

# ОБЪЕДИНЁННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

УДК 538.97

ХАЙДУКОВ  
Юрий Николаевич

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО УПОРЯДОЧЕНИЯ  
И ЭФФЕКТОВ БЛИЗОСТИ В МАГНИТНЫХ И  
СВЕРХПРОВОДЯЩИХ СЛОИСТЫХ НАНОСТРУКТУРАХ  
МЕТОДОМ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ НЕЙТРОНОВ.

Специальность: 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Автореферат диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна 2008

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка  
Объединенного института ядерных исследований

**Научные руководители**

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

кандидат физико-математических наук  
Ю.В. Никитенко

**Официальные оппоненты**

доктор физико-математических наук  
А. А. Фраерман

доктор физико-математических наук  
К. М. Подурец

**Ведущая организация**

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

Защита состоится “27” февраля 2009 года в \_\_\_\_\_ часов на заседании  
диссертационного совета Д **720.001.06** при Лаборатории нейтронной физики и  
Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных  
исследований (141980, г. Дубна Московской области)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ

Автореферат разослан “14” января 2009 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

А. Г. Попеко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы.

В современной физике конденсированных сред большое внимание уделяется магнитным наносистемам – объектам с размерами  $1\div 100$  нм хотя бы в одном пространственном направлении. Признаками таких систем, помимо упомянутого выше геометрического ограничения (confinement) являются самоорганизация (self-organization) и эффекты близости (proximity effects). Самоорганизация известна достаточно давно в «естественных» биологических наносистемах, таких как молекула РНК. Похожий принцип используется в магнитных наносистемах при осаждении атомов или молекул на подложку с последующим самоупорядочением в различные наноструктуры. Зачастую слабые обратимые взаимодействия между атомами позволяют получать равновесные структуры без какого-либо централизованного управления процессом, причем ошибки, возникающие во время приготовления систем, исправляются автоматически.

Под эффектами близости следует понимать появление в наносистемах, состоящих из двух или более фаз, физических свойств, вызванных контактом этих фаз. Так, например, в бислойных системах, состоящих из слоев жесткого (hFM) и мягкого (sFM) магнетиков, благодаря обменному взаимодействию возможно «наследование» магнитных свойств как мягкой, так и жесткой фазы. В итоге бислойная система hFM/sFM обладает площадью петли гистерезиса большей, чем у обеих отдельно взятых фаз. Перспективными представляются исследования слоистых систем, в которых ферромагнитный (FM) слой находится в контакте с диамагнитным (DM), сверхпроводящим (S), антиферромагнитным (AFM) или другими слоями нанометровой толщины. В этом случае толщины слоев соизмеримы с характерными масштабами, имеющими место в описанных фазах (длина свободного пробега электрона, размер сверхпроводящей пары, размеры доменной границы и т.д.), что приводит к появлению множества новых явлений. Например, магнитные слои (Fe, Co, Ni), разделенные диамагнитными прослойками (Cr, Cu, V) нанометровой толщины, упорядочиваются

антиферромагнитно (АФ - состояние). При наложении внешнего поля АФ состояние сменяется ферромагнитным (Ф - состояние). Электрическое сопротивление в таких системах сильно зависит от их магнитного состояния. За открытие этого эффекта, известного как гигантское магнетосопротивление, Петер Грюнберг и Альбер Фер были удостоены в 2007 году Нобелевской премией по физике. Благодаря наличию пары состояний АФ и Ф, управляемых внешним магнитным полем, такие системы нашли широкое применение в наноэлектронике. Другой системой, возможно даже более перспективной для создания более компактных носителей информации является S/FM слоистая структура, в которой существуют два канала записи: на электрическом сопротивлении и магнитном порядке. Управляющими параметрами в данном случае являются температура и магнитное поле. Таким образом, видно, что изучение влияния эффектов близости на магнитное состояние наносистем является важной задачей, как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения. Перспективным экспериментальным методом исследования этой проблемы является рефлектометрия поляризованных нейтронов (РПН). Суть метода состоит в определении профиля намагниченности структуры из спектров рассеяния поляризованных нейтронов. Пространственное разрешение при определении профиля намагниченности задается величиной переданного импульса  $Q$ , который при характерных для нейтронной рефлектометрии углах скольжения  $\theta \sim 10$  мрад и длине волны нейтрона  $\lambda \sim 1 \text{ \AA}$ , составляет величину  $Q \sim 0.1 \text{ \AA}^{-1}$ , а пространственное разрешение  $\Delta z \sim 2\pi/Q \sim 1$  нм. При этом минимальная измеримая намагниченность на современных источниках составляет сотни эрстед. Необходимо отметить, что РПН является сравнительно молодым методом. С момента публикаций первых работ не прошло и 30 лет [1,2]\*.

---

\* Цитируемая литература обозначается ссылкой [1], работы автора, в которых опубликованы выносимые на защиту результаты – [A1].

Объединенный институт ядерных исследований является одним из лидеров в поляризационной нейтронографии. Первые экспериментальные работы по отражению нейтронов от магнитных сред были проведены в Лаборатории нейтронной физики в начале 1980-х годов [2] с помощью созданного в то время первого рефлектометра поляризованных нейтронов на белом пучке нейтронов СПН-1. В 2003 году рефлектометр СПН-1 претерпел ряд конструктивных изменений. В настоящее время спектрометр РЕМУР (новое название СПН-1) является одним из лучших спектрометров в мире и позволяет проводить эксперименты с поляризованными нейтронами высокой поляризации и светосилы в различных геометриях (рефлектометрия, малоугловое рассеяние, дифракция) [3]. Большая часть исследований положенных в основу диссертации выполнены с использованием спектрометра РЕМУР.

Многочисленные исследования показали, что РПН обладает большим потенциалом в изучении магнетизма наносистем и эффектов близости в них. В настоящее время метод развивается в направлениях улучшения пространственного разрешения и чувствительности к магнитному моменту. Достигается это за счет увеличения светосилы нейтронных источников, за счет комбинации с другими методами (спин – эхо, малоугловое рассеяние, дифракция и т.д.), а также за счет особенностей взаимодействия нейтронов со слоистыми наноструктурами (режимы стоячих и усиленных стоячих волн).

**Цель работы** состоит в исследовании влияния эффектов близости на пространственное распределение намагниченности в слоистых наносистемах методом рефлектометрии поляризованных нейтронов.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие основные задачи:

1. Провести экспериментальное исследование магнитного упорядочения в магнитных и сверхпроводящих слоистых системах методом рефлектометрии поляризованных нейтронов.

2. Разработать алгоритмы и программы расчёта коэффициентов зеркального и диффузного отражения нейтронов от слоистых структур с различного типа неоднородностями.
3. Обосновать необходимость использования режимов стоячих и усиленных стоячих волн для исследования магнитного упорядочения и эффектов близости в слоистых структурах.
4. Объяснить роль эффектов близости в формировании магнитных структур на основе предложенных моделей поведения намагниченности.

### **Результаты, выносимые на защиту**

1. Впервые методом РПН проведено систематическое исследование эффектов близости в S/FM системах типа «сверхпроводящий V/ферромагнитный Fe + периодическая система Fe/V». В диапазоне температур  $T = [1.6 \div 30]$  К в магнитных полях  $H > 1\text{кЭ}$  обнаружено

а) наличие в периодической системе антиферромагнитного в глубину и неоднородного в плоскости магнитного состояния. Установлена зависимость магнитного состояния от температуры и магнитного поля.

б) изменяющееся в зависимости от температуры и магнитного поля магнитное состояние (неоднородности и неколлинеарность) границы раздела «сверхпроводник/ферромагнетик».

2. Впервые методом РПН проведено исследование магнитного состояния сверхпроводника 1 рода с ультрамалым параметром Гинзбурга – Ландау. Получена глубина проникновения магнитного поля в сверхпроводящую систему  $\text{In}(2\text{мкм})/\text{SiO}_2$  составившая при  $H = 180$  Э и  $T = 2\text{К}$  величину  $\lambda = 100 \pm 10$  нм.

3. Впервые проведено исследование влияния ультразвуковой волны на магнитное состояние антиферромагнитно-упорядоченной периодической Fe/Cr структуры.

При возбуждении структуры ультразвуковой волной установлено:

а) возникновение колебаний магнитных моментов доменов

б) уменьшение размера доменов с 2 до 1.4 мкм

в) возникновение двумерной решетки, образованной шероховатостями границ раздела, и изменение периодов решётки в глубину и в плоскости

структуры в зависимости от величины магнитного поля и амплитуды звуковой волны

4. Получены аналитические выражения для

а) коэффициента зеркального отражения поляризованных нейтронов от магнитно-неколлинеарных структур с границами раздела, имеющих ядерные и магнитные шероховатости;

б) сечения диффузного рассеяния при наличии поперечной к границам раздела корреляции доменов в слоях структуры.

в) разрешения спектрометра по переданному моменту при регистрации диффузного рассеяния нейтронов.

5. Создана программа расчёта коэффициентов зеркального и диффузного отражения нейтронов от слоистых структур с различного типа шероховатостями границ раздела при конечном разрешении спектрометра.

6. С помощью модельных расчетов показана чувствительность метода РПН в режиме генерации усиленной стоячей волны к определению закона поворота вектора намагниченности в бислойных структурах типа «мягкий магнетик/жесткий магнетик».

7. Предложены и обоснованы новые структуры для изучения магнитного состояния вблизи границы раздела «сверхпроводник/ферромагнетик», с использованием режимов стоячих и усиленных стоячих нейтронных волн.

### **Научная новизна**

1. Впервые проведено экспериментальное исследование влияния сверхпроводимости на магнитное состояние методом рефлектометрии поляризованных нейтронов.

2. Впервые проведены исследования эффектов влияния ультразвука на магнитное состояние слоистых антиферромагнитных систем.

3. Впервые методом рефлектометрии поляризованных нейтронов проведено исследование магнитного состояния сверхпроводника 1 рода с ультрамалым параметром Гинзбурга – Ландау. Исследование продемонстрировало возможность

использования метода для поиска эффектов нелокальности в сверхпроводниках первого рода.

### **Практическая ценность работы**

1. Полученные данные по влиянию сверхпроводимости и ультразвукового поля на магнитное состояние слоистых систем могут быть использованы в связи с поиском новых способов управления магнитными носителями информации и электронных элементов.

2. Созданные программы расчета спектров рассеяния поляризованных нейтронов позволяют получать из эксперимента ценную информацию о пространственном профиле вектора намагниченности в структуре. Данная информация может быть использована для неразрушающего контроля и оптимизации магнитных свойств различных слоистых систем.

### **Личный вклад автора**

Автор участвовал во всех работах, результаты которых вошли в диссертацию: проведении экспериментов, интерпретации результатов и написании программ обработки данных.

### **Апробация работы**

Основные результаты изложены в 6 работах, список которых приведён в конце автореферата. Результаты, представленные в работе, докладывались на следующих конференциях и семинарах:

- 1) International workshop “Nuclear Methods in Studying Thin Films and Heterostructures”, Budapest, 14-15 November, 2003
- 2) Совещание по сотрудничеству Венгерской академии наук и ОИЯИ, Будапешт, 5-7 сентября 2004 года
- 3) XVII совещание по использованию рассеяния нейтронов в исследованиях конденсированного состояния, г. Заречный, 12-16 октября, 2004
- 4) INTAS workshop “Hierarchy of scales in magnetic nanostructures”, St. Petersburg, 15-20 June, 2004



- 5) IV workshop on investigations at the IBR-2 pulsed reactor, Dubna, 15-18 June, 2005
- 6) Научный семинар по теме «Studying of coexistence of superconductivity and magnetism by means of the polarized neutrons and synchrotron radiations», в институте частиц и ядерной физики ЦИФИ, Будапешт 5 июля 2006 г.
- 7) V workshop on investigations at the IBR-2 pulsed reactor, Dubna, 15-18 June, 2006
- 8) INTAS workshop “Hierarchy of scales in magnetic nanostructures”, N. Novgorod, 9-12 march 2006
- 9) X Симпозиум "Нанофизика и нанoeлектроника", Н. Новгород, 13-17 марта 2006г.
- 10) XIX совещание по использованию рассеяния нейтронов в исследованиях конденсированного состояния, Обнинск, 11-15 сентября 2006 г.
- 11) INTAS meeting, Bochum, 26-27 марта 2007
- 12) XI Симпозиум "Нанофизика и нанoeлектроника", Н. Новгород 10-14 марта 2007

### **Объём и структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения, изложенных на 119 страницах текста, включающего 5 таблиц. Кроме того, она содержит 44 рисунка и список литературы из 84 наименований.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, а также результаты, выносимые на защиту. Дается характеристика научной новизны и практической ценности полученных результатов. Кратко изложена структура и содержание диссертации.

**Первая глава** диссертации посвящена теории рассеяния поляризованных нейтронов от магнитно-неколлинеарных слоистых систем. Для идеальных плоско-слоистых систем приводятся аналитические выражения для

коэффициентов отражения нейтронов с учетом возможного переворота спина (спин-флип отражение) рекуррентным [4] и матричным [5] методами. Установлено, что оба метода дают одинаковый результат, однако матричный метод имеет два преимущества: а) более быстрый счет для периодических структур и возможность рассчитать волновое поле нейтронов на заданной глубине. Полученные выражения позволяют рассчитывать коэффициенты отражения нейтронов от идеальных плоскостойких сред с резкими границами. В реальных же структурах, благодаря различным физическим процессам область перехода может иметь конечный размер  $\sigma_s$ . Для магнитных структур существует также область магнитного перехода  $\sigma_m$ , которая благодаря обменному или электромагнитному взаимодействию может отличаться от области химического перехода. Возможность получать из эксперимента параметры  $\sigma_s$  и  $\sigma_m$  дает ценную информацию о физике взаимодействий в слоистых системах. Соответствующий алгоритм для рекуррентного метода был рассмотрен в работе [6]. В диссертации получено аналогичное выражение для матричного метода. Данное выражение является обобщением так называемой матрицы шероховатостей (roughness matrix), использованной в работе [7] для синхротронного излучения.

При наличии в слоистых системах неоднородностей в плоскости слоев дополнительно к зеркальному отражению возникает незеркальное (диффузное) рассеяние. Анализ диффузного рассеяния позволяет получить информацию о размере неоднородностей, их корреляции в плоскости образца и перпендикулярно ей. Диффузное рассеяние в диссертации рассматривается в рамках борновского приближения искаженных волн [8]. Представлены конечные выражения для расчета интенсивности диффузного рассеяния от шероховатостей [9] и магнитных доменов [10]. Отдельно рассмотрен вопрос о поперечной корреляции неоднородностей. Для шероховатостей такой учет феноменологически сделан введением в функцию корреляции шероховатостей  $l$ -го и  $m$ -го интерфейсов экспоненциального множителя [11]  $C_{l,m} = C_0 e^{-|z_l - z_m|/A}$ , где  $C_0$

автокорреляционная функция,  $z_{l(m)}$  координата  $l(m)$  интерфейса,  $A$  – длина поперечной корреляции. В диссертации предложено обобщение этого подхода на случай магнитных доменов [A1] с помощью введения для доменов корреляционной функции вида  $C_{l,m} = (\pm 1)^{l+m} C_0 e^{-|z_l - z_m|/A}$ , где знак «+» или «-» позволяет учесть ферро- или антиферромагнитную корреляцию доменов (рис. 1)

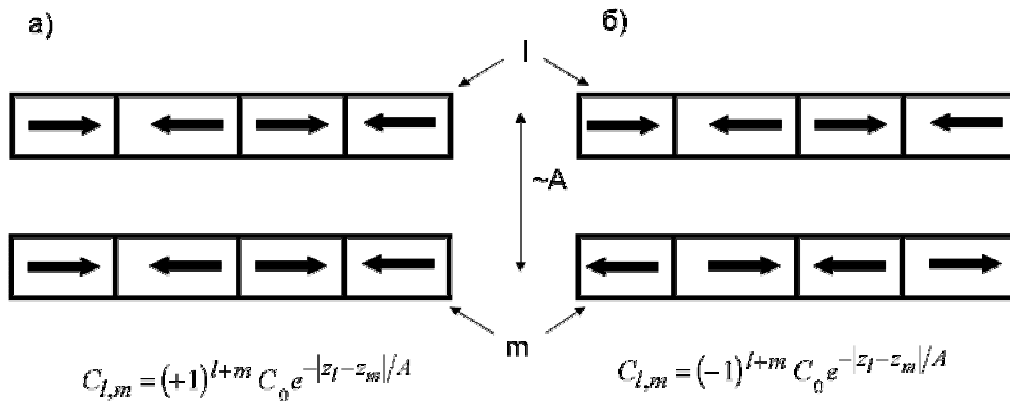


Рис.1. Ферромагнитная (а) и антиферромагнитная (б) корреляция доменов вглубь структуры.

В последней части главы рассмотрены режимы стоячих и усиленных стоячих нейтронных волн. Показана чувствительность режима стоячих волн к определению положения магнитно-неколинеарного или магнитно-неоднородного слоя. Режим усиленных стоячих волн можно использовать для усиления магнитного сигнала, или его изменения. Режим стоячих волн использовался нами для изучения магнетизма магнитно-сверхпроводящих систем [A3, A4]. Возможность использования режима усиленных стоячих волн рассмотрена нами для изучения магнетизма обменно-связанных систем типа «жесткий магнетик / мягкий магнетик» [A2] и «сверхпроводник/ферромагнетик» (см. главу №3).

**Вторая глава** диссертации посвящена методике эксперимента. Приводится принцип работы времяпролетного спектрометра на примере установки РЕМУР [12] и методика обработки спектров рассеяния. Обработка

спектров состоит в получении экспериментальных коэффициентов отражения и диффузного рассеяния с учетом эффективностей поляризатора и анализатора и вероятности переворота спина нейтрона в спин-флипперах. На следующем этапе проводится сравнение экспериментальных коэффициентов с теоретическими. Для корректного анализа необходимо учитывать величину неопределенности переданного импульса  $dQ$ , возникающую вследствие расходимости пучка  $d\theta$  и разрешения по длине волны  $d\lambda$ . Для зеркального отражения такая величина приводится в работе [12]. В диссертации получено аналитическое выражение для  $dQ$  при регистрации диффузного рассеяния. Данный параметр использовался в программах расчета теоретических коэффициентов рассеяния, на основе формул, описанных в 1-ой главе.

**Третья глава** посвящена изучению магнетизма сверхпроводящих и магнитно-сверхпроводящих структур. В таких системах, благодаря близости конкурирующих между собой сверхпроводимости и магнетизма возникает множество явлений, имеющих как фундаментальные, так и прикладные значения.

Первые работы в этой области связаны с изучением характера проникновения магнитного поля в сверхпроводящие структуры. В зависимости от типа сверхпроводника, определяемого параметром  $\kappa$  Гинзбурга – Ландау, в таких системах наблюдаются эффекты Мейснера ( $\kappa < 1$ ) или Абрикосова ( $\kappa > 1$ ). В первом случае магнитное поле существует лишь в небольшой приповерхностной области сверхпроводника с размером  $\lambda \sim 100 - 1000 \text{ \AA}$ . Во втором случае, магнитное поле существует во всем объеме в виде квантованных вихревых нитей. В феноменологической теории Лондонов показано, что для сверхпроводников первого рода магнитное поле затухает вглубь сверхпроводника по закону  $\exp(-z/\lambda_L)$ , где  $\lambda_L$  зависит от плотности сверхпроводящих пар. В работе Пиппарда [13] показано, что реальная глубина проникновения магнитного поля может быть больше в несколько раз величины  $\lambda_L$ , если учитывать размеры сверхпроводящих пар. Такие эффекты «нелокальности» должны наблюдаться для сверхпроводников первого рода с сверхмалым параметром  $\kappa$ . С момента выхода в свет работы

Пиппарда было проведено множество экспериментов, однако убедительного подтверждения эффектов нелокальности не получено до сих пор.

В 70-х годах прошлого века появились работы, посвященные магнитно-сверхпроводящим системам (см. обзоры [14, 15, 16]). В таких системах, благодаря эффектам близости, происходит проникновение сверхпроводящего параметра порядка в ферромагнитный (FM) слой и ферромагнитного параметра порядка в сверхпроводящий (S) слой. Благодаря нетривиальному характеру проникновения, в таких системах предсказывается большое количество явлений, приводящих к модификации как сверхпроводимости, так и магнетизма. Большинство экспериментальных работ посвящено изучению влияния магнетизма на сверхпроводимость. Получены нетривиальные зависимости температуры сверхпроводящего перехода  $T_c$  от параметров FM слоев (их количество, толщина, величина прямого и косвенного взаимодействия). Меньшая часть работ посвящена изучению влияния сверхпроводимости на магнетизм. В этих работах использовались макроскопические методы (эффект Керра, ферромагнитный резонанс, СКВИД-магнитометрия) для исследования влияния сверхпроводимости на намагниченность и температуру Кюри. Лишь в последние годы для экспериментального исследования стали использоваться методы, позволяющие изучать локальное распределение намагниченности в S/FM структурах: спектрометрия низко - энергетичных мюонов [17] и резонансная синхротронная рефлектометрия [18]. Нужно отметить, что РПН как инструмент для изучения магнетизма сверхпроводящих структур используется достаточно давно. Здесь стоит отметить работы зарубежных [19] и отечественных [20] физиков по изучению глубины проникновения магнитного поля в различные сверхпроводники. Что касается изучения магнетизма S/FM структур, то работы, проведенные в рамках данной диссертации, являются одними из первых в мире. В третьей главе приведены результаты исследования как сверхпроводящих, так и магнитно-сверхпроводящих систем.

Для поисков эффектов нелокальности был выбран индий ( $\kappa = 0.06$ ,  $\lambda_L = 250\text{Å}$ ,  $T_c=3.4\text{К}$  и  $H_c(0)=280\text{ Э}$ ), как сверхпроводник с наименьшим параметром  $\kappa$ ,

доступным для низкотемпературных исследований в обычном  $^4\text{He}$  криостате. Магнитометрические данные и измерения электросопротивления указывают на то, что данный образец является чистым сверхпроводником первого рода. На рис. 2а представлена экспериментальная спиновая асимметрия  $SA(Q) \equiv [R^+(Q) - R^-(Q)] / [R^+(Q) + R^-(Q)]$ , измеренная при  $T=0.5\text{Tc}$  и  $H=0.97\text{Hc}$  [A3]. Анализ этой кривой показывает, что глубина проникновения магнитного поля в данный образец составляет величину  $\lambda = 1000 \pm 100 \text{ \AA}$ , что больше лондоновской глубины проникновения в несколько раз. Это может быть связано как с эффектами нелокальности, так и с качеством поверхности. Выводом этой работы является то, что РПН может быть использован для поиска таких тонких эффектов в слабомангнитных системах, как эффект нелокальности в сверхпроводниках 1 рода.

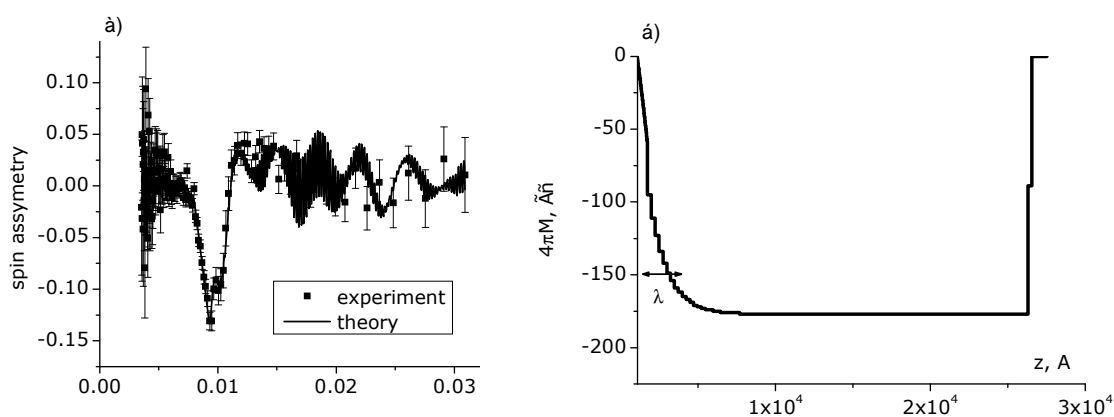


Рис. 2. Результаты исследования глубины проникновения магнитного поля в пленку индия: а) экспериментальная и теоретическая спиновые асимметрии при  $T=0.5\text{Tc}$  и  $H=0.97\text{Hc}$ , б) профиль намагниченности, полученный из обработки данных.

Во второй части главы приводятся результаты исследования магнитного состояния в S/FM структурах. Исследования проводились на структурах  $\text{V}(390\text{A})/\text{Fe}(32\text{A})/[\text{V}(32\text{A})/\text{Fe}(32\text{A})]_{20}/\text{MgO}$  (образец №1) [A4] и  $\text{V}(365\text{A})/\text{Fe}_{0.5}\text{V}_{0.5}(47\text{A})/[\text{V}(47\text{A})/\text{Fe}(47\text{A})]_{20}/\text{MgO}$  (образец №2) [A5]. Температуры сверхпроводящего перехода для образцов №№1 и 2, составляют  $T_c = 3.8\text{K}$  и  $T_c = 3.3\text{K}$  соответственно. В качестве FM слоя в первом и втором

образце использовался слой чистого железа и железо-ванадиевый сплав, соответственно. Периодическая Fe/V структура (ПС) использовалась для генерации стоячей волны (рис.3). Первоначально предполагалось, что сверхпроводящие пары не проникают через толстый FM слой в ПС, в соответствии с данными работы [21].

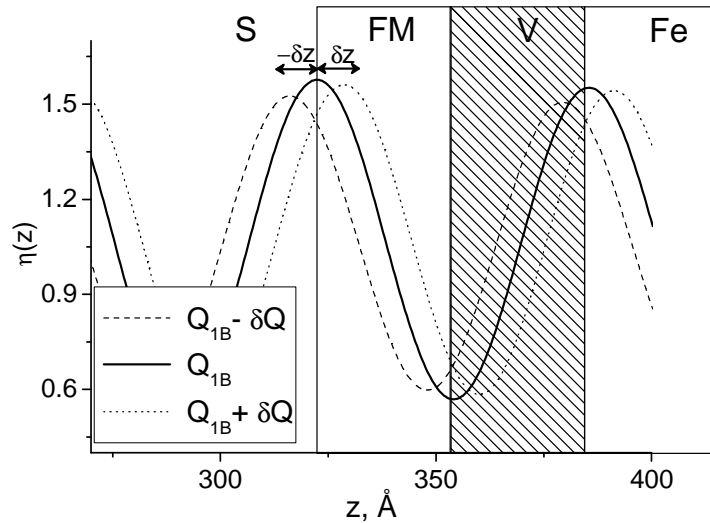


Рис. 3. Пространственная зависимость плотности нейтронов вблизи S/FM интерфейса в состоянии с проекцией спина вдоль направления магнитного поля

Однако в ходе измерений выяснилось, что интенсивность брэгговского отражения, зависящая существенным образом от магнитного состояния ПС, изменяется при изменении температуры. Так на рис. 4 представлены экспериментальные зависимости коэффициента отражения нейтронов  $R(Q)$  для “+ +”, и “- -”, спиновых состояний при напряжённости магнитного поля  $H = 1$  кЭ и значениях температуры  $T = 0.5T_c$ , и  $T = 2T_c$ . Пики при  $Q = 0.1, 0.2$  и  $0.3 \text{ \AA}^{-1}$  соответствуют брэгговским отражениям порядков  $n = 1, 2$  и  $3$ . На кривой  $R^-(Q)$  при  $T = 0.5 T_c$  также видны пики вблизи  $Q = 0.15 \text{ \AA}^{-1}$  и  $0.25 \text{ \AA}^{-1}$ . Данные пики интерпретируются как брэгговские отражения порядков  $n = 3/2$  и  $5/2$  от ПС и соответствуют удвоению периода магнитной структуры ПС (антиферромагнитное

упорядочение слоёв ПС). Обращает на себя внимание сильная температурная зависимость данных пиков: переход в сверхпроводящее состояние ведет к уменьшению пиков целого и увеличению пиков нецелого порядка (величина эффекта – 20-50%). При этом падение зеркального отражения вблизи  $n = 1$  ведет к увеличению диффузного рассеяния вблизи этого пика. Такое поведение говорит о существовании неоднородного в плоскости магнитного состояния, зависящего от температуры. В диссертации приведены температурно-полевые зависимости пиков  $n = 1$  и  $n = 3/2, 5/2$  в диапазоне температур  $T = [1.7 \div 30]$  К и магнитных полей  $H = [0 \div 15]$  кЭ. Данные зависимости показывают, что антиферромагнитное в глубину и неоднородное в плоскости состояния зависят сложным образом от температуры и магнитного поля, с особенностями вблизи  $T_c$  (как выше, так и ниже нее).

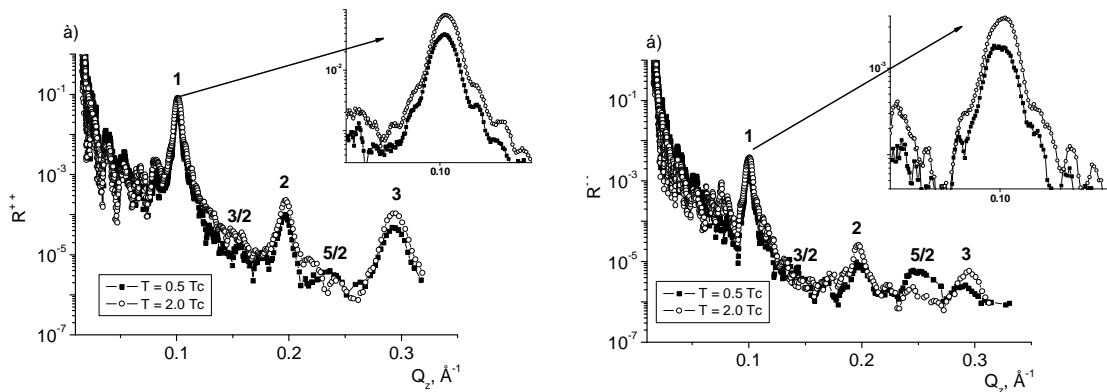


Рис.4 Экспериментальные зависимости коэффициентов отражения нейтронов от переданного волнового вектора, измеренные при  $H=1$  кЭ и  $T=0.5T_c$  и  $T = 2 T_c$ : а)  $R^{++}$ , б)  $R^{-}(Q)$ . Цифрами показаны соответствующие порядки брэгговского отражения нейтронов.

Как было сказано выше, наличие в системе периодической структуры позволяет нам проводить селективные по глубине исследования магнитного состояния вблизи S/FM интерфейса. На рис. 5 представлено полученное распределение магнитной неоднородности вблизи S/FM интерфейса  $\kappa_D(z)$  для образца №1 при  $H=0.7$ кЭ,  $1.5$ кЭ и  $4.5$ кЭ и  $T = 0.8 T_c$  и  $2T_c$ . Из рис.6 видно, что «центр тяжести»  $Z_c$  функции  $\kappa_D(z)$  в полях  $H > 0.7$ кЭ зависит сложным образом от



температуры и внешнего поля. Аналогичное поведение распределения магнитной неколлинеарности, приведенное в диссертации, также обладает немонотонностью при изменении  $T$  и  $H$ .

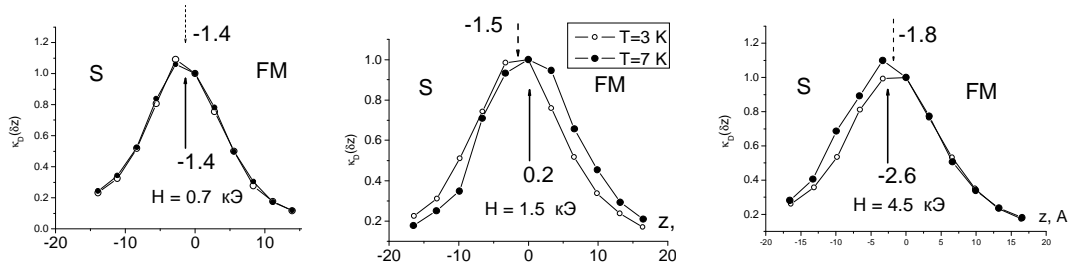


Рис. 5. Распределение магнитной неоднородности при  $H=0.7, 1.5$  и  $4.5$  кЭ. Сплошными и штрихованными стрелками показано положение центра тяжести распределений выше и ниже  $T_C$ .

Таким образом, видно, что магнитное состояние всей Fe/V структуры меняется при низких температурах. Характер изменения магнитного состояния, а именно особенности вблизи  $T_c$  позволяют говорить о влиянии сверхпроводимости на магнитное состояние всей системы. Вместе с тем остаются открытыми вопросы о причине особенностей выше  $T_c$  и зависимости наблюдаемой картины от направления изменения температуры. Для прояснения этих вопросов и дальнейшего исследования эффектов близости в S/FM системах планируется провести эксперименты на других образцах и с использованием комплементарных методик.

В заключительной части главы приведены предложения на создание таких структур. В частности, для исключения влияния периодической структуры предлагается исследовать структуру с одним S/FM интерфейсом. При этом чтобы усилить слабый магнитный сигнал от тонкого FM слоя, предлагается использовать режим усиленных стоячих волн. Расчеты показывают, что оптимизированная структура позволит наблюдать малые ( $\sim 1\%$ ) изменения магнитного момента в FM слое. Второе предложение состоит в использовании

особого генератора стоячих волн, основанного на магнитном отражении. В таком генераторе фазы нейтронных волн с различной поляризацией сдвинуты на  $\pi/2$ . Используя такой генератор можно изучать распределения магнитной неоднородности и неколлинеарности на двух границах ФМ слоя.

**Четвертая глава** посвящена исследованию влияния ультразвукового возбуждения на магнитное состояние антиферромагнитной  $20 \times [\text{Fe}(20\text{\AA})/\text{Cr}(12\text{\AA})/\text{MgO}$  наносистемы. В таких системах антиферромагнитное упорядочение в ФМ слоях вызвано обменным взаимодействием через электроны проводимости диамагнитных прослоек и сильно зависит от их толщины. Следовательно, для управления магнитным состоянием таких систем, помимо внешнего магнитного поля, можно использовать механизмы, изменяющие толщину диамагнитных прослоек. Так в работе [22] для изменения толщины ванадиевых слоев в Fe/V системах их насыщают водородом. В настоящей работе, для изменения толщины слоев хромов предлагается использовать ультразвуковое давление. Звуковая волна создает зависящий от времени градиент давления, что приводит к изменению толщины магнитного и немагнитного слоёв. В результате, соответственно, изменяется величина косвенного обменного взаимодействия, управляющего антиферромагнитным упорядочением слоев железа. Наряду с периодическим во времени изменением величины обменного взаимодействия, возможно также изменение его среднего во времени значения. Последнее может быть связано с несимметричностью относительно нуля значения давления, а также с несимметричностью реакции магнитной системы на приложенное давление. Отметим в этой связи известное явление колебания и дрейфового движения доменной границы (ДГ) под действием звуковой волны.

В исследуемом образце возбуждалась продольная звуковая волна с волновым вектором, направленным перпендикулярно границам раздела (параллельно переданному моменту зеркально отражаемых нейтронов). Возбуждаемые ультразвуковые волны имели частоту 58.5 МГц и 175.5 МГц (первая и третья гармоники колебаний). В магнитных полях напряженностью  $H \sim 20$  Э было наблюдено изменение положений брэгговских максимумов  $n = 1/2$  в

(+ +) и (- -) каналах на  $\Delta Q_z = \pm 3.5 \cdot 10^{-3} \text{ \AA}^{-1}$  соответственно. Такое изменение может быть объяснено процессами неупругого рассеяния на магнитных возбуждениях. Сдвиг максимума в данном случае связывается с процессом поглощения или испускания нейтроном кванта магнитного возбуждения. Включение ультразвука также вело к изменению интенсивности диффузного рассеяния. При включении ультразвука частотой  $f = 175.5 \text{ МГц}$  наблюдалось уширение кривой диффузного рассеяния и ее уменьшение по амплитуде. Такое поведение может быть объяснено уменьшением размера доменов с 2 мкм до 1.5 мкм. При увеличении магнитного поля до 4 кЭ данные эффекты пропадали. Вместе с тем в магнитных полях вблизи насыщения  $H_{\text{sat}} \approx 10 \text{ кЭ}$  наблюдалось наличие острых пиков в незеркальном рассеянии. Положение пика и его спиновое состояние изменялось при изменении магнитного поля и с включением ультразвука. Данные пики связываются нами с возникновением двумерной решетки, образованной шероховатостями границ раздела, чьи периоды повторения зависят от магнитного поля и ультразвукового возбуждения.

**В заключении** сформулированы основные выводы диссертации.

#### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В

#### СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

- A1. L. Deak, H. Spiering, L. Bottyan, D.L. Nagy, Yu. N. Khaidukov and Y. Yoda, "Perturbative Theory of Grazing-Incidence Diffuse Nuclear Resonant Scattering of Synchrotron Radiation", Phys. Rev. B 76 (22), p. 224420 (2007 г)
- A2. Ю.Н. Хайдуков, М.А. Андреева, "Волноводное усиление рассеяния со спин-флипом при отражении поляризованных нейтронов от слоистой структуры «мягкий магнетик/жесткий магнетик»", Вестник М.Г.У., Серия 3 Физика. Астрономия., №2, стр 30 – 34 (2004)
- A3. V.F. Kozhevnikov, C.V. Giuraniuc, M.J. Van Bael, K. Temst, C. Van Haesendonck, T.M. Mishonov, T. Charlton, R.M. Dalgliesh, Yu.N. Khaidukov, Yu.V. Nikitenko, V.L. Aksenov, V.N. Gladilin, V.M. Fomin, J.T. Devreese, and J.O. Indekeu, "Evidence for nonmonotonic magnetic field penetration in a type-I superconductor",

направлено в журнал Phys.Rev. Let., препринт доступен по адресу <http://arxiv.org/abs/0704.1872>

А4. В.Л. Аксенов, Ю.В. Никитенко, А.В. Петренко, В.М. Уздин, Ю.Н. Хайдуков, Х. Цабель, “Особенности магнитного состояния слоистой наноструктуры ферромагнетик-сверхпроводник Fe-V” //Кристаллография, т. 52(3), с 403-409 (2007)

А5. V.L. Aksenov, K.N. Jernenkov, Yu.N. Khaidukov, Yu.V. Nikitenko, A.V. Petrenko, V.V. Proglyado, G. Andersson, R. Wappling “Interplay between superconductivity and ferromagnetism in Fe/V multilayered structure studied by polarized neutron reflectometry” //Physica B V. 356, 9-13 (2004)

А6. В.Л. Аксёнов, Ю.В. Никитенко, В.В. Проглядо, Ю.Н. Хайдуков, В. Гаврилов, Э. Райтман, Л. Боттян, Д. Надь, «Исследование влияния ультразвуковой упругой волны на магнитное упорядочение в слоистой структуре 20x[Fe(1.99нм)/Cr(1.2нм)]/MgO», препринт ОИЯИ P14-2007-109, Кристаллография, (принято к печати)

### Список цитируемой литературы

1. G.P. Felcher, “Neutron reflection as a probe of surface magnetism”, Phys. Rev. B 24 (1981) 1595-1598
2. Корнеев Д.А., Пасюк В.В., Ржаны Х., Щебетов А.Ф.// Сообщения ОИЯИ. 1981. P3-81-546.
3. V.L. Aksenov, K.N. Jernenkov, S.V. Kozhevnikov, H. Lauter, V. Lauter-Pasyuk, Yu.V. Nikitenko, A.V. Petrenko, “Polarized neutron spectrometer REMUR at the pulsed reactor IBR-2”, JINR Communications D13-2004-47 (2004).
4. Radu F., Ignatovich V.K. “Generalized matrix method for the transmission of neutrons through multilayer magnetic systems with noncollinear magnetization.” Physica B. 1999. V. 267-268. P. 175-180.

5. A. Ruhm, B.P. Toperverg, H. Dosch, "Supermatrix approach to polarized neutron reflectivity from arbitrary spin structures", *Phys. Rev. B.* 60, (1999)
6. R. M. Osgood III, S. K. Sinha, J. W. Freeland, Y. U. Idzerda and. S. D. Bader, "X-ray scattering from magnetically and structurally rough interfaces", *JMMM* 198-199, 698 (1999).
7. R. Röhlberger, "Theory of X-ray grazing incidence reflection in the presence of nuclear resonance excitation", *Hyperfine Interactions* 123/124 (1999) 301-325
8. G.H. Vineyard, "Grazing-incidence diffraction and the distorted-wave approximation for the study of surfaces", *Phys. Rev. B* 26, 4146 - 4159 (1982)
9. S. K. Sinha, E. B. Sirota, S. Garoff, and H.B. Stanley, "X-ray and neutron scattering from rough surfaces", *Phys. Rev B* 38, 2297 (1988)
10. B. P. Toperverg, "Specular reflection and off-specular scattering of polarized neutrons", *Physica B* 297, pp 160-168, 2001
11. Ming et al," Microscopic structure of interfaces in  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$  heterostructures and superlattices studied by x-ray scattering and fluorescence yield", *PRB* 47, 16373 (1993)
12. V.L. Aksenov, K.N. Jernenkov, S.V. Kozhevnikov, H. Lauter, V. Lauter-Pasyuk, Yu.V. Nikitenko, A.V. Petrenko, "Polarized neutron spectrometer REMUR at the pulsed reactor IBR-2", *JINR Communications* D13-2004-47 (2004).
13. A.B. Pippard, "An experimental and theoretical study of the relation between magnetic field and current in a superconductor". *Proc. R. Soc. London. Ser.A* 216, 546-568 (1953).
14. А.И. Буздин, Л.Н. Булаевский, М.Л. Кулич, С.В. Панюков, «Магнитные сверхпроводники», *УФН* 144, с.597 (1984)
15. Ю.А.Изюмов, Ю.Н. Прошин, М.Г. Хусаинов, "Конкуренция сверхпроводимости и магнетизма в гетероструктурах ферромагнетик/сверхпроводник", *УФН* 172, 113 (2002)
16. A. I. Buzdin, "Proximity effects in superconductor-ferromagnet heterostructures", *Reviews of modern physics* 77, p. 935 (2005)

17. A. J. Drew et. al, "Coexistence and Coupling of Superconductivity and Magnetism in Thin Film Structures", PRL **95**, 197201 (2005)
18. M. A. Andreeva et.al, "Nuclear Resonant Reflectivity Investigations of a Thin Magnetic  $^{57}\text{Fe}$  Layer Adjacent to a Superconducting V Layer", Hyperfine Interactions 156/157, p.607 (2004)
19. G.P. Felcher, R.T. Kampwirth, K.E. Gray, and R. Felici, "Polarized-Neutron Reflections: A New Technique Used to Measure the Magnetic Field Penetration Depth in Superconducting Niobium", Phys. Rev. Lett. **52**, 1539 (1984)
20. V. Lauter-Pasyuk, H.J. Lauter, V.L. Aksenov, E.I. Kornilov, A.V. Petrenko, P. Leiderer, "Determination of the magnetic field penetration depth in  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  superconducting films by polarized neutron reflectometry", Physica B **248**, 166 (1998)
21. P Koorevaar, Y Suzuki, R Coehoorn, J Aarts , "Decoupling of superconducting V by ultrathin Fe layers in V/Fe multilayers", Phys. Rev. B 49, 441 - 449 (1994)
22. Laberge D., Sutter C., Zabel H., Hjorvarsson B., "Hydrogen induced changing of the interlayer coupling in  $\text{Fe}_{(3)}\text{V}_{(x)}$  superlattices", JMMM. 1999. V. 192. P. 238.