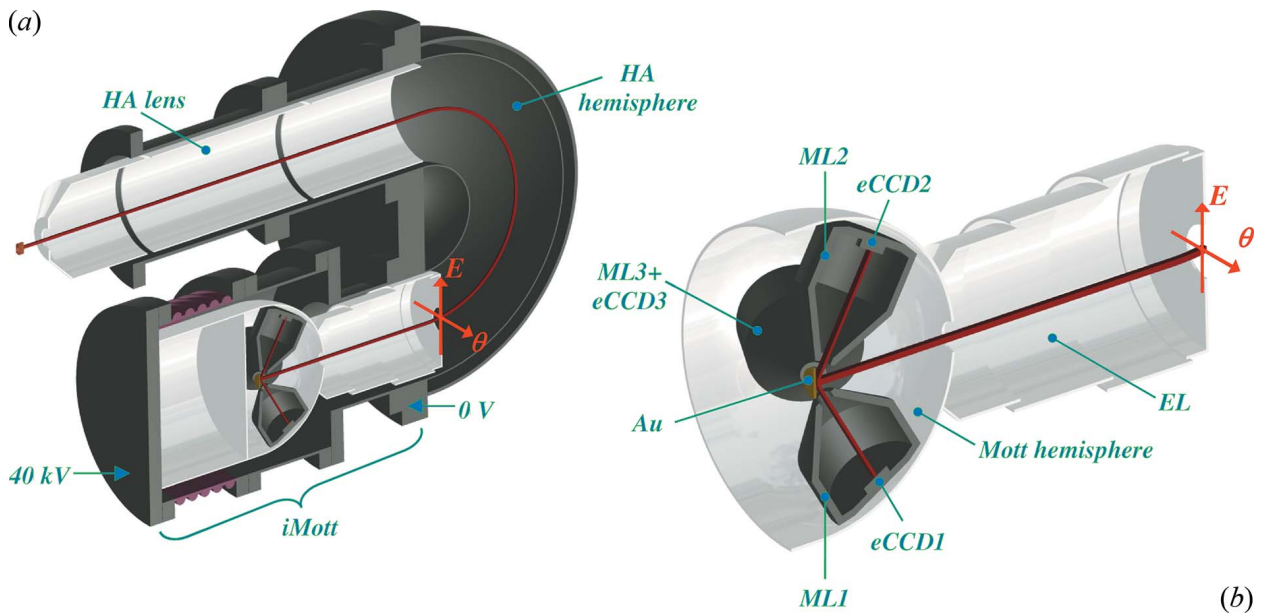


Рис. 7: Схематическое изображение многоканального детектора Мотта (a) в комбинации с полусферическим анализатором для анализа электронов по энергии и по углу. Красная линия показывает примерную траекторию частиц в системе. Метка HA lens - показывает входную линзу анализатора, HA hemisphere - показывает полусферический анализатор. iMott - положение детектора Мотта, 0V и 40kV положение потенциала земли и тянущего потенциала в 40 kV соответственно. (b) - новый детектор в разрезе, EL - входная электростатическая линза, Mott hemisphere - полусфера, которая отделяет дрейфовое пространство детектора от входной линзы. Au - положение золотой фольги, на которой происходит рассеяние, ML - положение фокусирующих магнитных линз, eCCD - положение ПЗС-матриц детектирующих частицы (адаптировано из [5])

В данном разделе рассмотрен процесс разработки нового прибора для детектирования поляризации - многоканального классического детектора Мотта. Классический детектор Мотта [10, 11] является надёжным прибо-

ром для измерения поляризации потока электронов. При создании нового прибора были адаптированы идеи и схемы классического детектора Мотта. Рисунок 7 показывает схематическое изображение прибора в комбинации с энергоанализатором (рисунок 7 (а)) и укрупненная схема с указанием основных компонентов прибора (рисунок 7 (b)).

Главной задачей, которая стояла при создании прибора, было создание детектора Мотта, который бы мог проводить спиновый анализ картины на выходе полусферического анализатора. После прохождения энергоанализатора электроны попадают во входную апертуру детектора и затем проходят через фокусирующую линзу. Далее сфокусированный поток электронов ускоряется до энергии 40 кэВ и попадает во внутреннее дрейфовое пространство детектора. Ускоренные электроны рассеиваются на золотой фольге. На золотой фольге из-за значительного орбитального взаимодействия происходит спин-зависимое рассеивание электронов. Упруго рассеивающиеся на фольге электроны, в зависимости от спина, имеют повышенную вероятность попасть в один из четырёх детекторов. Каждый из детекторов состоит из фокусирующей магнитной линзы и детектора электронов - eCCD матрицы. С помощью магнитной линзы достигается нужная фокусировка потока рассеянных электронов, а матрица позволяет детектировать координаты электрона.

Основные этапы первичной подготовки прибора включали в себя:

1. Проведение расчётов электронной оптики, расчёт электропрочности и подготовка чертежей прибора.
2. Монтаж прибора на вакуумную камеру.
3. Проверка вакуумной системы прибора на наличие течи с помощью течеискателя.
4. Испытание электропрочности компонентов прибора.
5. Монтаж электронной оптики и детектора внутрь прибора.
6. Создание рабочих макетов блоков питания электронной оптики и детектирующего оборудования.

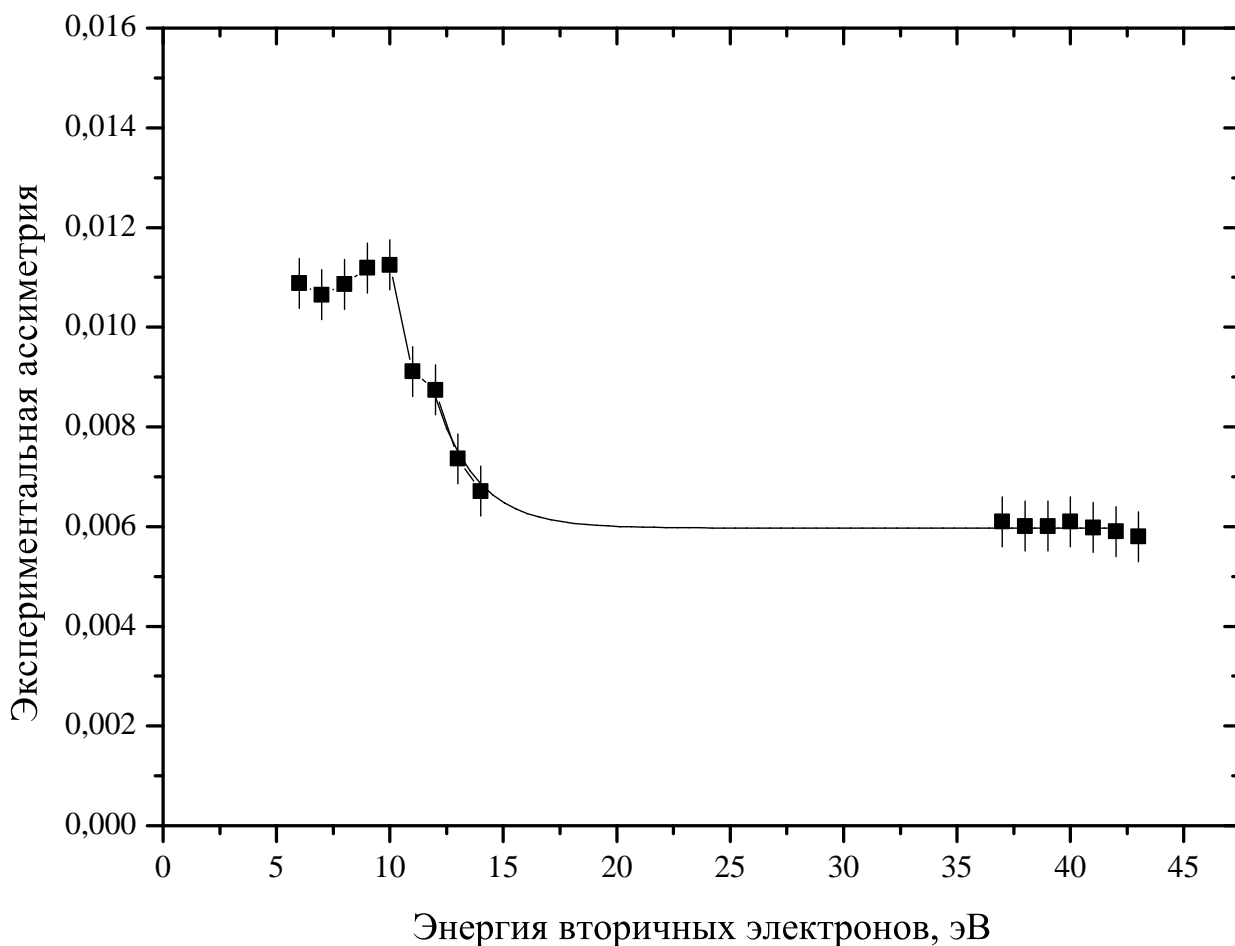


Рис. 8: Экспериментальные измерения асимметрии рассеяния поляризованных электронов. Источником первичного пучка электронов служит кристалл FeВ.

Основными результатами данного этапа было испытание электронной оптики в режиме отражения от монокристалла $\text{FeNi}_3(110)$. Матрица оказалась способна работать в режиме счёта электронов.

Второй этап создания прибора заключался в сборке компонентов внутренней полусферы (магнитных линз и матриц). После этого прибор был испытан в сборке с полусферическим энергоанализатором. В качестве источника поляризованных электронов использовался намагниченный образец FeВ, который облучался неполяризованными электронами. Эффективность прибора в каждой точке изображения (0.1×0.1 мм на поверхности eCCD детектора) соответствовала ожидаемой величине 6×10^{-4} . Количество таких областей на рабочей области матрицы составляло 10^4 .

Новый многоканальный детектор Мотта, благодаря своей эффективности и адаптированности к экспериментам с разрешением по энергии и углу, может быть использован в новых экспериментах по детектированию

спиновых эффектов двумерных систем на поверхности [5] и в интерфейсе спинтронных систем [6].

5 Заключение

1. Определены значения длин спиновой релаксации при комнатной температуре для Pd и LiF для электронов средних энергий.
2. Предложена кинематическая модель, описывающая зависимость поляризации вторичных электронов от толщины плёнки наносимого материала.
3. Из анализа петель гистерезиса поляризации вторичных электронов и спин-поляризованной оже-спектроскопии установлено, что для низких энергий электронов 35 и 50 эВ поляризация электронов меняет знак вблизи температуры Кюри. Для электронов более высоких энергий 100 и 250 эВ данный эффект не наблюдается. Анализ глубин выхода позволяет сделать вывод об антиферромагнитном упорядочении поверхности $\text{FeNi}_3(110)$ относительно объёма.
4. Разработано оборудование для нового многоканального детектора Мотта, обладающего высокой эффективностью.

Список литературы

- [1] Xu, Y. Handbook of spintronics / Yongbing Xu, David Awschalom, Junsaku Nitta. — Springer Netherlands, 2016.
- [2] Žutić, I. Spintronics: Fundamentals and applications / Igor Žutić, Jaroslav Fabian, S Das Sarma // Reviews of modern physics. — 2004. — Vol. 76, no. 2. — P. 323.
- [3] Optical detection of spin-filter effect for electron spin polarimetry / X Li, OE Tereshchenko, S Majee et al. // Applied Physics Letters. — 2014. — Vol. 105, no. 5. — P. 052402.
- [4] Spin polarized low-energy positron source / VN Petrov, SN Samarin, K Sudarshan et al. — 2015. — Vol. 618, no. 1. — P. 012043.
- [5] Strocov, V. N. Concept of a multichannel spin-resolving electron analyzer based on Mott scattering / Vladimir N Strocov, Vladimir N Petrov et al. // Journal of synchrotron radiation. — 2015. — Vol. 22, no. 3. — P. 708–716.
- [6] Cancellieri, C. Spectroscopy of Complex Oxide Interfaces / Claudia Cancellieri, Vladimir N Strocov. — Springer, 2018.
- [7] Giant magnetoresistance of (001) Fe/(001) Cr magnetic superlattices / Mario Norberto Baibich, Jean Marc Broto, Albert Fert et al. // Physical review letters. — 1988. — Vol. 61, no. 21. — P. 2472.
- [8] Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange / Grünberg Binasch, Peter Grünberg, F Saurenbach, W Zinn // Physical review B. — 1989. — Vol. 39, no. 7. — P. 4828.
- [9] Electron-optical systems for Mott polarimeters / T Ya Fishkova, Yu A Mamaev, IP Ovsyannikova et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 1994. — Vol. 348, no. 1. — P. 56–60.

- [10] Petrov, V. Comparative tests of conventional and retarding-potential Mott polarimeters / VN Petrov, MS Galaktionov, AS Kamochkin // Review of Scientific Instruments. — 2001. — Vol. 72, no. 9. — P. 3728–3730.
- [11] New compact classical 40 kv Mott polarimeter / VN Petrov, VV Grebenshikov, BD Grachev, AS Kamochkin // Review of scientific instruments. — 2003. — Vol. 74, no. 3. — P. 1278–1281.
- [12] Siegmann, H. Surface and 2D magnetism / HC Siegmann // Journal of Physics: Condensed Matter. — 1992. — Vol. 4, no. 44. — P. 8395.
- [13] Campbell, D. A study of the structure of evaporated lithium fluoride / DS Campbell, DJ Stirland, H Blackburn // Philosophical Magazine. — 1962. — Vol. 7, no. 79. — P. 1099–1116.
- [14] Ion-induced kinetic electron emission from ${}^6\text{LiF}$, ${}^7\text{LiF}$ and MgF_2 thin films / S Ullah, AH Dogar, M Ashraf, A Qayyum // Chinese Physics B. — 2010. — Vol. 19, no. 8. — P. 083401.
- [15] Seah, M. P. Quantitative electron spectroscopy of surfaces: A standard data base for electron inelastic mean free paths in solids / M Pl Seah, WA Dench // Surface and interface analysis. — 1979. — Vol. 1, no. 1. — P. 2–11.
- [16] Jensen, K. L. Introduction to the physics of electron emission / Kevin L Jensen. — John Wiley & Sons, 2017.
- [17] Pavlov, A. Spin relaxation length for medium energy electrons in pd and lif ultrathin films / Alexander Pavlov, Alexander Ustinov, Vladimir Petrov // Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena. — 2018. — Vol. 223. — P. 62–66.
- [18] Cullity, B. D. Introduction to magnetic materials / Bernard Dennis Cullity, Chad D Graham. — John Wiley & Sons, 2011.
- [19] Device for wideband ratio pyrometry / EV Kneschaurek, AV Pavlov, RW Rjabow, AB Ustinov. — 2019. — Vol. 1236, no. 1. — P. 012037.

- [20] Kirschner, J. High-resolution spin-polarized electron-energy-loss spectroscopy and the stoner excitation spectrum in nickel / J Kirschner, D Rebenstorff, H Ibach // Physical review letters. — 1984. — Vol. 53, no. 7. — P. 698.
- [21] Disentanglement of surface and bulk rashba spin splittings in noncentrosymmetric bitei / Gabriel Landolt, Sergey V Eremeev, Yury M Koroteev et al. // Physical review letters. — 2012. — Vol. 109, no. 11. — P. 116403.
- [22] Hasan, M. Z. Colloquium: topological insulators / M Zahid Hasan, Charles L Kane // Reviews of modern physics. — 2010. — Vol. 82, no. 4. — P. 3045.
- [23] Schönhense, G. Angular dependence of the polarization of photoelectrons ejected by plane-polarized radiation from argon and xenon atoms / G Schönhense // Physical Review Letters. — 1980. — Vol. 44, no. 10. — P. 640.

Список работ, опубликованных по теме научно-квалификационной работы (диссертации)

Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК:

1. 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. — №. 1.
2. 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.
3. Kneschaurek E. V. et al. Device for wideband ratio pyrometry //Journal of Physics: Conference Series. — 2019. — Т. 1236. — №. 1. — С. 012037.

Публикации в других изданиях:

1. Павлов А.В., Устинов А.Б, Петров В.Н. Экспериментальное измерение длины спиновой релаксации в тонких плёнках Pd и LiF. // Неделя науки СПбПУ, Санкт-Петербург, 2016
2. Pavlov A.V., Ustinov A.B., Petrov V.N. Spin relaxation length for medium energy electrons in Pd and LiF ultrathin films // ECOSS-33 // Szeged, Hungary, 2017 (книга абстрактов)
3. Павлов А.В., Устинов А.Б, Петров В.Н. Разработка и создание многоканального детектора Мотта. // Неделя науки СПбПУ, Санкт-Петербург, 2017
4. Pavlov A.V., Ustinov A.B., Petrov V.N. Spin-resolved electron spectroscopy for spintronic materials analysis // ECOSS-34 // Aarhus, Denmark, 2018 (книга абстрактов)
5. Клевцов А.И., Павлов А.В., Устинов А.Б, Петров В.Н. Экспериментальное измерение температурной зависимости магнитных свойств поверхности // Неделя науки СПбПУ, Санкт-Петербург, 2019

Аспирант _____ Павлов Александр Валерьевич