

На правах рукописи

Устинов Александр Борисович

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПИНОВОЙ СТРУКТУРЫ
ТОНКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК МЕТОДОМ
СПИН-ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ОЖЕ-СПЕКТРОСКОПИИ**

Специальность 01.04.04 – Физическая электроника

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Санкт-Петербург - 2010

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Петров Владимир Никифорович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник Пронин Игорь Иванович
доктор физико-математических наук,
профессор Шикин Александр Михайлович

Ведущая организация: Российский Государственный Педагогический
Университет им. А.И. Герцена

Защита состоится “23” декабря 2010 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.01 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул. 29, II корпус, ауд. 470.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан “18” ноября 2010 г.

Ученый секретарь Диссертационного Совета
доктор технических наук,
профессор



Коротков А.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Развитие современной электроники приближается к фундаментальным ограничениям на уменьшение размера элементов электронных систем. Размер одного элемента электронной системы становится всё ближе к межатомным расстояниям в твёрдом теле. В ближайшее время процесс миниатюризации себя исчерпает. Для того чтобы продолжить рост вычислительных мощностей и поддержать прогресс электронных технологий необходимо найти принципиально новые решения.

Одним из перспективных направлений развития современной электроники является спиновая электроника или спинтроника. Она, в отличие от традиционной электроники, использует не только заряд электрона, но и его спиновый магнитный момент [1].

В настоящее время спиновая электроника находится на начальном этапе своего развития. Ведётся поиск эффектов и материалов, а также производится создание и изучение прототипных элементов спинтроники.

Результаты, представленные в данной работе, были получены в рамках исследования различных спиновых систем на поверхности твёрдых тел. Возникающие в них эффекты могут быть использованы для нужд спиновой электроники.

Интерес к исследованиям взаимодействия поляризованных электронов с твердым телом обусловлен еще и тем, что они позволяют получать уникальную информацию о магнитной структуре поверхности металлов, сплавов, тонких пленок. Спин-поляризационная электронная оже-спектроскопия (СПЭОС) дает возможность по отдельности изучать магнитную структуру каждой из компонент, входящих в сложную магнитную систему, и, таким образом, является одним из наиболее мощных инструментов изучения низкоразмерного магнетизма.

Цель работы состояла в определении спиновой структуры поверхности магнитных кристаллов Fe_3O_4 и FeNi_3 , а также нанесённых на них тонких металлических плёнок, и развитии методов спин-разрешённых экспериментов. В связи с этим, в данной работе необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Определить локальную магнитную структуру поверхности Fe_3O_4 (110).
2. Изучить влияние напыления тонкой плёнки висмута на поляризацию оже-электронов образца Fe_3O_4 (110).
3. Определить влияние напыления плёнок золота различной толщины на поляризацию вторичных электронов кристалла FeNi_3 (110).
4. Экспериментально определить длину пробега электронов относительно спиновой релаксации в висмуте.

5. Получить концентрацию атомов на поверхности $\text{FeNi}_3(110)$ близкую к инварной путём напыления плёнки железа, изучить возникающие при этом спиновые эффекты.

6. Создать миниатюрный классический детектор Мотта. Отработать методику проведения поляризационных измерений.

Научная новизна работы состоит в том, что впервые:

- Получены спин-разрешённые оже-спектры поверхности Fe_3O_4 . Установлено, что расщеплённый оже-пик железа формируется за счёт двух- и трёхвалентных атомов железа. Более высокоэнергетичная компонента оже-пика железа поляризована, что доказывает его связь с двухвалентным железом.

- Обнаружен эффект усиления поляризации электронов в системе $\text{Fe}_3\text{O}_4(110)\text{-Bi}$. При напылении плёнки висмута толщиной в 2 моноатомных слоя поляризация оже-пика железа магнетита возрастает более чем в два раза. Полученный эффект связан с дополнительным спин-орбитальным взаимодействием оже-электронов железа при среднем угле выхода в 45° . Предложена качественная модель, объясняющая полученные результаты.

- В системе $\text{FeNi}_3(110)\text{-Au}$ обнаружен эффект спинового фильтра. Коэффициенты прохождения вторичных электронов образца через плёнку золота различны для противоположных ориентаций спина.

- Определена длина пробега электронов относительно спиновой релаксации в висмуте. Для поляризованных электронов с энергией 61эВ , выходящих из магнитной подложки FeNi_3 , длина пробега относительно спиновой релаксации вдвое превысила длину пробега электронов относительно неупругих соударений при этой же энергии.

- Установлено, что при возрастании концентрации Fe на поверхности $\text{FeNi}_3(110)$ поверхностная подрешётка никеля демонстрирует антиферромагнитное упорядочение по отношению к поверхностной подрешётке Fe.

- Предложена новая схема детектирования электронов в классическом детекторе Мотта.

Практическое значение работы:

1. Эффект усиления поляризации электронов, обнаруженный и исследованный в системе $\text{Fe}_3\text{O}_4(110)\text{-Bi}$, может быть использован для создания твердотельных инжекторов поляризованных электронов в спинтронике.

2. Спин-фильтр эффект, который проявляется в системе $\text{FeNi}_3(110)\text{-Au}$, может быть использован в спинтронных устройствах в качестве детектора поляризованных электронов.

3. Данные о длине пробега электронов относительно спиновой релаксации в висмуте могут применяться при проектировании устройств, использующих поляризованные электроны твёрдого тела в качестве носителей.

4. Создан миниатюрный классический детектор Мотта. Используемая в нём новая схема детектирования позволила увеличить скорость счёта, уменьшить размеры и упростить цепи обработки сигнала.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Низкоэнергетичные оже-пики железа Fe_3O_4 являются спин-поляризованными; высокоэнергетичная компонента пика соответствует двухвалентным ионам железа, а низкоэнергетичная – трёхвалентным. Плёнка висмута толщиной в два монослоя на поверхности образца Fe_3O_4 приводит к возрастанию поляризации оже-пика железа.

2. Пленка золота толщиной в один монослой на поверхности FeNi_3 приводит к зависящему от спина эффекту прохождения электронов с энергией 69 эВ.

3. Длина пробега электронов относительно спиновой релаксации в Fe в два раза превышает длину пробега электронов относительно неупругих соударений при энергии 61 эВ.

4. Подрешётка никеля на поверхности системы $\text{FeNi}_3(110)\text{-Fe}$ характеризуется антиферромагнитным упорядочением относительно объёма.

5. Методика спин-разрешённого эксперимента и экспериментальная установка, оснащённая миниатюрным классическим детектором Мотта.

Апробация результатов работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на школе молодых учёных «Нанопизика и нанозлектроника» (Нижний Новгород, 2008), на симпозиуме «Нанопизика и нанозлектроника» (Нижний Новгород, 2009), на молодёжной конференции «Физика.СПб» (Санкт-Петербург, 2009), на семинарах кафедры физической электроники СПбГПУ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 5 печатных работ, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка цитируемой литературы. Полный объём диссертации составляет 152 страницы, включая 53 рисунка и список цитируемой литературы из 77 наименований.

Работа выполнена в лаборатории группы поверхностного магнетизма кафедры «Экспериментальная физика» Физико-механического факультета СПбГПУ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, изложены основные результаты, их научная и практическая значимость. Приведены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава носит обзорный характер.

В первом параграфе вводятся основные понятия, связанные с изучением и использованием поляризованных электронов, обсуждаются основные принципы работы анализатора спиновой поляризации электронов – детектора Мотта. Приводятся механизмы, обуславливающие спиновую зависимость процессов рассеяния электронов твёрдым телом: спин-орбитальное взаимодействие и обменное взаимодействие, связанное с магнитной упорядоченностью электронов мишени.

Во втором параграфе рассмотрены вопросы, связанные с вторичной электронной спектроскопией. На основе анализа существующих экспериментальных работ показано, что поляризация вторичных электронов убывает с ростом их кинетической энергии, а спектр вторичных электронов может быть представлен в виде некогерентной суперпозиции двух компонент. Первая компонента - это неупруго рассеянные неполяризованные первичные электроны, а вторая - эмитированные твердотельные электроны с поляризацией, определяемой поляризацией валентной зоны.

Третий параграф посвящен описанию метода электронной оже-спектроскопии (ЭОС). Облучение поверхности вещества пучком электронов с энергией 1-10 кэВ приводит к эмиссии вторичных электронов образца. Среди них есть электроны, образовавшиеся посредством оже-процесса. Если эти электроны выходят в вакуум без потерь энергии, то они несут информацию о структуре энергетических уровней атома. Поскольку структура энергетических уровней специфична для каждого элемента, то по энергии оже-электронов можно судить о том, атомами какого вещества они были испущены.

В четвертом параграфе представлены результаты анализа экспериментальных и теоретических работ, посвященных исследованию магнитных свойств поверхности методом спин-поляризационной электронной оже-спектроскопии. В рассматриваемых работах было показано, что измерение поляризации оже-электронов может дать информацию как о намагниченности поверхности, так и о некоторых особенностях взаимодействия электронных оболочек внутри атома. Магнетизм переходных 3d-металлов обусловлен тем, что валентная зона этих металлов содержит электроны, магнитные моменты которых ориентированы в веществе упорядоченным образом. Поэтому изучение поляризации оже-переходов, в которых участвуют 3d электроны, позволяет получать информацию о поляризации валентной зоны этих веществ и, следовательно, об их намагниченности.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальной установки для проведения поляризационных измерений и методики эксперимента. В первом параграфе описывается экспериментальное оборудование. Основной частью экспериментального комплекса, созданного на базе универсальной сверхвысоковакуумной установки УСУ-4, является оригинальный спектрометр, позволяющий проводить одновременный анализ распределения электронов по энергии и спиновой поляризации. Спектрометр состоит из двух частей: энергоанализатора электронов на базе АЦЗ (анализатор типа «цилиндрическое зеркало») и детектора спиновой поляризации электронов (детектора Мотта). Схема спектрометра приведена на рис. 1.

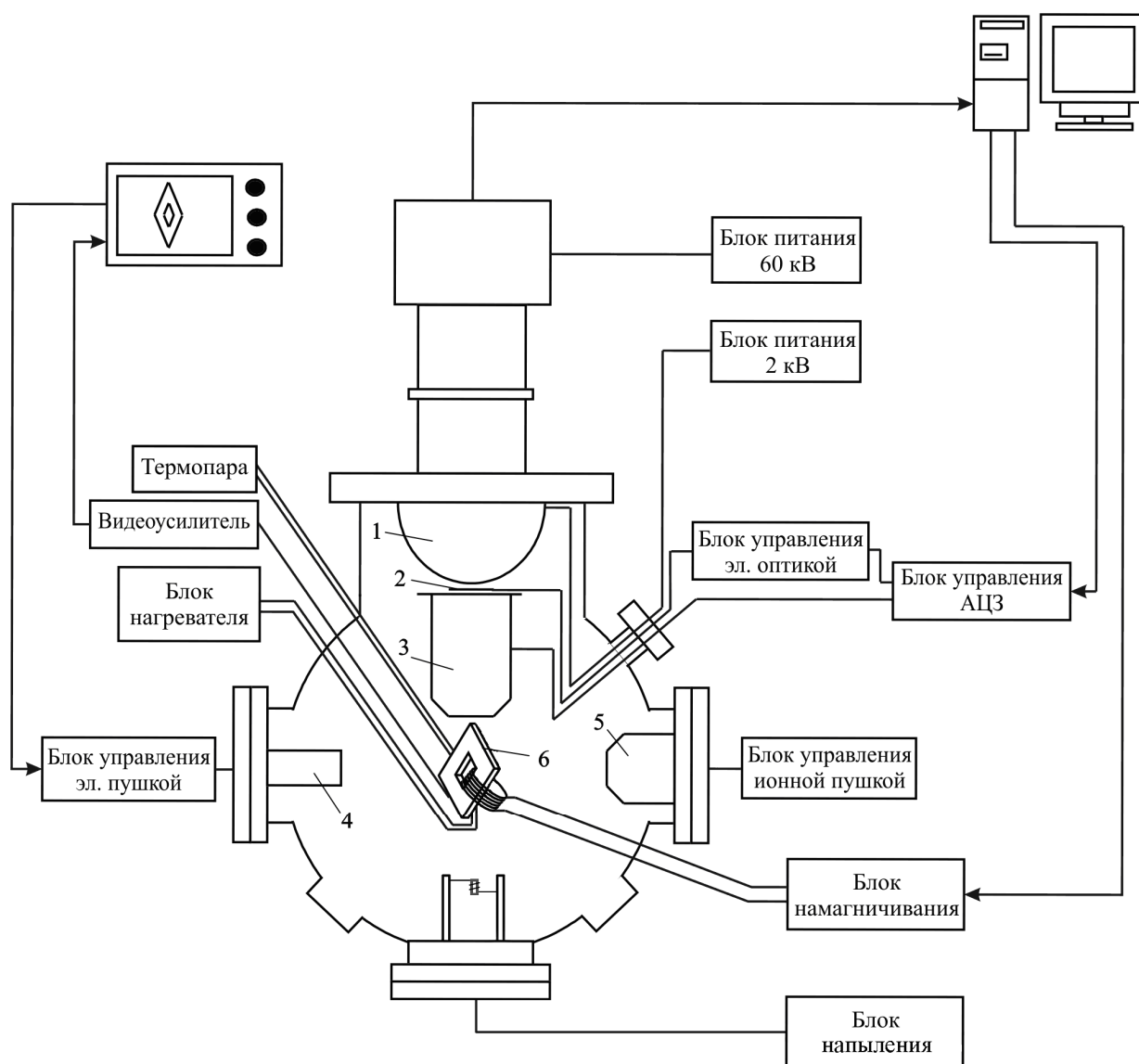


Рис. 1. Схема спектрометра для проведения измерений методом СПЭОС.

- 1 – детектор Мотта
- 2 – электронная оптика
- 3 – АЦЗ
- 4 – электронная пушка
- 5 – ионная пушка
- 6 – держатель образца, закреплённый на манипуляторе

В этом же параграфе описывается дополнительное оборудование, разработанное и использованное в эксперименте: электронная и ионная пушки, источник напыления висмута и железа, источник напыления золота, система откачки и пр. Там же приведено подробное описание образцов и держателя образца (включающего в себя молибденовую подложку, обеспечивающую однородный прогрев, и катушку намагничивания).

В работе использовались магнитные монокристаллические подложки $\text{Fe}_3\text{O}_4(110)$ и $\text{FeNi}_3(110)$. Первая изготовлена в виде диска диаметром 10 мм и высотой 1 мм. Для измерений она устанавливалась в ярмо из магнитомягкого железа. Вторая была изготовлена в виде рамки, стороны которой ориентированы вдоль осей легкого намагничивания $[111]$ кристалла. Образцы намагничивались до насыщения пропусканием импульса тока по катушке, навитой вокруг одной из сторон рамки образца.

Поскольку СПЭОС является поверхностно-чувствительным методом, при проведении измерений предъявлялись особые требования к чистоте исследуемой поверхности. Измерения проводились в условиях сверхвысокого вакуума. Были использованы специальные процедуры получения чистой поверхности образцов. Для очистки применялся высокотемпературный прогрев и ионное травление в атмосфере аргона.

Второй параграф посвящен описанию методик проведения измерений. В работе реализованы две методики, которые позволяют определять локальные магнитные свойства поверхности: спин-поляризационная электронная оже-спектроскопия и спин-поляризационная вторично-электронная спектроскопия (СПВЭС).

Поляризационные измерения подразумевают анализ потока вторичных электронов как по энергии, так и по направлению спина.

В СПЭОС регистрируется количество электронов в каналах детектора Мотта $N_L(E)$ и $N_R(E)$ как функция энергии. Сигнал $N(E)=[N_L(E)+N_R(E)]/2$ представляет собой традиционный оже-спектр. Для получения спиновой информации проводится следующая обработка сигналов $N_L(E)$ и $N_R(E)$: 1. Вычисляется поляризация пучка вторичных электронов

$$P(E) = \frac{1}{S} \times \frac{N_L(E) - N_R(E)}{N_L(E) + N_R(E)},$$
 где S – приборная функция детектора Мотта (функция Шермана);

2. По формуле $N^\pm(E)=N(E)[1\pm P(E)]$ определяются спектры соответствующие состояниям с противоположными направлениями спинов (спин-вверх и спин-вниз) в пучке (см. пример на рис. 6). Анализ поляризации оже-пиков позволяет определить вклад каждого элемента в общую намагниченность поверхности вещества.

В СПВЭС записываются зависимости поляризации электронов образца от напряжённости внешнего магнитного поля (см. пример на рис. 5). Это позволяет определять магнитные свойства поверхности.

При проведении измерений образец намагничивался внешним магнитным полем. Поскольку это поле искажает траектории как первичного пучка, так и вторичных электронов, были разработаны режимы измерений, позволяющие устранять влияние внешнего магнитного поля на результат измерений.

Основной погрешностью при измерении поляризации является статистическая погрешность, которая вычисляется по формуле
$$\Delta P(E) = \frac{1}{S} \times \frac{1}{\sqrt{N_L(E) + N_R(E)}}.$$

Систематическая погрешность в значительной степени устранялась посредством проведения измерений в режиме периодического перемагничивания образца.

В третьей главе приведены экспериментальные данные, полученные при исследовании поляризации оже-электронов железа входящих в состав монокристалла Fe_3O_4 .

В первом параграфе описаны свойства магнетита Fe_3O_4 . Он является ферромагнетиком и имеет структуру типа шпинели. В его элементарной ячейке содержится 56 атомов, 24 из которых – атомы железа. Нейтронные исследования показали, что магнитные моменты атомов трёхвалентного железа в магнетите скомпенсированы, тогда как атомов двухвалентного железа – нет.

Во втором параграфе приведены результаты изучения спиновой структуры поверхности магнетита. Известно, что оже-пик железа в магнетите расщеплён (см. рис. 2, (а)). Существовала гипотеза о том, что расщепление связано с атомами двух- и трёхвалентного железа [2]. В настоящей работе для проверки этой гипотезы была использована СПЭОС. На рис. 2, (б) представлен оже-пик железа магнетита и его аппроксимация двумя гауссианами. На рис. 2, (в) показана поляризация вторичных электронов образца в том же экспериментальном цикле. Из сравнения этих зависимостей видно, что поляризация электронов довольно точно повторяет контур второй гауссианы. Значит, именно высокоэнергетичная компонента оже-пика отвечает за магнетизм образца и действительно соответствует двухвалентному железу.

В третьем параграфе представлены результаты изучения влияния напыления тонкой плёнки висмута на поляризацию вторичных электронов образца. Висмут обладает большим атомным номером и эффекты, связанные со спин-орбитальным взаимодействием, в нём должны быть существенны. При напылении 2 монослоёв висмута на поверхность магнетита, на фоне угасания общей амплитуды оже-пика железа отчётливо виден эффект усиления его поляризации (в результате напыления поляризация возросла более чем в два раза). В параграфе предложена качественная модель, объясняющая такое усиление на основании спин-орбитального взаимодействия оже-электронов железа при прохождении через тонкую плёнку висмута под средним углом 45° .

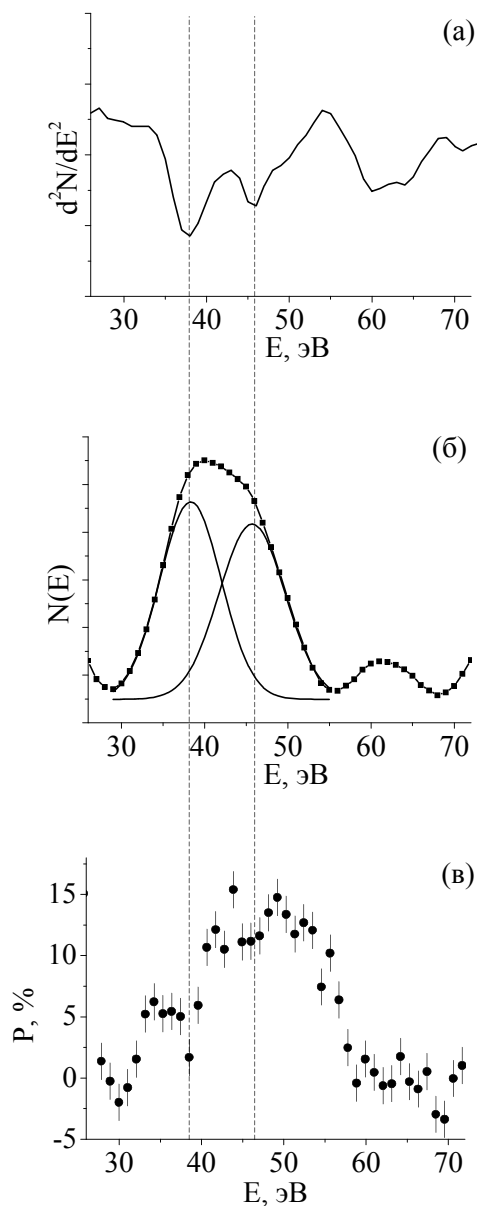


Рис. 2 (а) - Вторая производная от оже-спектра железа (без разрешения по спину); (б) - оже-спектр железа после вычитания фона (без разрешения по спину); (в) - поляризация вторичных электронов. На рисунке представлен оже-пик $M_3M_{45}M_{45}(3p3d3d)$ железа.

Четвертая глава посвящена исследованию влияния тонких плёнок висмута и золота, напылённых на поверхность $FeNi_3$, на спиновую поляризацию вторичных электронов образца.

Первый параграф посвящён магнитным свойствам железо-никелевых сплавов.

Во втором параграфе приведены результаты исследования спин-фильтр эффекта, полученного в системе $FeNi_3(110)-Au$. Спин-фильтр эффект представляет собой явление спин-зависимого прохождения электронов через какую-либо среду. В этом случае коэффициенты прохождения электронов с противоположными направлениями спинов

оказываются различными. На рис. 3 представлены традиционный оже-спектр (а) и зависимость поляризации вторичных электронов от энергии (б) образца FeNi_3 с плёнкой золота на поверхности. На рис. 3, (б) отчётливо виден минимум поляризации вторичных электронов, находящийся в области оже-пика золота. Наличие минимума говорит о значительном преимущественном поглощении вторичных электронов с одной компонентой спина. Селективное поглощение в данном случае связано с дополнительным расщеплением валентных d-состояний атомов золота на поверхности образца под действием магнитного поля подложки.

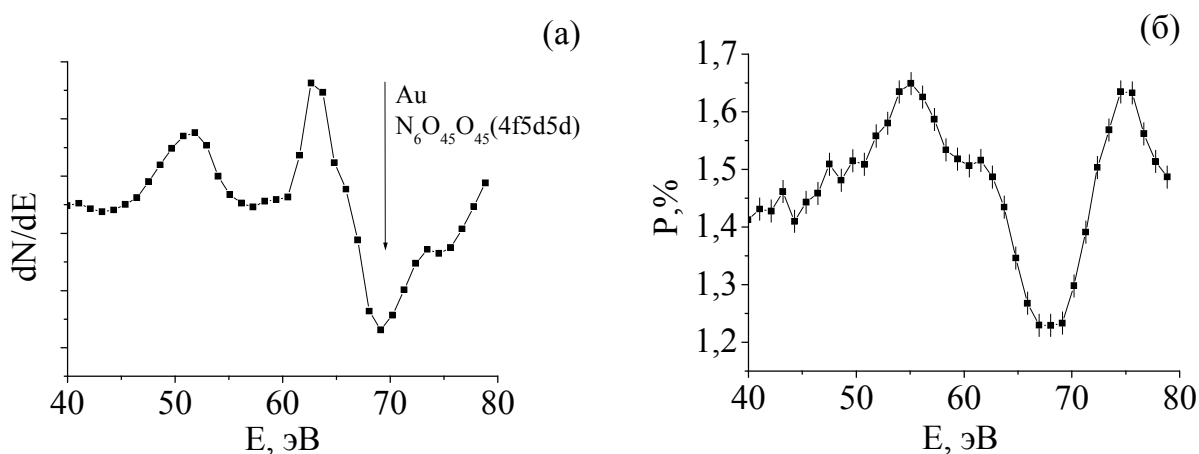


Рис. 3. Спин-фильтр эффект в системе $\text{FeNi}_3(110)\text{-Au}$ при толщине плёнки золота в 1 монослой. (а) – традиционный оже-спектр; (б) – энергетическая зависимость поляризации вторичных электронов.

В третьем параграфе приведены результаты изучения длин пробега электронов относительно спиновой релаксации в висмуте. Для этого производилось напыление плёнок висмута различной толщины на поверхность $\text{FeNi}_3(110)$. В эксперименте регистрировалась интенсивность оже-пика электронов Ni и записывались петли гистерезиса поляризации вторичных электронов (вид петли представлен на рис. 5, (а)).

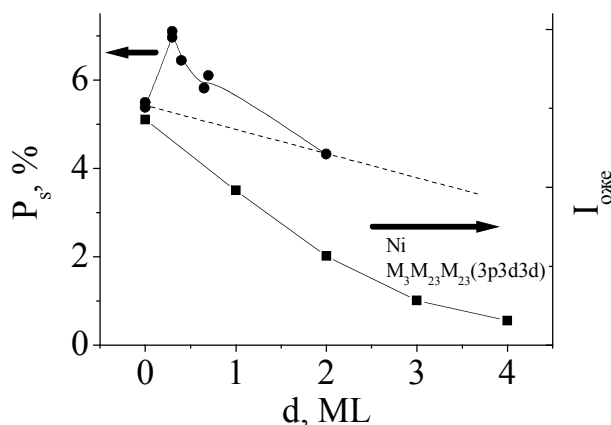


Рис. 4. Поляризация вторичных электронов и амплитуда оже-пика никеля подложки в системе $\text{FeNi}_3(110)\text{-Bi}$.

Из сравнения зависимости спада амплитуды оже-пика никеля подложки и графика уменьшения поляризации вторичных электронов от толщины напылённой плёнки (см. рис. 4) было установлено, что длина пробега электрона относительно спиновой релаксации вдвое превышает длину пробега относительно неупругих соударений при одинаковой энергии. Наличие максимума на графике для поляризации вторичных электронов обусловлено тем, что длина свободного пробега относительно спиновой релаксации в плёнке висмута больше, чем в FeNi_3 .

Пятая глава посвящена созданию инварной концентрации железа и никеля на поверхности $\text{FeNi}_3(110)$ посредством напыления железа. Инварный эффект характеризуется малым коэффициентом температурного расширения в сплавах FeNi с определённой концентрацией компонентов [3]. Этот эффект связан с магнитными фазовыми переходами в твёрдом теле. На рис. 5, (а) представлена зависимость поляризации вторичных электронов очищенной поверхности образца FeNi_3 от тока намагничивания. Она имеет вид традиционного ферромагнитного гистерезиса. На рис. 5, (б) показана такая же зависимость для образца с плёнкой железа примерно в 0,5 монослоя на его поверхности. Она имеет аномальное поведение (направление обхода петли обратное) и значительное аномальное расщепление на крыльях петли. Данный результат связан с наличием двух магнитных подсистем, одна из которых характеризуется ферромагнитным, а вторая – антиферромагнитным, относительно первой, поведением.

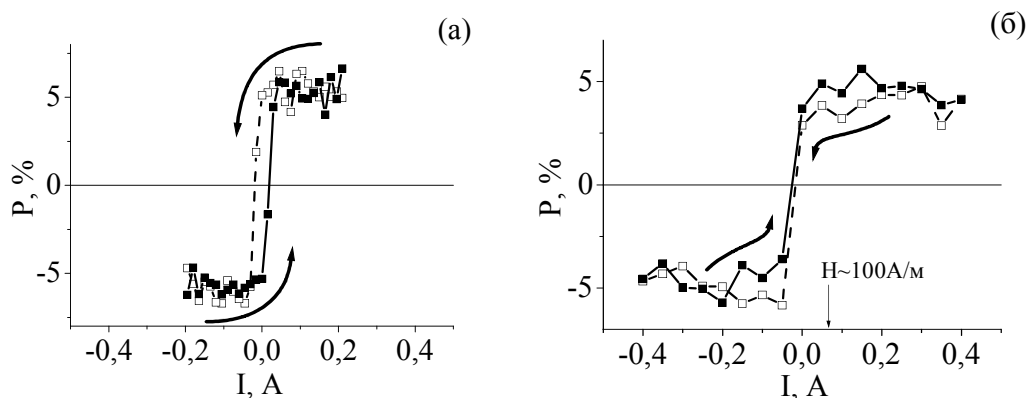


Рис. 5. Аномальный гистерезис поверхности $\text{FeNi}_3(110)\text{-Fe}$. (а) – поляризация вторичных электронов очищенной поверхности FeNi_3 ; (б) – поляризация вторичных электронов поверхности FeNi_3 с плёнкой железа толщиной $\sim 0,5$ монослоя.

Для выяснения природы этих подсистем дальнейшие исследования проводились методом СПЭОС. Для этого были сняты спин-разрешённые оже-спектры (см. рис. 6). На них видно, что при толщине плёнки железа примерно в 0,5 монослоя поляризация оже-пика никеля отрицательна. Это свидетельствует об антиферромагнитном (АФМ) упорядочении поверхностной подрешётки никеля относительно железа (и объёма в целом). Таким образом,

двумя магнитными подсистемами при инвариантных концентрациях на поверхности FeNi_3 являются поверхностные подрешётки железа и никеля. Данное АФМ упорядочение может быть объяснено в рамках модели Бете-Слэтера [3]. Упорядочение антиферромагнитного типа (см рис. 6, (б)) связано с изменением знака обменного интеграла между атомами Fe и Ni при изменении концентрации атомов железа на поверхности.

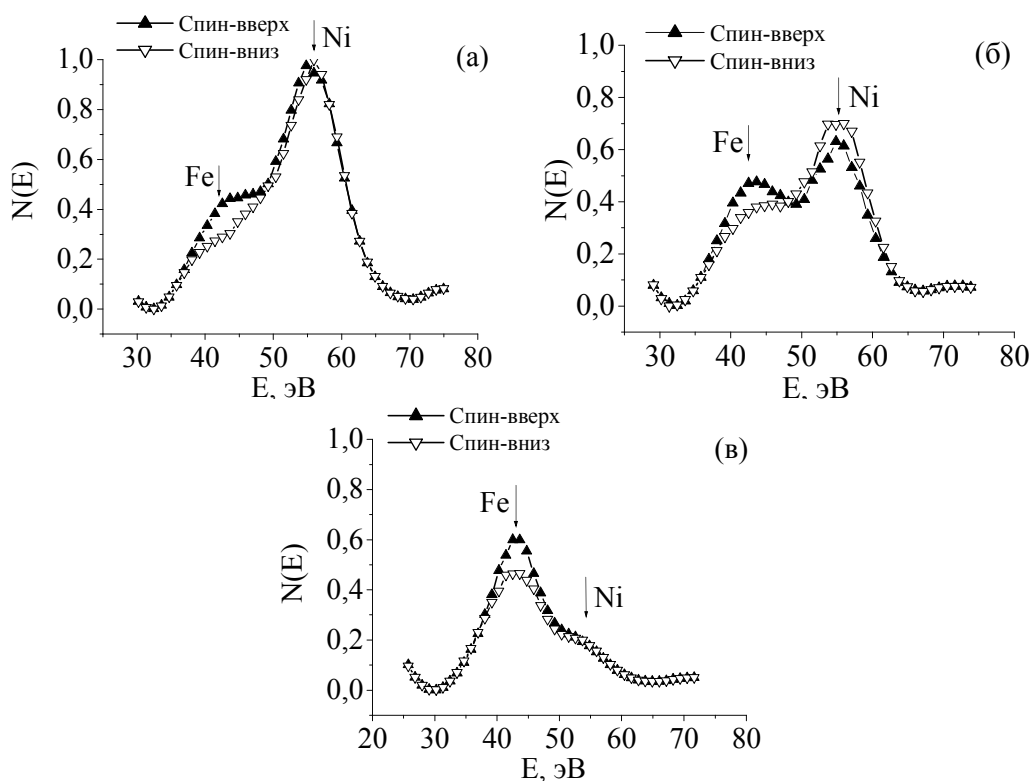


Рис. 6. Спин-разрешенные оже-спектры поверхности $\text{FeNi}_3(110)$ при различной толщине напылённого железа: (а) - очищенный образец; (б), (в) - около 0,5 монослоя и 3 монослоев железа на поверхности соответственно; на рисунке представлены оже-пики $M_3M_{45}M_{45}(3p3d3d)$ железа и $M_3M_{23}M_{23}(3p3d3d)$ никеля.

Шестая глава диссертационной работы посвящена разработке миниатюрного классического 40 кВ детектора Мотта.

В первом параграфе приведён обзор методов измерения спиновой поляризации, которые используются для спектроскопии поляризованных электронов. Среди них основными являются: измерения посредством детекторов Мотта, спин-поляризованная дифракция медленных электронов (SPLEED, spin-polarized low energy electron diffraction) и дифракция очень медленных электронов (VLEED, very low energy electron diffraction). Мотт-детекторы зарекомендовали себя как наиболее надежные и универсальные инструменты измерения спиновой поляризации. Анализ существующих классических детекторов Мотта показал, что повышение скорости счёта требует создания прибора с принципиально новой схемой детектирования электронов.

Второй параграф посвящён разработке нового миниатюрного классического детектора Мотта. При создании нового поляриметра выдвигались следующие требования:

1. Максимально возможная эффективность прибора.

2. Измеряемая поляризация должна соответствовать "истинной" поляризации электронов и не должна зависеть от формы и положения пучка (факторов, приводящих к появлению т. н. "ложной" асимметрии).

3. Детектор должен быть готов к работе через несколько минут после включения. Не должно быть никаких процедур по введению прибора в строй ни до проведения измерений, ни в их процессе. Детектор предназначен для работы без изменения основных параметров в течение многих лет в условиях любого вакуума.

4. Прибор должен быть компактным, пригодным для использования в условиях сверхвысокого вакуума и размещаться на фланце ДУ 100.

5. Детектор должен быть скомпонован из элементов, позволяющих проводить высокотемпературный прогрев (для получения сверхвысокого вакуума).

6. Электронные схемы не должны быть расположены под высоким потенциалом.

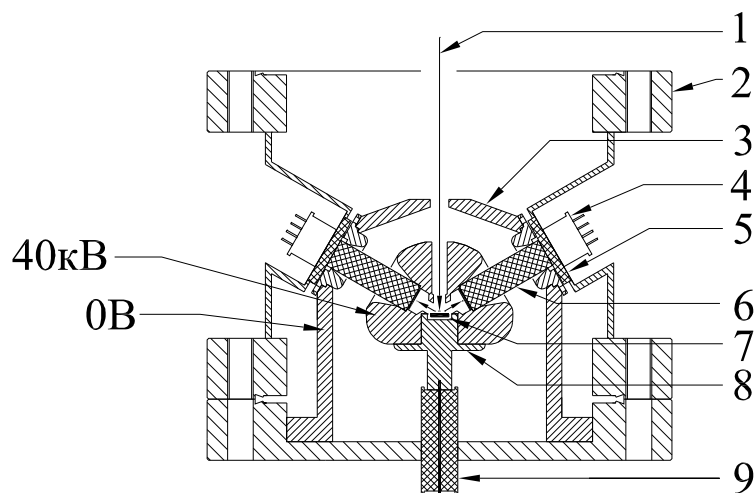


Рис. 7. Схема миниатюрного классического 40 кВ детектора Мотта. 1. Пучок электронов; 2. Фланец ДУ 100; 3. Внешний электрод; 4. Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ); 5. Оптическое окно; 6. Оптический световод с сцинтиллятором на входе; 7. Золотая фольга; 8. Внутренний электрод; 9. Металлокерамический ввод на 40 кВ.

Для удовлетворения этим условиям была использована схема детектора Мотта, в которой электроны после рассеяния движутся в свободном от поля пространстве. Схема нового прибора представлена на рис. 7. Основными компонентами прибора являются два металлических квазисферических электрода. Они обладают плавными радиусами для предотвращения электрического пробоя. Внешний электрод находится под потенциалом земли или близким к нему. Внутренний электрод закреплен на керамическом изоляторе, на

него подается напряжение в 40 кВ. Пучок электронов, поляризацию которого нужно измерить, направляется в область пространства между полусферами через круглое входное отверстие, ускоряется большим электрическим полем и попадает на рассеивающую фольгу. Расчеты электронных траекторий показали, что такое поле хорошо фокусирует входной пучок. Рассеивающая фольга представляет собой слой золота толщиной 800 ангстрем, напыленный на тонкую формваровую подложку. После рассеяния электроны попадают на сцинтилляторы, нанесённые на входное окно световодов, передающих световой сигнал на фотоэлектронные умножители. При этом регистрирующая часть электроники выводится из под высокого потенциала. Использованная схема работы прибора позволила упростить цепи обработки сигнала, уменьшить размеры прибора и увеличить его скорость счёта.

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

1. Показано, что расщепление оже-пика железа в магнетите соответствует ионам двух- и трёхвалентного железа. Более высокоэнергетичная компонента пика при этом связана с ионами двухвалентного железа, а более низкоэнергетичная – трёхвалентного.

2. Установлено, что напыление тонкой плёнки висмута в 2 монослоя на поверхность Fe_3O_4 приводит к более чем двукратному увеличению поляризации оже-пика железа в магнетите. Увеличение поляризации связано со спин-орбитальным взаимодействием оже-электронов при прохождении через плёнку висмута.

3. Получен эффект спинового фильтра в системе $\text{FeNi}_3(110)\text{-Au}$ при толщине плёнки золота в один монослой. Коэффициент селективного пропускания составил 17%.

4. Определена длина свободного пробега электронов относительно спиновой релаксации в висмуте при энергии электронов в 61 эВ. Она вдвое превысила длину свободного пробега электронов относительно неупругих соударений при той же энергии.

5. На поверхности $\text{FeNi}_3(110)$ получена концентрация компонентов близкая к инварной. При такой концентрации поверхностная подрешётка Ni демонстрирует антиферромагнитное, по отношению к объёму, упорядочение.

6. Отработана методика спин-разрешённых экспериментов. Создан миниатюрный классический детектор Мотта. Использование новой схемы работы позволило упростить электронные цепи, уменьшить размеры прибора, увеличить его быстродействие и тем самым повысить точность измерения спиновой поляризации.

Материалы диссертации опубликованы в следующих печатных материалах журналов и конференций:

1. Устинов, А.Б. Инварные свойства поверхности кристалла $\text{FeNi}_3(110)$ по данным спин-поляризационной электронной оже-спектроскопии / А.Б. Устинов, В.Н. Петров // НТВ СПбГПУ. - 2010. - № 3. – С. 151-154.

2. Петров, В.Н. Магнитные свойства поверхности Fe_3O_4 / В.Н. Петров, А.Б. Устинов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования - 2010. - № 5. - С. 40 - 45.

3. Устинов, А.Б. Локальные магнитные свойства поверхности металлов по данным спин-поляризационной электронной оже-спектроскопии / А.Б. Устинов, В.Н. Петров // НТВ СПбГПУ. - 2009. - № 3. - С. 10-16.

4. Устинов, А.Б. Электронная оже-спектроскопия с разрешением по спину системы $\text{FeNi}_3(110)$ / А.Б. Устинов, В.Н. Петров // Тезисы докладов конференции по физике и астрономии «Физика.СПб» - Издательство СПбГПУ, Санкт-Петербург. - 2009. – С. 42-43.

5. Петров, В.Н. Магнитные свойства поверхности Fe_3O_4 / В.Н. Петров, А.Б. Устинов // Сборник трудов XIII международного симпозиума «Нанопизика и наноэлектроника». – ИФМ РАН, Нижний Новгород. – 2009. - Т. 2. – С.504-505.

Цитируемая литература:

1. Gregg, J.F. Spin electronics – a review / J.F. Gregg, I. Petej, E. Jouguelet, C. Dennis // J. Phys. D: Appl. Phys.– 2002. – V. 35. – I. 18. – P. R121-R155.

2. Бриггс, Д. Анализ поверхности методами оже- и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии / Д. Бриггс, М. П. Сих // М.: Мир, 1987. – 600 с.

3. Седов, В.Л. Антиферромагнетизм гамма-железа. Проблема инвара. / В.Л. Седов // М.: Наука, 1987. – 288 с.