

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

14-97-98

На правах рукописи
УДК 538.975

П-19

ПАСЮК
Валерия Викторовна

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНЕТИЗМА
В УЛЬТРАТОНКИХ ПЛЕНКАХ
МЕТОДОМ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ
ПОЛЯРИЗОВАННЫХ НЕЙТРОНОВ

Специальность: 01.04.07 — физика твердого тела

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1997

Работа выполнена в научно-экспериментальном отделе физики конденсированных сред Лаборатории Нейтронной Физики им. академика И.М.Франка
Объединенного Института Ядерных Исследований

Научный руководитель - доктор физико-математических наук,
профессор, Аксенов В. Л.

Официальные оппоненты - доктор физико-математических наук,
Ковальчук М.В.

- доктор физико-математических наук,
Матвеев В.М.


Ведущая организация - Петербургский институт ядерной физики
РАН им. Б.П. Константинова, г.Гатчина

Защита состоится 21 мая 1997 г. на заседании специализированного совета Д 047.01.05 при Лаборатории нейтронной физики, Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ (141980, Московская обл., г. Дубна, ОИЯИ).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан " _____ " _____ 1997 г.

Ученый секретарь
специализированного совета

 Попеко А.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время наблюдается большой интерес к магнетизму в системах с пониженной размерностью, таких как ультратонкие магнитные пленки, поверхности, межграничные области. Резкое обрывание кристаллической решетки и отсутствие ближних соседей в поверхностном слое, изменение композиционного состава в многослойных пленках, переход к 2-мерным структурам приводит к возникновению экзотических свойств, таких как увеличение или уменьшение магнитного момента на атом, возникновение магнетизма в немагнитных материалах, существование сложных магнитных упорядочений. До недавнего времени изучение 2-мерного магнетизма было ограничено отсутствием пленок высокого качества. Недавний технический прогресс дал возможность получения ультратонких пленок высокого качества со стабильной или метастабильной кристаллической структурой. Появление ряда методов эпитаксиального выращивания пленок открыло отдельную область в физике твердого тела - *магнетизм ультратонких пленок*. Экспериментальное изучение магнитных свойств тонких пленок и поверхностей потребовало развития различных методов для измерения слабых магнитных эффектов.

Метод рефлектометрии поляризованных нейтронов (РПН) является уникальным для измерения магнетизма ультратонких пленок. Основное достоинство РПН заключается в том, что этот метод является неразрушающим и позволяет измерить абсолютную величину намагниченности на глубине до 5000 Å от поверхности. Таким образом, проведение экспериментов с использованием метода РПН по изучению особенностей магнетизма ультратонких пленок является весьма актуальным для понимания физики этих систем.

Целью диссертационной работы являлось экспериментальное исследование методом РПН магнитного момента основного состояния ультратонких пленок 3d-переходных металлов, влияния эффектов изменения зонной структуры и межатомной гибридизации атомов в межграничной области в случае (3d - 3d) и (3d - 4d) взаимодействия переходных металлов на магнитные свойства трехслойных систем; изучение возникновения наведенной намагниченности в атомах немагнитных переходных

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

металлов; исследование поглощающих слоев и их влияния на поляризующую способность магнитных нейтронных зеркал.

Научная новизна.

1. Прямое измерение магнитного момента атомов Fe в основном состоянии для ультратонких пленок является необходимым для понимания двумерного магнетизма. Особенно интересен случай, когда монослой магнитного переходного металла нанесен на немагнитный переходный металл (например, Fe/W(110)), так как вследствие эффекта гибридизации d-оболочек возникают особые магнитные свойства: уменьшение магнитного момента пленки и возможная поляризация подложки или покрывающего слоя. Полученные нами результаты впервые экспериментально подтвердили предсказанное теоретически [1] уменьшение магнитного момента атомов Fe, нанесенных на W подложку по сравнению с поверхностным слоем объемного Fe.

2. Впервые с использованием метода РПН исследована намагниченность трехслойной системы Pd/Co(21Å)/Pd, для которой теоретические расчеты [2] показывают существование поляризационных эффектов в слое Pd, прилежащем к межграничной области с Co. Впервые методом РПН измерено увеличение магнитного момента в изучаемой системе, которое мы относим к существованию индуцированного магнитного момента, равного $0.4 \mu_B$ в двух монослоях Pd, прилежащих к обеим Pd/Co границам.

3. Впервые экспериментально исследована спектральная зависимость длины рассеяния гадолиния и его сплава с титаном в тепловой области энергий нейтронов.

4. Впервые выяснены причины наблюдающегося сильного падения поляризующих свойств ферромагнитных зеркальных нейтронных волноводов в длинноволновой части спектра. Предложена возможность создания нового поглощающего сплава для поляризующих нейтронных волноводов с существенно меньшей отражающей способностью на основе бора.

Практическое значение.

1. Показано, что метод рефлектометрии поляризованных нейтронов позволяет измерять магнитные эффекты в ультратонких магнитных пленках вплоть до нескольких монослоев.

2. Исследованы особенности намагниченности в Pd/Co/Pd системе, используемой в магнито-оптических запоминающих устройствах высокой плотности.

3. Изучены причины падения степени поляризации пучка с ростом длины волны нейтронов. Предложены поглощающие слои на основе Cd и В оптимизированные на минимум отражения для создания поляризующих зеркал с высокой степенью поляризации в широком интервале длин волн тепловых нейтронов.

Апробация работы. Результаты исследований, изложенных в диссертации, докладывались на XXV и XXVI школах в Закопане "Condensed matter studies by nuclear methods" (Закопане, Польша, 1990 и приглашенный доклад в 1991 г.), 2 International Conference "Surface X-Ray and Neutron Scattering" (приглашенный доклад, Bad Honnef, Германия 1991 г.), 3 International Symposium on Surface Science" (La Plagne, Франция 1992 г.), 6th International conference on solid films and surfaces (Париж, Франция, 1992 г.), "Symposium on magnetic ultra thin film, multilayers and surfaces" (Лион, Франция, 1992 г.), 3 International Conference "Surface X-Ray and Neutron Scattering, Дубна, 1993 г.), 14th International Colloquium on magnetic films and surfaces (Дюссельдорф, Германия 1994 г.), на семинарах Петербургского института ядерной физики РАН (Гатчина), Института полупроводников АН Украины (Киев), Университета г. Констанц (Германия), Лаборатории магнетизма Louis Neel CNRS (Гренобль, Франция), Института Лауэ-Ланжевена (Гренобль, Франция), отдела физики конденсированных сред Лаборатории Нейтронной Физики им. И.М.Франка ОИЯИ.

Публикации. По результатам диссертации опубликовано 11 статей.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из пяти глав, приложения, заключения и списка литературы. Работа изложена на 100 страницах, включает 25 рисунков и 7 таблиц. Список литературы содержит 111 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава состоит из трех частей.

В первой части обосновывается интерес к изучению вопросов, рассматриваемых в диссертации.

Во второй части обсуждаются особенности магнетизма в системах с пониженной симметрией. Дается обзор теоретических работ о современных методах, используемых для описания магнетизма ультратонких пленок, поверхностей и межграничных областей. Приводится обзор экспериментальных методов,

используемых для изучения слабых магнитных эффектов, анализируются их возможности и пределы. Далее приводится описание работ, в которых метод РПН был применен для исследования магнетизма ультратонких пленок и многослойных магнитных структур. В конце второй части формулируются основные проблемы, исследуемые в диссертации.

В третьей части данной главы изложены основные результаты, выносимые на защиту.

Вторая глава состоит из пяти частей.

В первой части описывается спектрометр поляризованных нейтронов (СПН) на импульсном реакторе ИБР-2, работающий по методу времени пролета, на котором были выполнены основные эксперименты по исследованию магнетизма в ультратонких пленках, обсуждаемые в диссертации [3].

Во второй части рассматривается метод получения коэффициента отражения в эксперименте по методу времени пролета, рассматриваются вопросы корректного учета фона, нормировки функции коэффициента отражения. Для получения коэффициента отражения в эксперименте по времени пролета, нужно измерить спектральные зависимости падающего $I_0(\lambda)$ и отраженного $I_r(\lambda)$ пучков при фиксированном угле падения θ . Для учета фона измеряются фоновые спектры $I_{ob}(\lambda)$ и $I_{rb}(\lambda)$ падающего и отраженного пучков с Cd затвором на детекторе. Тогда экспериментальный коэффициент отражения вычисляется по следующей формуле

$$R_{\text{exp}}(Q(\lambda_i, \theta)) = \frac{[I_r(\lambda_i) - I_{rb}(\lambda_i)]}{[I_0(\lambda_i) - I_{ob}(\lambda_i)]} f, \quad (1)$$

где Q - переданный импульс, f - нормировочный фактор. Абсолютная шкала (и, следовательно, нормировочный фактор f) определяется нормировкой области полного отражения на единицу. Необходимость нормировки возникает в том случае, когда проекция образца длиной l ($l \sin \theta$) меньше, чем сечение падающего пучка. Нормировка на единицу верна только в том случае, если образец не содержит поглотитель, в противном случае следует пользоваться или геометрическим фактором, или обеспечить полное перекрытие образцом сечения пучка.

Чтобы при вычислении экспериментального коэффициента отражений R_{exp} по формуле (2.2) не ухудшать статистические ошибки из-за малой интенсивности Cd фона, производится

предварительная подгонка фоновых спектров полиномиальными функциями $I_{rb\text{theor}}$ и $I_{ob\text{theor}}$, которые и используются в расчетах.

В третьей части обсуждается учет функции поляризации $P(\lambda)$, рассматривается способ коррекции экспериментально измеренных отраженных интенсивностей на неидеальность функции поляризации. Для получения экспериментальных коэффициентов отражения R^+ и R^- , откорректированных на спектральные зависимости функции $P(\lambda)$ поляризации и эффективности спин-флиппера $f(\lambda)$ для случая поляризационного эксперимента без анализа поляризации в отраженном пучке, коррекция экспериментальных интенсивностей I^+ и I^- проводилась по следующим формулам:

$$R^+(\lambda) = \frac{1}{k} \left(\frac{[1 - P(\lambda)[1 - 2f(\lambda)](I^+ - I_{rb}) - [1 - P(\lambda)](I^- - I_{rb})}{2f(\lambda)P(\lambda)(I_0 - I_{ob})} \right) \quad (2)$$

$$R^-(\lambda) = \frac{1}{k} \left(\frac{[1 - P(\lambda)[1 - 2f(\lambda)](I^- - I_{rb}) - [1 - P(\lambda)](I^+ - I_{rb})}{2f(\lambda)P(\lambda)(I_0 - I_{ob})} \right) \quad (3)$$

В четвертой части анализируется функция разрешения $FR(Q)$ спектрометра СПН, в частности показано, что $FR(Q)$ спектрометра СПН оптимально адаптирована для рефлектометрических экспериментов.

В пятой части обсуждается методика обработки и анализа экспериментальных данных, приводится метод расчета коэффициента отражения от многослойной структуры (оптический матричный метод), описываются особенности программы для подгонки экспериментальных данных.

Третья глава посвящена изучению магнитного момента основного состояния атомов железа в трехслойной структуре W/Fe/W и состоит из четырех частей.

В первой части обсуждаются особенности магнитного момента основного состояния в системах с пониженной размерностью.

В пределах нескольких монослоев (3-5) тонкие пленки переходных металлов с хорошим приближением являются

модельными 2D системами, так как возбуждением перпендикулярных мод спиновых волн можно пренебречь.

Основными "носителями" магнитного момента в переходных металлах являются электроны делокализованных d -оболочек (и в меньшей степени гибридных s -оболочек), что является причиной сильной чувствительности магнетизма в тонких пленках переходных металлов к окружению.

Если магнитный слой переходного металла поместить на немагнитную подложку, магнитный момент основного состояния будет определяться конкуренцией между двумя доминантными процессами. Сужение $3d$ зоны на поверхности стремится увеличить магнитный момент, а гибридизация с подложкой - уменьшить.

За счет уменьшения размерности на поверхности увеличивается локализация электронов, это приводит к сужению $3d$ зоны по сравнению со значением для объемного материала. Эффекты гибридизации возникают из-за перекрытия $3d$ магнитных зон абсорбата с, например, s и d электронами подложки. Это вызывает уширение зоны по сравнению с объемным материалом, что приводит к уменьшению магнетизма. Теоретические расчеты [4], выполненные для $Fe/W(110)$, $Ag/Fe/W(110)$, показывают, что подложка $W(110)$, значительно уменьшает магнитный момент в монослое железа по сравнению с $\mu_B = 2.65$ для поверхностного слоя объемного железа. В качестве модельной системы для прямого измерения магнитного момента основного состояния в ультратонкой пленке была выбрана структура $W(110)Fe(110)/W(110)/Al_2O_3(11\bar{2}0)$, где толщина пленки Fe составляла всего 3 монослоя.

Во второй части описывается изготовление эпитаксиальных металлических пленок и их характеристика. Для получения эпитаксиальных пленок мы использовали метод Импульсного Лазерного Напыления (ИЛН), реализованный на установке в Лаборатории Луи Нееля (CNRS, Grenoble). [5]. Для создания пленки мы использовали монокристаллическую подложку $Al_2O_3(11\bar{2}0)$. С помощью электронной дифракции во время нанесения пленки производился дифракционный анализ, из которого следовало, что в пленке не было напряжений (кристаллические параметры соответствовали параметрам объемного W) и ориентация в пленке была $W(110)$.

При нанесении пленки Fe производился *in-situ* анализ из которого следовало, что Fe растет эпитаксиально на W все кристаллографические оси Fe были параллельны осям W с соответствующими индексами. После изготовления пленка была охарактеризована на установке рентгеновских лучей методом рефлектометрии.

В третьей части описываются экспериментальные результаты, по измерению магнитного момента в пленке, полученные методом РПН. Измерения зеркального коэффициента отражения поляризованных нейтронов проводились при температуре 300 К. Величина приложенного магнитного поля была 500 Э. Следует отметить, что размер образца был очень мал и составлял только 5 мм в диаметре. После установки в держатель рабочая площадь для рефлектометрических измерений равнялась приблизительно 3×5 мм². Магнитный эффект наиболее наглядно можно представить в виде флип-отношения (R^+/R^-), как показано на рисунке 1. Теоретический анализ экспериментальных данных производился по матричному методу, описанному в главе 2. Магнитная часть плотности длины рассеяния, полученная в результате подгонки для слоя Fe , равнялась $(4.0 \pm 0.1) \times 10^{-6} \text{ \AA}^{-2}$. Это соответствует магнитному моменту $(1.80 \pm 0.05) \mu_B/\text{атом}$ при $T = 300$ К. Для того, чтобы сравнить полученный результат с теоретическими расчетами, нужно экстраполировать результат, полученный при комнатной температуре, к $T = 0$ К. Для этого было проведено измерение температурной зависимости полного магнитного момента образца с помощью СКВИД-магнетометра. Намагниченность образца была измерена в интервале температур 4.2 К - 300 К в постоянном магнитном поле, равном 1 кЭ (рис. 2). Полагая, что тепловое изменение магнитного момента в области температур от 0 К до 4.2 К мало по сравнению со его значением при $T = 300$ К, значение магнитного момента, полученное нами в нейтронном эксперименте и равное моменту $(1.80 \pm 0.05) \mu_B/\text{атом}$ при $T = 300$ К, можно экстраполировать к значению $(2.1 \pm 0.1) \mu_B/\text{атом}$ при $T = 0$ К. Полученный нами магнитный момент для атомов Fe в трехслойной системе $W/Fe/W$, равный $2.1 \pm 0.1 \mu_B$, совпадает в пределах ошибки с теоретическим значением [5], равным $2.18 \mu_B$ для монослоя Fe на W -подложке и со значением $2.17 \mu_B$ для Fe в системе $Ag/Fe/W$.

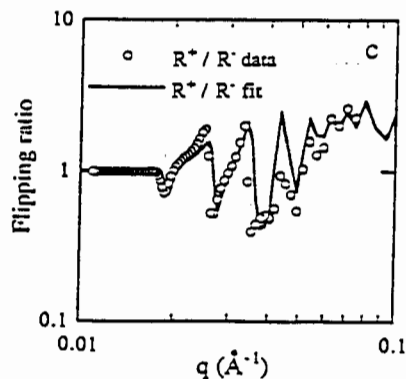


Рис.1 Экспериментальная и теоретическая функции флип-отношения (R^+/R^-) для W/Fe/W пленки.

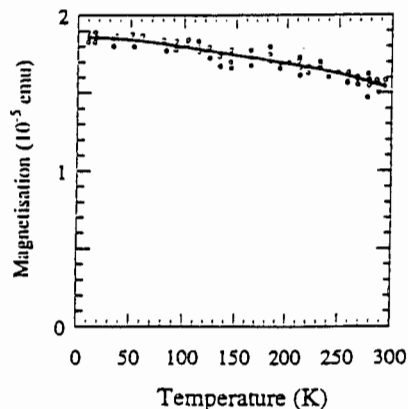


Рис.2 Тепловое изменение намагниченности W/Fe/W пленки, измеренное в поле $H = 1$ кОе

В четвертой части делается анализ и сравнение полученных результатов с известными данными теоретических и экспериментальных работ. Это сравнение показывает, что полученные нами результаты впервые экспериментально подтвердили предсказанное теоретически уменьшение магнитного момента атомов Fe, нанесенных на W подложку по сравнению с поверхностным слоем объемного Fe.

Четвертая глава посвящена изучению эффектов поляризации немагнитных атомов Pd в ультратонкой Pd/Co/Pd пленке и состоит из четырех частей.

В первой части обсуждаются структурные и магнитные свойства Co/Pd(111) систем, приводится обзор теоретических и экспериментальных работ, формулируются проблемы.

Несмотря на то, что d-оболочка Pd незаполнена, палладий является парамагнетиком. При этом Pd является легко поляризуемым: малой примеси Co достаточно, чтобы вызвать ферромагнетизм в палладии [6,7]. Теоретические исследования структуры и магнетизма в Co/Pd(111) тонкой пленке [8] показали, что атомы Co на Pd образуют ГЦК решетку с 5-6% сокращением расстояний между ближайшими Co-Pd, атомы Co приобретают увеличенный магнитный момент, равный $1.89 \mu_B$ в 1 монослое Co на Pd и что слой Co индуцирует большой магнитный момент

($0.38 \mu_B$) в ближайшем слое Pd. Для проверки этих теоретических расчетов мы исследовали магнитные свойства структуры Pd(70Å)/Co(20Å)/Pd(270Å)/Au(220 Å)/Si.

Во второй части описывается приготовление и характеристика образцов. Пленки были приготовлены методом напыления с помощью электронного пучка в камере ультра-высокого вакуума в Лаборатории Филипс (Philips Research Laboratories, Eindhoven, Netherlands). Мы использовали подложки двух типов: Si(100) и Si(111). Образцы были охарактеризованы с помощью химического анализа, рефлектометрии рентгеновских лучей. Магнитная характеристика образцов была выполнена с помощью поверхностного магнито-оптического эффекта Керра и магнитометрических измерений. Эксперименты показали отсутствие плоскостной анизотропии. Результаты исследования структурных и магнитных характеристик образцов представлены в Таблице 1.

Таблица 1.

Характеристика образцов. В колонке 2 показана ориентация подложки, d означает, что подложка была протравлена в HF кислоте. В следующих колонках представлены толщины Pd/Co/Pd/Au пленок. Полная толщина Pd была определена с помощью химического анализа (колонка 5), толщины нижнего и верхнего Pd слоев отдельно были определены с помощью нейтронной рефлектометрии (колонки 6 и 7). Значения для насыщающего поля, параллельного ($H \parallel$) и перпендикулярного ($H \perp$) к поверхности образцов, представлены в двух последних колонках.

Образец	Подложка	Co (Å) ($\pm 5\%$)	Au (Å) ($\pm 3\%$)	Pd (Å) ($\pm 3\%$)	Pd (Å) ($\pm 3\%$)	Pd (Å) ($\pm 3\%$)	$H \parallel$ (кЭ)	$H \perp$ (кЭ)
1	Si(100) d	21.4	214	345	270	75	2.5	3.5
2	Si(111) d	21.2	217	352	270	75	2.5	3.8
3	Si(100)	20.9	216	340	270	70	2.5	3.8
4	Si(111)	20.9	220	342	272	70	2.5	3.8

Как следует из таблицы, значения толщин слоев Co, Pd и Au, полученные разными методами, с хорошей степенью точности согласуются между собой.

В третьей части описываются экспериментальные результаты, по измерению профиля ядерной плотности длины рассеяния нейтронов для пленок Pd/Co/Pd. Для этого коэффициент отражения измерялся в насыщающем внешнем магнитном поле, равном 8.5 кЭ, приложенном перпендикулярно к плоскости пленки, при этом спины нейтронов были направлены по полю. В этом случае коэффициенты отражения R^+ и R^- становятся независимыми от спина нейтрона [11]. Из подгонки экспериментальных данных теоретической моделью, мы получили плотности $N_i b_i$ и толщины d_i каждого слоя i . Плотности не отличались от табличных значений. Толщины каждого слоя, полученные в результате подгонки, находились в идеальном согласии с величинами, полученными с помощью химического анализа и методом рентгеновской рефлектометрии.

В четвертой части описываются результаты измерения намагниченности в пленках Pd/Co/Pd методом рефлектометрии поляризованных нейтронов. Экспериментальные коэффициенты отражения R^+ и R^- измерялись в насыщающем внешнем магнитном поле, равном 3.5 кЭ, приложенном параллельно поверхности образца (см. рис. 3). На рисунке экспериментальные данные представлены вместе с подгоночными кривыми. Подгонка экспериментальных данных производилась с использованием фиксированных параметров профилей ядерных плотностей длин рассеяния и толщин слоев, полученных из эксперимента по измерению профиля ядерной плотности длины рассеяния нейтронов для пленок Pd/Co/Pd, описанного в третьей части. Для определения намагниченности из нейтронного эксперимента удобно представлять данные в виде функции поляризации, или спин-асимметрии $SA = (R^+ - R^-)/(R^+ + R^-)$. На рисунке 4 представлена функция поляризации для образца 4. Сплошной линией показана наилучшая подгонка экспериментальных данных, соответствующая модели, в которой мы полагали, что атомы Co имеют намагниченность объемного материала ($1.76 \mu_B$), а индуцированный момент в атомах Pd являлся параметром подгонки. Для этой модели мы получили, что в слое Pd шириной 5 Å с обеих сторон от слоя Co существует индуцированный магнитный момент, равный $0.4 \mu_B$ на атом Pd. Так как

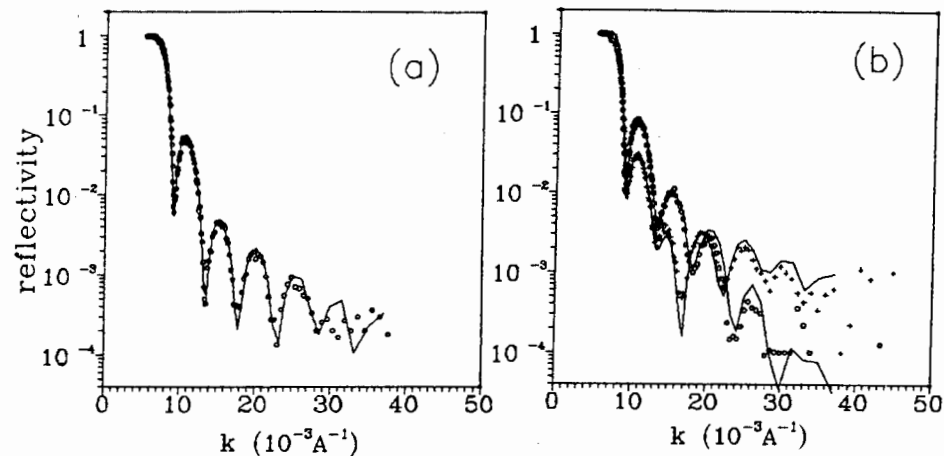


рис. 3. (а) Коэффициент отражения нейтронов от Pd/Co(21Å)/Pd пленки, измеренный во внешнем магнитном поле 8.5 кЭ, направленном перпендикулярно к поверхности образца. (в) Коэффициенты отражения R^+ (o) и R^- (+), измеренные в магнитном поле 3.5 кЭ, направленном параллельно поверхности пленки. Сплошными линиями показаны подгоночные кривые.

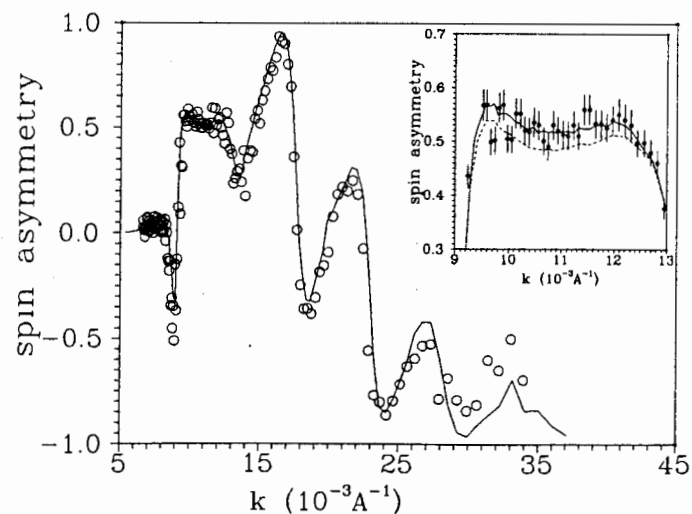


Рис. 4. Измеренная (o) и расчетная функции спин-асимметрии для Pd/Co(21Å)/Pd пленки. На вставке пунктирная линия соответствует объемной намагниченности в атомах Co, сплошная линия соответствует индуцированной намагниченности $0.4 \mu_B$ на атом Pd. в 5 Å слоях на обеих Co/Pd границах.

отсутствуют теоретические расчеты для модели, аналогичной изучавшейся нами реальной системе Pd/Co/Pd, то мы можем говорить только о качественном согласии полученных нами результатов с расчетами, изложенными в работе [8].

В пятой главе исследовалось влияние поглощающего подслоя на поляризующую способность магнитных нейтронных зеркал. Глава состоит из четырех частей.

В первой части приводится теоретический анализ коэффициента зеркального отражения нейтронов от сильных поглотителей. Проанализирована специфика поведения длины рассеяния Gd в тепловой области энергий нейтронов. Изотопы ^{155}Gd и ^{157}Gd , входящие в состав естественной изотоп-смеси (14.8% и 15.7% соответственно), имеют сильные резонансы в сечении поглощения при $\lambda_R^{155} = 2.25 \text{ \AA}$ и $\lambda_R^{157} = 1.7 \text{ \AA}$, то есть непосредственно в области максимума теплового спектра нейтронов. Это, в свою очередь, приводит к сильной спектральной зависимости их длин рассеяния, вплоть до изменения знака реальных частей длин рассеяния в области резонанса. Энергетическая зависимость длины рассеяния в области одиночного резонанса записывается по формуле Брейта-Вигнера [9] в следующем виде:

$$b = b_0 + \frac{1}{2k} \frac{g\Gamma_n(E-E_r)}{(E-E_r)^2 + \frac{\Gamma^2}{4}} - i \frac{1}{2k} \frac{g\Gamma_n \frac{\Gamma}{2}}{(E-E_r)^2 + \frac{\Gamma^2}{4}}, \quad (5)$$

где E - энергия нейтрона ($E = \hbar^2 k^2 / 2m$, k - волновой вектор нейтрона, E_r - энергия резонанса, Γ - полная ширина резонанса, Γ_n - нейтронная ширина резонанса, g - статистический весовой фактор, величина b_0 не зависит от энергии и определяется суммой вкладов в длину рассеяния от всех далеко лежащих резонансов и от потенциального рассеяния. Спектральные зависимости реальной и мнимой частей длины рассеяния смеси изотопов $^{155}\text{Gd}(50\%)$ $^{157}\text{Gd}(50\%)$, рассчитанные с использованием параметров резонансов изотопов ^{155}Gd и ^{157}Gd , взятых из [10], подтверждают сложный характер поведения длины рассеяния в тепловой области энергий нейтронов и, как следствие, невозможность компенсации реальной части длины рассеяния Gd в широком интервале длин волн нейтронов ($\lambda > 0.5 \text{ \AA}$). Для интерпретации экспериментально полученных значений коэффициента

отражения использовалась формула для $R_d(q)$, полученная для поглощающего слоя конечной толщины d , нанесенного на полубесконечную подложку:

$$R_d(q) = \frac{\left| (q-q_1)[(q_1+q_2)e^{-i2q_1d} + (q_1-q_2)] + 2q_1(q_1-q_2) \right|^2}{\left| (q-q_1)[(q_1+q_2)e^{-i2q_1d} + (q_1-q_2)] - 2q_1(q_1-q_2) \right|^2}, \quad (6)$$

где q_1, q_2 - нормальные компоненты волнового вектора нейтрона в пленке и подложке соответственно.

Во второй части изложены экспериментальные результаты измерения спектральной зависимости коэффициента отражения от пленок Gd и GdTl. Исследовались два образца, представляющие собой тонкие пленки, нанесенные методом вакуумного напыления на стеклянные подложки (см табл.2)

Таблица 2. Описание образцов

пленка	подложка
естественная изотоп-смесь Gd 1000 \AA	стекло "float-glass"
сплав Gd(15%)Ti(85), 8000 \AA	стекло "float-glass"

Были измерены коэффициенты отражения $R_c(\lambda)$ от Gd зеркала и сплава Gd(15%)Ti(85%). Теоретическое описание отражающей способности поглотителей по формулам (5) и (6) позволило детально описать спектральную зависимость коэффициента отражения тепловых нейтронов от поверхности сильных поглотителей. Результаты экспериментов по отражению от GdTl сплава убедительно доказали, что наблюдаемое сильное отражение нейтронов в длинноволновой части спектра должно приводить к ухудшению свойств любых поляризующих зеркал с GdTl подслоем.

В третьей части обсуждаются и приводятся расчеты отражающих свойств сплавов на основе кадмия. С использованием табличных значений длин рассеяния Cd, Ti, V на основе формулы (6) был проведен теоретический анализ спектральных зависимостей коэффициентов отражения нейтронов от тонких пленок из сплавов CdV и CdTi на стеклянной подложке. Из

проанализированных сплавов наиболее оптимальным является сплав Cd(20%)V(80%) толщиной $d = 1.5 \mu\text{m}$.

В четвертой части анализируются поглощающие тонкие пленки на основе бора и его изотопа ^{10}B . Рассчитаны профили коэффициента отражения, оптимизированные на минимум отражения для VTi и BV тонких пленок. Из сравнения с результатами экспериментов по отражению нейтронов от GdTl пленок следовало, что отражающие свойства VTi пленки являются более оптимальными, чем для GdTl слоя.

Основные результаты диссертационной работы

1. Продемонстрировано, что метод рефлектометрии поляризованных нейтронов позволяет измерять магнитные эффекты в поверхностях, многослойных структурах и ультратонких магнитных пленках, толщиной вплоть до нескольких монослоев.

2. Исследован магнетизм ультратонкой пленки железа в трехслойной системе W/Fe/W, состоящей из трех монослоев железа Fe(110), толщиной $(6 \pm 1) \text{ \AA}$, эпитаксиально выращенных на монокристаллическом слое вольфрама W(110), толщиной $(500 \pm 5) \text{ \AA}$ и покрытой слоем W(110), толщиной $(100 \pm 5) \text{ \AA}$.

а) С использованием метода рефлектометрии поляризованных нейтронов при комнатной температуре измерен магнитный момент атомов железа, равный $(1.80 \pm 0.05) \mu_B$.

б) Обнаружено существование немагнитного слоя толщиной 5 \AA на обеих границах Fe/W, являющегося продуктом взаимной интердиффузии железа и вольфрама и состоящего приблизительно из 20% Fe и 80% W.

в) С помощью СКВИД - магнитометра измерена температурная зависимость намагниченности пленки в области температур от 300 K до 4.2 K.

г) Используя измеренную температурную зависимость намагниченности, экстраполяцией к нулевой температуре получено значение магнитного момента основного состояния для атомов железа, равное $(2.1 \pm 0.1) \mu_B$, согласующееся с теоретическими предсказаниями того, что контакт с вольфрамом приводит к уменьшению магнитного момента по сравнению с атомами поверхностного монослоя объемного Fe.

д) Величина магнитного момента Fe, равная $(2.1 \pm 0.1) \mu_B/\text{атом}$ (0 K), полученная для трех монослоев Fe, является первым экспериментальным подтверждением теоретических предсказаний о том, что на W/Fe границе магнитный момент Fe уменьшен, по сравнению со свободной поверхностью, из-за эффектов гибридизации.

2. Исследованы магнитные свойства ультратонкой пленки Co (21 \AA) в трехслойной структуре Pd/Co/Pd.

а) С использованием различных методов (химический анализ, зеркальное отражение рентгеновских лучей, спин-независимое отражение нейтронов в насыщающем магнитном поле, приложенном перпендикулярно к поверхности) детально изучена структура пленки и получены согласующиеся между собой результаты.

б) Измерено предсказанное теоретически увеличение магнитного момента в системе Pd/Co/Pd на 10% по сравнению со значением для объемного Co.

в) Используя метод РПН, нам удалось впервые определить увеличение магнитного момента в изучаемой системе, которое мы относим к существованию индуцированного магнитного момента, равного $0.4 \mu_B$, в двух монослоях Pd, прилежащих к обеим Pd/Co границам. Альтернативно обсуждается вариант существования увеличенного магнитного момента в атомах Co, равного $1.84 \mu_B$ на атом. Для разделения между двумя альтернативными случаями и измерения профиля намагниченности в области границы Pd/Co, необходимо измерение коэффициента отражения в области больших значений переданного импульса. Мы показали, что несмотря на малый эффект, эти измерения являются возможными.

3. Для измерений малых магнитных эффектов методом РПН поведение функции поляризации является исключительно важным. С целью исследования причин падения степени поляризации пучка с ростом длины волны, мы провели исследование влияния поглощающего подслоя на поляризующую способность магнитных нейтронных зеркал.

а) Измерена спектральная зависимость коэффициента отражения от тонкой пленки гадолиния и его сплава с титаном. Впервые экспериментально исследована спектральная зависимость длины рассеяния Gd в тепловой области энергий нейтронов. Обнаруженное непостоянство длины рассеяния Gd и,

как следствие, невозможность ее компенсации с широким интервале длин волн нейтронов, позволили объяснить наблюдающееся сильное падение поляризующих свойств ферромагнитных зеркальных нейтронородов в длинноволновой части спектра.

Полученные нами экспериментальные данные убедительно демонстрируют, что наблюдаемое сильное отражение нейтронов в длинноволновой части спектра является основной причиной плохой поляризующей способности зеркал с GdT поглощающим подслоем.

б) Предложена возможность создания нового поглощающего сплава для поляризующих нейтронородов с существенно меньшей отражающей способностью в области длин волн нейтронов от 1 до 10 Å. Спектральная зависимость коэффициента отражения проанализирована для поглощающих сплавов VTi, BV и CdV, напыленных на стеклянные подложки. Коэффициент отражения как функция длины волны нейтрона оптимизирован по концентрации и толщине пленок.

4. Наряду с перечисленными физическими задачами был решен ряд вопросов методического характера:

а). Для извлечения информации о структурных и магнитных характеристиках ультратонких пленок, развита методика количественной обработки спектров поляризованных нейтронов с учетом экспериментальных функций поляризации и разрешения установки.

б) созданы программы для обработки и интерпретации экспериментальной информации,

Полученные в работе результаты дают возможность предложить ряд экспериментов по исследованию магнетизма в различных системах, содержащих ультратонкие пленки. Проблема двумерного магнетизма далека от своего разрешения, поэтому представляется интересным продолжать систематические исследования в данном направлении.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

- 1 D.A.Korneev, V.V.Pasyuk, A.V.Petrenko and H.Jankovski "Neutron Specular Reflection for Thin Films, Surfaces and Interfacial Studies" J.Stanek and A.T.Pedziwiatr (eds.) "Condensed matter studies by nuclear methods" V.1, World Scientific 1990, *invited talk*
- 2 V.V.Pasyuk, D.A.Korneev, A.V.Petrenko and H.Jankovski "Neutron Reflectivity Study of Titanium Thin Film Aging" Preprint JINR E3-91-275, Dubna 1991
- 3 D.A.Korneev, V.V.Pasyuk, A.V.Petrenko and H.Jankovski "Influence of an Absorbing Sublayer on Polarizing Property of Magnetic Neutron Mirrors" J.Stanek and A.T.Pedziwiatr (eds.) "Condensed matter studies by nuclear methods", World Scientific 1991, *invited talk*
- 4 V.V.Pasyuk, D.A.Korneev, A.V.Petrenko and E.B.Dokukin, "Neutron Reflectivity Studies on Superconducting, Magnetic and Absorbing Thin Films on the Polarized Neutron Spectrometer at the Pulsed Reactor IBR-2" Preprint JINR E3-91-276, Dubna 1991 *Invited talk* in the 2nd International Conference "Surface X-ray and neutron scattering", Bad Honnef, Germany, June 25-28, 1991
- 5 D.A.Korneev, V.V.Pasyuk, A.V.Petrenko and H.Jankovski, "Absorbing Sublayers and Their Influence on the Polarizing Efficiency of Magnetic Neutron Mirrors" Nucl.Instr. & Meth. B63 (1992) 328
- 6 V.V.Pasyuk, H.J.Lauter, J.A.C.Bland, A.V.Petrenko, M.T.Johnson and F.J.A.den Broeder "Magnetic Moment in a Co/Pd Ultrathin Film Studied by Polarized Neutron Specular Reflection" Communications of the Symposium on Surface Science, La Plagne, 1992, p.102
- 7 V.V.Pasyuk, H.J.Lauter, M.T.Johnson, F.J.A.den Broeder, E.Janssen, J.A.C.Bland and A.V.Petrenko "Magnetic Properties of Pd/Co/Pd Ultrathin Film Studied by Polarized Neutron Specular Reflection" Appl. Surf. Sci. 65/66 (1993) 118
- 8 V.V.Pasyuk, H.J.Lauter, M.T.Johnson, F.J.A.den Broeder, E.Janssen, J.A.C.Bland, A.V.Petrenko and J.M.Gay "Interface Magnetisation in Single Ultra-Thin Pd/Co/Pd Sandwich Structure" Journ.Magn.Magn.Mat. 121 (1993) 180

- 9 V.V.Pasyuk, O.McGrath, H.J.Lauter, D.Givord, A.Petrenko
 "Magnetism of W(110)/Fe(110)/W(110) thin films studied by polarised neutron reflection"
 Proceedings of the 14th International Colloquium on Magnetic Film and Surfaces, ϵ -MRS Symposium on Magnetic Ultrathin Films, Multilayers and Surfaces, 29 August-2 September 1994, page 420
 Colloquium Digest/Inst.f.Angewandte Physik, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf
- 10 O.McGrath, V.V.Pasyuk, H.J.Lauter, A.V.Petrenko and D.Givord
 "Polarized neutron reflectivity of epitaxial thin magnetic films"
 Annual report of activity 1992-1993, FLNP JINR, Dubna 1994
- 11 V.Pasyuk, O.McGrath, H.J.Lauter, A.Petrenko, A. Lienard, and D.Givord
 "Ground State Moment Reduction in an Ultra-Thin W(110)/Fe(110)/W(110) Film"
 Journ.Magn.Magn.Mat. 148 (1995) 38

Цитируемая литература

- [1] Soon C. Hong, A.J.Freeman and C.L.Fu
 "Structural, electronic, and Magnetic Properties of Clean and Ag-Covered Fe Monolayers on W(110)"
 Phys.Rev. 38 (1988) 12156
- [2] R.Wu, C.Li and A.J.Freeman
 "Structural, Electronic and Magnetic Properties of Co/Pd(111) and Co/Pt(111)"
 Journ.Magn.Magn.Mat. 99 (1991) 71
- [3] D.A.Korneev, V.V.Pasyuk, A.V.Petrenko and E.B.Dokukin
 "Neutron Reflectivity Studies on Superconducting, Magnetic and Absorbing Thin Films on the Polarised Neutron Spectrometer at the Pulsed Reactor IBR-2"
 Springer Proc.Phys. 61 'Surface X-ray and Neutron Scattering'
 H.Zabel and I.K.Robinson eds.,(1992) p. 213
- [4] Soon C. Hong, A.J.Freeman and C.L.Fu
 "Structural, electronic, and Magnetic Properties of Clean and Ag-Covered Fe Monolayers on W(110)"
 Phys.Rev. 38 (1988) 12156
- [5] Oran F.K. Mc Grath
 "Structural and magnetic properties of epitaxial W/Fe/W and Gd/Fe films grown by pulsed laser deposition"
 Thesis, CNRS, Grenoble, 1994

- [6] C.J.Nieuwenhuys
 "Magnetic Behaviour of Cobalt, Iron and Manganese Dissolved in Palladium"
 Adv.Phys.B 24 (1975) 515
- [7] A.Oswald, R.Zeller and P.H.Dederich
 "Giant Moments in Palladium"
 Phys.Rev.Lett. 56 (1986) 1419
- [8] R.Wu, C.Li and A.J.Freeman
 "Structural, Electronic and Magnetic Properties of Co/Pd(111) and Co/Pt(111)"
 Journ.Magn.Magn.Mat. 99 (1991) 71
- [9] Экспериментальная ядерная физика (под ред. Сегрэ Э.), т.2, М.:ИЛ, 1955
- [10] S.F.Mughabhab, 'Neutron Cross Section', V.1, part B, Academic Press Inc, 1981
- [11] S.S.P.Parkin, V.R.Deline, R.O.Hilleke, G.P.Felcher,
 "Unidirectional biased Permalloy: PNR Experiment"
 Phys.Rev. B 42 (1990) 10583

Рукопись поступила в издательский отдел
 25 марта 1997 года.