

На правах рукописи

Камочкин Алексей Сергеевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ
МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННОЙ ОЖЕ-СПЕКТРОСКОПИИ С
РАЗРЕШЕНИЕМ ПО СПИНУ

Специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2003

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Прогресс технологий создания низкоразмерных магнитных систем, открытие в них новых фундаментальных явлений, важных для понимания самой природы магнетизма, а также перспективы использования наноструктур в новейших приборах и устройствах, в том числе при разработке современных компьютеров, определяют постоянно растущий интерес к этой области физики. Антиферромагнитное межслойное взаимодействие, гигантское магнетосопротивление, открытые в металлических магнитных сверхрешетках, не только заложили новое направление физики магнитных явлений, но также привели к качественному усовершенствованию памяти компьютеров и появлению нового поколения сенсорных устройств. Во многих новейших электронных устройствах используется спиновая степень свободы заряженных частиц. В научной литературе даже появился специальный термин «спинтроника». Поэтому изучение свойств пучков поляризованных по спину электронов приобретает огромное значение.

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 изучать магнитную структуру каждой из компонент, входящих в сложную магнитную систему отдельно и, таким образом, является одной из наиболее мощных инструментов изучения низкоразмерного магнетизма.

Данная работа посвящена исследованию намагниченности подрешеток Fe и Ni, входящих в состав монокристалла FeNi_3 (110), исследованию намагниченности тонких пленок немагнитного ванадия, напыленного на магнитную подложку, а также развитию методов спин-поляризационных экспериментов на базе нового 40 кВ моттовского детектора.

Целями работы являются: 1) Экспериментальное исследование намагниченности поверхности монокристалла FeNi_3 (110) в широком диапазоне температур, а так же тонких пленок ванадия, напыленных на магнитную подложку; 2) Отработка методики спин-поляризационного эксперимента с использованием нового 40 кВ детектора Мотта. В связи с этим, в данной работе необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Создать спектрометр, позволяющий проводить исследования методом СПЭОС.

2. Исследовать спиновую поляризацию в широком диапазоне температур оже-электронов железа и никеля, входящих в состав монокристалла FeNi_3 .

3. Создать модели, позволяющие оценивать локальную намагниченность поверхностных подрешеток на основе данных о поляризации оже-пиков и описать температурную зависимость намагниченности поверхности.

4. Исследовать поляризацию оже-электронов пленок ванадия различной толщины, напыленных на магнитную подложку.

5. Разработать и изготовить новый компактный классический 40 кВ моттовский поляриметр.

Научная новизна работы состоит в том, что впервые:

- Разработана методика оже-электронного эксперимента с разрешением по спину при установке энергоанализатора непосредственно на входе моттовского детектора без электронно-оптической системы.

- Методом СПЭОС исследована локальная намагниченность поверхностных подрешеток железа и никеля, входящих в состав монокристалла FeNi_3

- Предложена модель оценки локальной намагниченности поверхностных подрешеток по данным спин-разрешенных оже-спектров.

- Экспериментально установлено, что при температурах, близких к температуре Кюри и в слабых магнитных полях как Fe, так и Ni на поверхности монокристалла FeNi_3 (110) антиферромагнитным образом упорядочены относительно объема. Однако, при увеличении внешнего магнитного поля намагниченность на поверхности устанавливается вдоль поля.

- Исследована локальная намагниченность ванадия и железа при напылении тонких пленок ванадия на поверхность монокристалла FeNi_3 .

- Установлено, что при толщинах пленок ванадия ~ 2 монослоя атомы ванадия упорядочены антиферромагнитным образом относительно подложки. Направление этого упорядочивания сохраняется при переходе к более толстым пленкам.

- Предложена методика спин-поляризационного эксперимента с использованием нового 40 кВ детектора Мотта.

Практическое значение работы.

1. Создана экспериментальная установка, которая проводить исследования поверхностей твердых тел методом СПЭОС. Установка оснащена специально разработанным спектрометром, состоящим из энергоанализатора электронов и 60 кВ детектора Мотта.

2. Создан высокоэффективный компактный 40 кВ анализатор спиновой поляризации электронов по схеме классического моттовского детектора. Поляриметр обладает высокой стабильностью измеряемой асимметрии рассеяния как во времени, так и по отношению к положению входного анализируемого электронного пучка и позволяет проводить спин-поляризационные измерения в условиях сверхвысокого вакуума.

3. Предложенная методика спин-поляризационного эксперимента с применением нового 40 кВ детектора Мотта может быть использована в аналогичных высоковольтных детекторах спиновой поляризации электронов без задерживающего поля.

4. Экспериментальные данные о локальном магнетизме, полученные при исследовании монокристалла FeNi_3 (110), имеют важное значение для понимания механизмов, определяющих поляризацию оже-электронов, и природы магнетизма поверхности бинарных сплавов.

5. Экспериментальные данные о магнетизме тонких пленок немагнитного ванадия на поверхности магнитной подложки могут быть использованы для оптимизации режимов роста многослойных магнитных металлических систем, используемых в современной нанoeлектронике.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Экспериментальная установка, оснащенная спектрометром, созданным на основе специально разработанного энергоанализатора и 60 кВ детектора Мотта позволяет проводить исследование магнитной и химической структуры поверхности методом спин-поляризационной электронной оже-спектроскопии,

2. На основе предложенной в диссертации методики с помощью 40 кВ детектора Мотта без задерживающего поля. можно проводить комплекс экспериментальных исследований с поляризованными электронами.

3. Экспериментальные данные по поляризации оже-электронов Fe и Ni, входящих в состав монокристалла FeNi_3 (110) в широком диапазоне температур дают новую фундаментальную информацию о магнетизме поверхности упорядоченных сплавов.

4. Предложенная в диссертации связь между поляризацией оже-спектров и намагниченностью приповерхностных слоев монокристалла FeNi_3 позволяет построить модель, описывающую поведение намагниченности в окрестности точки Кюри.

5. Экспериментальные оже-спектры с разрешением по спину тонких пленок ванадия на поверхности монокристалла FeNi_3 (110) демонстрируют индуцированную

намагниченность ванадия, в направлении противоположном намагниченности подложки вплоть до толщин в 12 монослоев.

Апробация результатов работы.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на «3rd International SLS Workshop on Synchrotron Radiation» (Ле Диаблеретс, Швейцария, 2000), VII Санкт-Петербургской ассамблее молодых ученых и специалистов «молодые ученые – промышленности северо-западного региона» (Санкт-Петербург, 2002), VII Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы «Фундаментальные исследования в технических университетах» (Санкт-Петербург, 2003), на международном семинаре участников проекта ИНТАС «Tunnig of exchange coupling with hydrogen: playground for study of low-dimensional magnetism» (Бохум, Германия, 2003), на семинарах кафедры экспериментальной физики СПбГПУ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 печатных работ, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Полный объем диссертации составляет 109 страниц, включая 33 рисунка и список цитируемой литературы из 83 наименований.

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.

Во втором параграфе рассмотрены вопросы, связанные со 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 - испущенные твердотельные электроны с поляризацией, определяемой поляризацией зоны. Здесь же

проиллюстрировано влияние обменных процессов на поляризацию в случае рассеяния Мюллера. Анализ приведенных данных позволяет сделать вывод о том, что вероятность спин-обменных процессов при образовании электронных каскадов в твердом теле относительно невелика. Однако в связи с многообразием и сложностью механизмов, приводящих к поляризации спектра вторичных электронов, до сих пор не существует простого и удобного метода ее оценки.

Третий параграф посвящен описанию электронной оже-спектроскопии (ЭОС). Облучение поверхности вещества пучком электронов с энергией 1-10 кэВ приводит к ионизации атомов вещества и образованию свободных вакансий (дырок) на внутренних электронных уровнях. Эти вакансии могут быть заполнены за счет перехода электрона в атоме с более высокого уровня. Энергия, выделяющаяся в результате такого перехода, может быть передана другому электрону атома, расположенному на том же или более высоком уровне. Этой энергии может оказаться достаточно, чтобы электрон покинул атом. Такой процесс носит название оже-процесса, а соответствующие электроны называются оже-электронами. Таким образом, оже-электроны 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. Поэтому ЭОС является элементочувствительным методом. Кроме этого, в ЭОС регистрируются только те оже-электроны, которые до выхода из вещества в вакуум не потеряли своей энергии, т. е. не испытали неупругого рассеяния. Поскольку средняя длина свободного пробега относительно неупругого взаимодействия для оже-электронов невелика ($\sim 5 \div 10 \text{ \AA}$), то в ЭОС регистрируются только оже-электроны, испущенные из очень тонкого приповерхностного слоя вещества (2-3 монослоя). Поэтому ЭОС является очень чувствительным методом для исследования поверхности веществ.

Четвертый параграф посвящен анализу экспериментальных и теоретических работ, посвященных исследованию магнитных свойств поверхности методом спин-поляризационной электронной оже-спектроскопии (СПЭОС). 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 (и их сплавов) поляризована. Поэтому изучение поляризации оже-переходов, в которых участвуют 3d

электроны, может дать информацию о поляризации валентной зоны этих веществ и, следовательно, об их намагниченности.

Вторая глава посвящена описанию экспериментального комплекса для проведения измерений методом СПЭОС и методики проведения экспериментов. 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 электронов по энергии и по спину. Спектрометр состоит из двух частей: энергоанализатора электронов на базе АЦЗ (анализатор типа «цилиндрическое зеркало») и детектора Мотта. Из-за большого угла выхода электронов использование стандартного АЦЗ оказывается невозможным. При активном участии автора диссертации был разработан и создан новый энергоанализатор. Он состыкован с детектором Мотта (также представляющим собой оригинальную разработку), причем для проведения электронов, выходящих из энергоанализатора, в детектор Мотта не используется электронно-оптическая система, а применяется всего один корректирующий электрод. Схема спектрометра приведена на рис. 1.

В этом же параграфе описывается другое экспериментальное оборудование, разработанное и использованное в эксперименте : электронная и ионная пушки; источник напыления ванадия и железа; оборудование для проведения исследований методом магнитооптического эффекта Керра; система откачки и т. д. Приведено подробное описание образца и держателя образца, включающего в себя сетку с люминофором, молибденовую подложку по форме образца для его прогрева, катушку намагничивания. Сам образец - монокристалл FeNi_3 (110) - был изготовлен в виде рамки, стороны которой ориентированы вдоль осей легкой намагниченности [111]. Образец намагничивался до насыщения пропусканием импульса тока по катушке, представляющей несколько витков провода навитых вокруг одной из сторон рамки. Поскольку ЭОС является поверхностно-чувствительным методом, при проведении измерений предъявлялись особые требования к чистоте исследуемой поверхности. Измерения проводились в условиях сверхвысокого вакуума (не хуже $5 \cdot 10^{-10}$ Торр) и использовались специальные процедуры очистки. Например, для очистки поверхности образца применялся отжиг при температуре 700 К и ионное травление в атмосфере аргона.

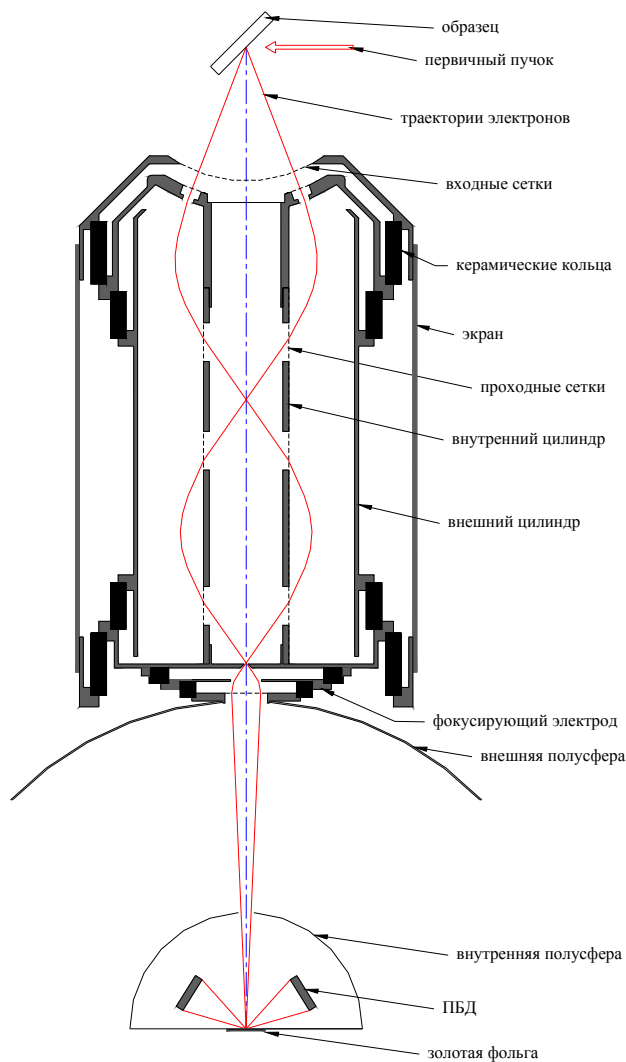


Рис.1. Схема нового спектрометра для проведения измерений методом СПЭОС. Спектрометр состоит из энергоанализатора электронов (АЦЗ) и 60 кВ классического моттовского детектора

Второй параграф посвящен описанию методики проведения измерений. При проведении исследований использовались два основных типа измерений: 1) Запись спин-поляризационного оже-спектра и 2) запись (поляризационной) петли гистерезиса для электронов с определенной энергией. В первом случае измерялась зависимость количества зарегистрированных электронов в двух каналах детектора Мотта от их энергии; во втором - зависимость поляризации вторичных электронов от величины тока намагничивания, т. е. от величины внешнего магнитного поля.

При исследовании магнитных свойств образец намагничивался внешним магнитным полем. Это поле, однако, искажает траектории как первичного пучка, так и вторичных электронов, что негативно сказывается на чувствительности измерений. Поэтому были разработаны режимы измерений, позволяющие устранять влияние внешнего магнитного поля на результат измерений.

В третьей главе приведены экспериментальные данные, полученные при исследовании поляризации оже-электронов железа и никеля, входящих в состав монокристалла FeNi_3 . Здесь же предложен метод обработки спектров, связывающий поляризацию оже-пиков с плотностью электронных состояний соответствующих электронов, и модель, описывающая поведение намагниченности Fe и Ni при температурах, близких к температуре Кюри.

Первый параграф содержит экспериментальные спектры оже-электронов железа и никеля, поверхностной области монокристалла FeNi_3 с разрешением по спину. Были исследованы как высоковольтные пики в диапазоне 590 ÷ 850 эВ, так и низковольтные пики с энергиями 47 эВ (Fe) и 61 эВ (Ni). Низковольтный оже-спектр с разрешением по спину приведен на рис. 2. Пики никеля поляризованы гораздо слабее пиков железа. Это позволило сделать вывод о том, что намагниченность поверхности монокристалла FeNi_3 обусловлена в основном намагниченностью подрешетки Fe. Отметим, что оже-процесс $L_3M_{23}M_{23}$ ($2p3p3p$), соответствующий пику железа 597эВ, протекает без участия 3d электронов. Обнаруженная в эксперименте спиновая асимметрия говорит о том, что в атоме 3p оболочка поляризуется под действием 3d электронов.

Во втором параграфе полученные экспериментальные спектры связываются с характеристиками зонной структуры соответствующих электронов. В некоторых металлах (в частности, в Fe) CVV оже-переходы хорошо описываются самосверткой плотностей электронных состояний. Для других металлов (в частности, для Ni) такой подход не является абсолютно корректным. Один из экспериментально измеренных CVV пиков железа - $L_3M_{45}M_{45}$ - смешан с пиком никеля $L_3M_{23}M_{23}$, поэтому он неудобен для анализа. В связи с этим в работе рассмотрен только низковольтный пик железа, соответствующий $M_3M_{23}M_{23}$ переходу. При проведении расчетов и сравнении полученных данных с экспериментальными было установлено, что на поляризацию оже-электронов существенное влияние оказывают процессы, протекающие с переворотом спина электронов. Поэтому при расчетах необходимо использовать коэффициенты $M_{\uparrow\uparrow}$ и $M_{\uparrow\downarrow}$, которые соответствуют вероятностям протекания оже-процесса без переворота и с переворотом спина соответственно. Расчеты показали, что отношение $M_{\uparrow\downarrow}/M_{\uparrow\uparrow} = 1.6$, согласуется с имеющимися данными для чистого железа [1].

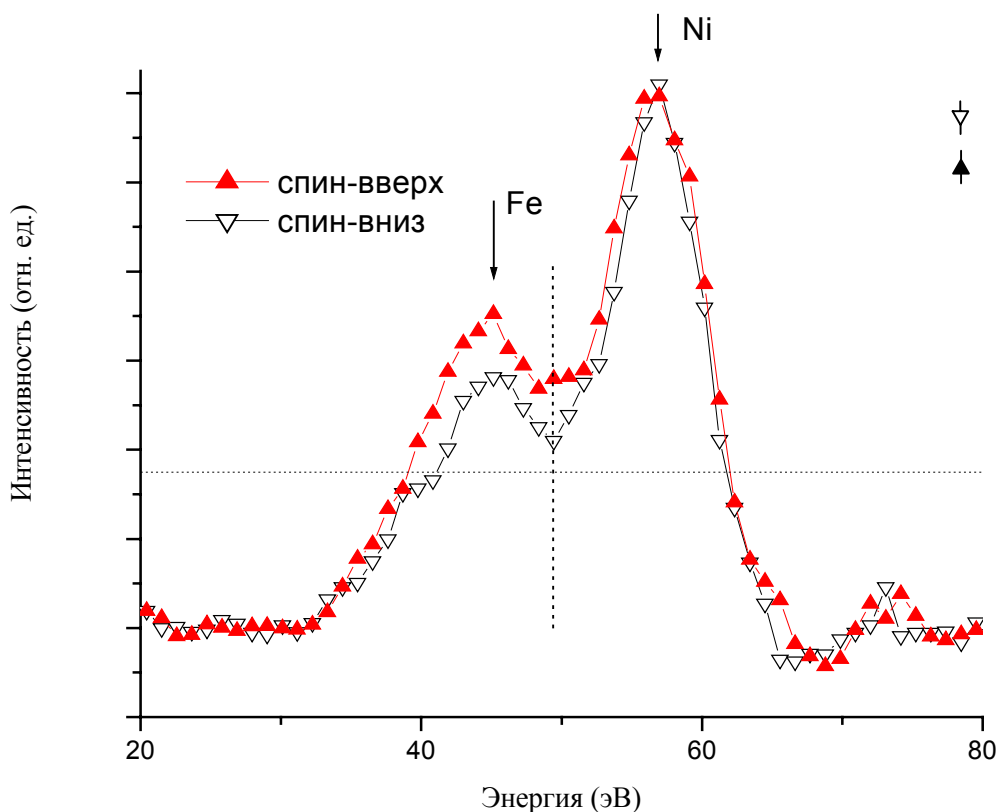


Рис. 2. Спин-разрешенные оже-пики железа и никеля после вычитания фона, соответствующие $M_{23}M_{45}M_{45}$ ($3p3d3d$) переходу.

Кроме этого, по аналогии с описанной моделью был проведен анализ оже-пика железа, соответствующего $L_3M_{23}M_{24}$ переходу. Вместо самосвертки плотности электронных состояний проводилась свертка плотности электронных состояний с аппаратной функцией энергоанализатора, которая представлялась как функция Гаусса, с шириной, определяемой абсолютным разрешением энергоанализатора. Результат расчета показал, что процессы с переворачиванием спина играют более существенную роль в оже-процессах, в которых участвуют глубокие уровни.

Третий параграф посвящен исследованию температурной зависимости намагниченности поверхности монокристалла $FeNi_3$. Исследования проводились в несколько этапов. На первом этапе изучалась зависимость поляризации вторичных электронов при наличии внешнего магнитного поля от температуры. Полученная кривая хорошо согласуется с теоретическими данными и данными из других экспериментов. На втором этапе в режиме с остаточной намагниченностью проводилось измерение температурной зависимости поляризации низковольтных оже-

пиков железа и никеля. Обнаружено, что в определенном диапазоне температур вблизи температуры Кюри поляризация оже-электронов Fe и Ni меняет знак, что свидетельствует о том, что направление намагниченности поверхности изменяется на противоположное. Таким образом, поверхность становится антиферромагнитным образом упорядоченной относительно объема. Для более детального исследования этого вопроса были записаны петли гистерезиса для электронов с энергией 47 эВ (соответствующей пику Fe) при различных температурах. При определенных температурах наблюдалось аномальное поведение петель. Эти данные подтвердили предположение об антиферромагнитном упорядочении поверхности относительно объема.

В четвертом параграфе рассмотрена модель поведения намагниченности поверхности монокристалла FeNi_3 в широком диапазоне температур с учетом внешнего магнитного поля. В этой модели учитывалось, что вблизи температуры Кюри в слабых магнитных полях намагниченность поверхности сплава FeNi_3 ориентирована противоположно направлению поля. При возрастании внешнего поля направление намагниченности поверхности устанавливается вдоль поля.

Четвертая глава посвящена изучению намагниченности тонких пленок ванадия, напыленных на поверхность (110) кристалла FeNi_3 . Несмотря на то, что ванадий в объеме не является магнитным, у него может возникать наведенный магнитный момент в системах, где он взаимодействует с магнитными партнерами - такими, как железо. Изолированный атом ванадия в основном состоянии имеет магнитный момент $3\mu_B$. Расчеты показывают, что некоторое увеличение постоянной решетки, изменение координационного числа на поверхности или гибридизация между V и Fe орбиталями может вызывать появление локального магнитного момента на атомах ванадия [2].

Ванадиевые пленки с помощью термического испарительного устройства напылялись на хорошо подготовленную поверхность монокристалла FeNi_3 при комнатной температуре. Во время напыления давление поддерживалось на уровне $8 \cdot 10^{-9}$ Торр. Чистота подложки и слоев контролировалась с помощью оже-электронного анализа. Толщина пленок определялась посредством относительного измерения интенсивностей Fe, Ni и V оже-пиков во время напыления.

Спин-разрешенные оже-пики V и Fe регистрировались для пленок толщиной в 1, 2 и 5 монослоев. Поляризация пика Ni не исследовалась из-за того, что ее величина оказалась значительно меньше поляризации пика Fe. При толщине V пленки в 1

монослой в пределах погрешности эксперимента расщепления оже-пики V обнаружено не было.

На рис. 3 представлены спин-разрешенные оже-пики V и Fe при различных толщинах пленки ванадия. Здесь также для сравнения приведен пик Fe измеренный на чистой поверхности FeNi₃. Эти пики соответствуют L₃M₂₃M₄₅ переходу, в котором участвует один 3d-электрон. В течение всего процесса валентные электроны подвергаются воздействию присутствующей в атоме дырки (сначала 2p, потом 3p). Данный пик отражает плотность состояний, модифицированной дополнительной дыркой. Эта линия была использована для количественной оценки намагниченности.

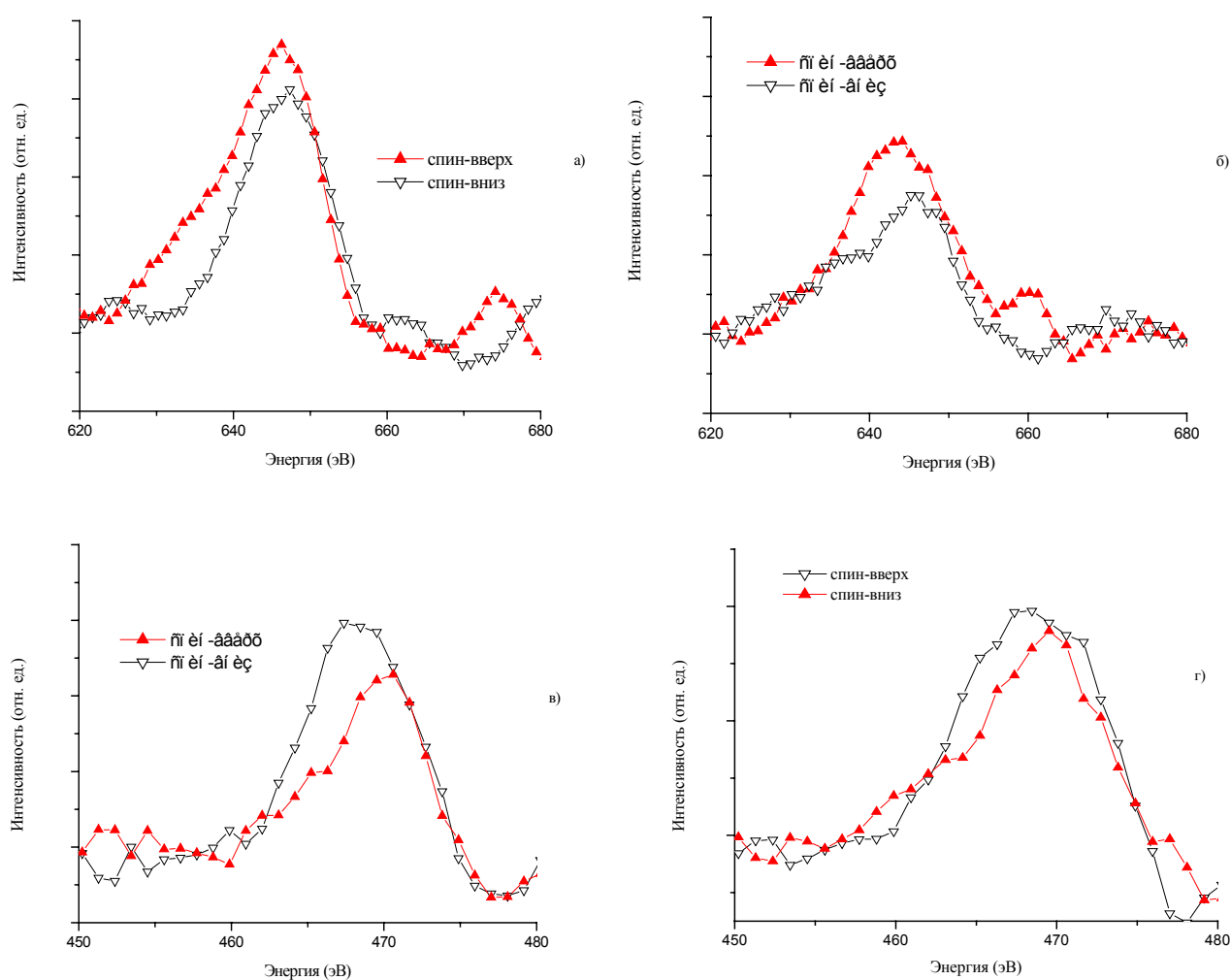


Рис. 3. Спин-разрешенные оже-пики: (а) железа до напыления ванадия; (б) железа после напыления пленки ванадия толщиной ~2 монослоя; (в) ванадия при толщине пленки ~2 монослоя; (г) ванадия при толщине пленки ~12 монослоев.

Видно, что поляризация пика ванадия при толщине пленки ~ 2 монослоя противоположна поляризации пиков Fe и Ni, что говорит об антиферромагнитном упорядочивании пленки V относительно подложки. Зарегистрированная значительная поляризация пика $P = 14\%$ позволяет говорить о большом магнитном моменте пленки V толщиной 2 монослоя. Используя методику расчета намагниченности по поляризации пиков, соответствующих $L_3M_{23}M_{45}$ переходам, описанную в главе 3, можно оценить локальный момент на атомах V. Он составляет около $0.7\mu_B$.

При исследовании толстых пленок ванадия оказалось, что даже при толщине 12 монослоев (рис.3 (г)) намагниченность V не обращается в ноль, но составляет величину порядка $0,15\mu_B$. Это может быть связано с наличием в пленке диффузных атомов Fe.

Намагниченность подрешетки Fe при напылении пленки V толщиной 2 монослоя не убывает в пределах точности эксперимента. Следовательно, покрытие кристалла тонким слоем ванадия не приводит к уменьшению намагниченности приповерхностных атомов Fe. При толщине пленки в 12 монослоев интенсивность оже-пика Fe мала, что не позволяет провести детальные спин-разрешенные исследования.

Пятая глава посвящена описанию нового 40 кВ детектора Мотта. В первом параграфе приводятся основные определения и формулы, используемые при проведении измерений поляризации при помощи моттовских детекторов. Одной из основных характеристик моттовского детектора является эффективность ϵ . Абсолютная погрешность измерения поляризации электронного пучка определяется через ϵ по формуле $\Delta P = 1/\sqrt{\epsilon N_0}$, где N_0 - число электронов на входе. Таким образом, чем больше эффективность поляриметра, тем меньшее число электронов необходимо зарегистрировать для того, чтобы провести измерения с необходимой погрешностью. Поэтому при разработке 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 (факторы, приводящие 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, ни в процессе работы. Детектор должен работать без изменения основных параметров в течении многих лет в условиях любого вакуума.
4. Прибор должен быть компактным, пригодным для использования в условиях

сверхвысокого вакуума, и должен размещаться на фланце не более чем ДУ100.

Для удовлетворения этим условиям нами была выбрана схема классического детектора Мотта. Во втором параграфе приводится описание конструкции прибора. Схема нового моттовского детектора представлена на рис. 4. Основными компонентами прибора являются две металлические, отполированные концентрические полусферы. Радиусы внутренней и внешней полусфер составляют 30 мм и 50 мм соответственно. Внешняя полусфера находится под потенциалом земли или близким к нему, на внутреннюю подается напряжение порядка 40 кВ. Внутренняя полусфера закреплена на керамическом изоляторе, рассчитанном на напряжение 60 кВ. Пучок электронов, поляризацию которого мы хотим измерять, направляется в область пространства между полусферами через круглое входное отверстие во внешней полусфере, ускоряется большим электрическим полем между полусферами, и попадает на вход внутренней полусферы. Расчеты электронных траекторий показали, что такое поле хорошо фокусирует входной пучок. Внутри внутренней полусферы расположены четыре поверхностно-барьерных детектора (ПБД) с рабочей поверхностью большой площади ($\sim 1 \text{ см}^2$ каждый) и золотая фольга. Рассеивающая фольга представляет собой

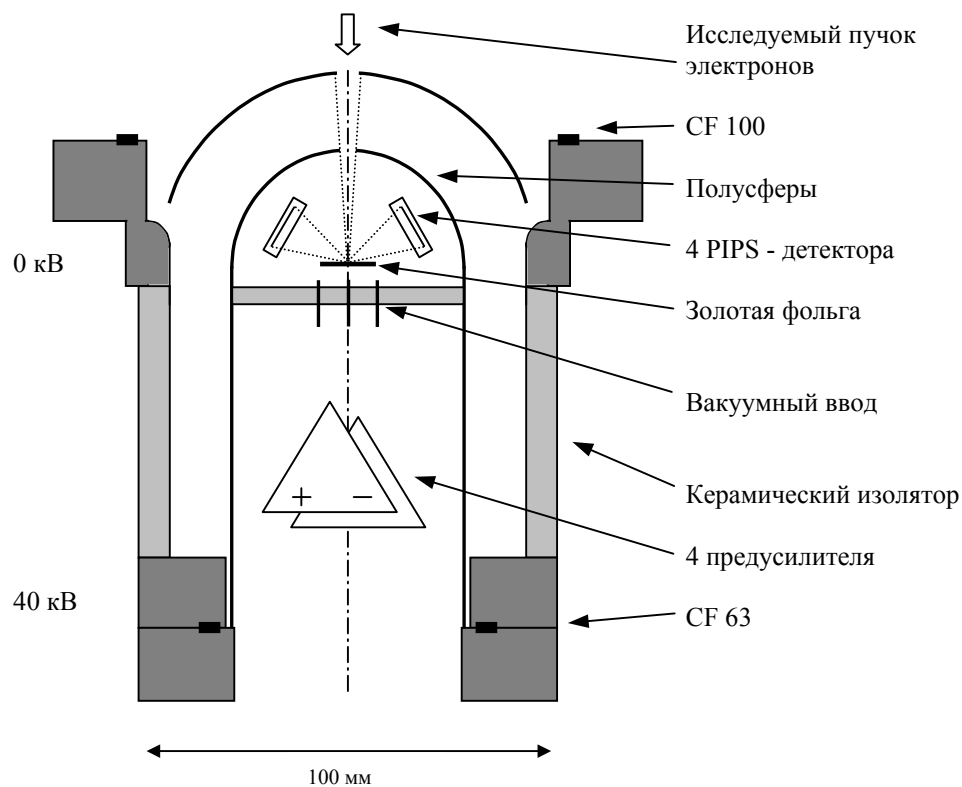


Рис. 4. Схема нового компактного классического 40 кВ детектора Мотта

слой золота толщиной 800 \AA , напыленного на тонкую формваровую подложку. После рассеяния электроны движутся в свободном от электрического поля пространстве и регистрируются ПБД. При анализе асимметрии рассеяния необходимо проводить селекцию вторичных электронов по энергии, поскольку максимальная асимметрия, как известно, достигается при упругом рассеянии. Это связано с тем, что при неупругом рассеянии теряется информация о спине электронов и измеряемая асимметрия уменьшается. Для проведения селекции электронов в нашем детекторе Мотта, как уже было сказано выше, используются ПБД, амплитуда выходных импульсов которых пропорциональна энергии падающих электронов. После усиления и дискриминации этих импульсов на определенном уровне, частоту их следования можно считать пропорциональной числу упруго рассеянных в единицу времени электронов.

В третьем параграфе содержится описание испытаний и отработка методики проведения спин-поляризационных измерений, которые проходил новый детектор Мотта. В первую очередь проводились высоковольтные испытания, затем проводились испытания электроники для определения соотношения сигнал/шум. На последнем этапе проводилась калибровка моттовского детектора с целью определения его эффективной функции Шермана и эффективности. Эффективность детектора оказалась равной $\epsilon=5.6 \times 10^{-4}$. Эта величина в настоящее время является рекордной для детекторов Мотта.

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

1. Создана экспериментальная установка, позволяющая проводить измерения методом спин-поляризационной оже-спектроскопии. Основной частью установки является спектрометр, состоящий из оригинального энергоанализатора и состыкованного с ним детектора Мотта.

2. Для исследования намагниченности поверхности монокристалла FeNi_3 (110) были экспериментально получены спин-разрешенные оже-спектры железа и никеля. Установлено, что намагниченность поверхности этого сплава определяется намагниченностью подрешетки железа, в то время как подрешетка никеля намагничена слабо.

3. Установлено, что в определенном интервале температур вблизи температуры Кюри на поверхности монокристалла FeNi_3 (110) подрешетки Fe и Ni антиферромагнитным образом упорядочены относительно объема. Предложена модель, описывающая такое поведение намагниченности Fe и Ni.

4. Экспериментально получены спин-разрешенные оже-спектры тонких пленок ванадия, напыленных на поверхность монокристалла FeNi_3 (110). Установлено, что под действием магнитной подложки пленка ванадия намагничивается, причем направление намагниченности противоположно направлению намагниченности подложки. Установлено, что увеличение толщины пленки до 12 монослоев не приводит к изменению направления намагниченности ванадия.

5. Создан новый эффективный 40 кВ детектор Мотта и отработана методика проведения на нем спин-поляризационных экспериментов.

Материалы диссертации опубликованы в следующих печатных материалах журналов и конференций:

1 Petrov V.N., Galaktionov M.S., Kamochkin A.S. Surface magnetisation of single crystals // Book of abstracts of 3rd International SLS Workshop on Synchrotron Radiation, Les Diablerets, Switzerland, 16-20 October 2000, p. 37.

2. Петров В.Н., Галактионов М.С., Камочкин А.С. Исследование стабильности моттовских анализаторов поляризации электронов // Журнал технической физики, 2001, том 71, вып 12.

3. Petrov V.N., Galaktionov M.S., Kamochkin A.S. Comparative tests of conventional and retarding-potential Mott polarimeters // Review of Scientific Instruments Vol. 72, No. 9, 2001, p 3728.

4. Камочкин А.С., Петров В.Н. Новый спектрометр для оже-электронного анализа с разрешением по спину // Сб. тезисов VII Санкт-Петербургской ассамблеи молодых ученых и специалистов «молодые ученые – промышленности северо-западного региона», СПб 2002, стр. 83.

5. New compact classical 40 kV Mott polarimeter / V.N. Petrov, V.V. Grebenshikov, B.D. Grachev, A.S. Kamochkin // Review of Scientific Instruments Vol 74, No 3, 2003, p 1278.

6. Камочкин А.С., Петров В.Н. Исследование магнитных свойств тонких пленок ванадия методом электронной Оже-спектроскопии с разрешением по спину // Сб. тезисов VII Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы «Фундаментальные исследования в технических университетах» СПб 2003.

7. Компактный эффективный анализатор спиновой поляризации электронов / Петров В.Н., Гребенщиков В.В., Камочкин А.С. и др. // Письма в Журнал Технической Физики, 2004, т. 30, вып. 4. с.62-70.

Цитируемая литература

1. Sinkovich B., Shekel E., Hubert S.L. Spin-Resolved Fe $L_3M_{45}M_{45}$ Auger transition on and off resonance: the effect of exchange correlation // Phys. Rev. B Vol. 52, No. 23, 1995 R15703.
2. Spisak D., Hafner J. Magnetic properties of thin vanadium films on iron // Phys. Rev. B Vol. 61 No. 6, 2000 p. 4160