

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

14-2002-115

На правах рукописи
УДК 538.97

КОЖЕВНИКОВ
Сергей Васильевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ
ЭФФЕКТА ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСЩЕПЛЕНИЯ
НЕЙТРОННОГО ПУЧКА В МАГНИТНЫХ СРЕДАХ**

Специальность: 01.04.07 — физика конденсированного
состояния

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 2002

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

Научный руководитель

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

Официальные оппоненты

член-корреспондент РАН,
профессор Ю.Г. Абов

доктор физико-математических наук
К.М. Подурец

Ведущая организация

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

Защита состоится “___” _____ 2002 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 “___” _____ 2002 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



А.Г. Попеко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В физике конденсированного состояния одной из важнейших областей исследований является магнетизм тонких плёнок и слоистых структур, привлекающих внимание многих исследователей из-за широкого практического применения: для магнитной записи и хранения информации (аудио- и видеозапись, гибкие и жёсткие диски в компьютерах), в качестве датчиков магнитного поля, для создания и анализа поляризованных пучков нейтронов. Различны требования, предъявляемые к слоистым магнитным структурам. Например, в магнитной записи существует задача повышения плотности записи информации. Для этого нужны плёнки с магнитной анизотропией, перпендикулярной плоскости. Для постоянных магнитов нужны материалы с большой шириной петли гистерезиса, с большой остаточной намагниченностью и т.д. Поэтому изучение зависимости свойств магнитных материалов от внешних условий, структуры образцов, способов приготовления, является важной задачей. Таким образом, поиск новых методов исследования и совершенствование уже существующих представляется весьма актуальным.

Мощным методом исследования магнитных сред являются поляризованные пучки медленных нейтронов [1]*. Взаимодействие нейтронов с магнитной средой обладает некоторыми особенностями. На границе раздела магнитно-неколлинеарных сред при отражении и преломлении пучка существует вероятность спиновых переходов с изменением знака проекции спина на направление магнитного поля. При этом изменяется потенциальная энергия нейтронов в магнитном поле. Поскольку полная энергия нейтронов сохраняется, то это приводит к изменению компоненты скорости, перпендикулярной границе раздела сред. Таким образом, в пространстве возникают новые пучки нейтронов, испытавших различные спиновые переходы. Эффект пространственного расщепления пучка был теоретически предсказан в 1978 году [2] и экспериментально обнаружен в 1995 году [3] (см. также [4]). Величина пространственного расщепления пучка зависит от величины внутреннего магнитного поля в среде, поэтому эффект расщепления можно использовать для исследования магнитной структуры слоистых сред.

Свойства нейтронного пучка после взаимодействия с магнитно-неколлинеарной средой (высокая степень поляризации, зависимость угла скольжения пучка от длины волны нейтронов и внутреннего магнитного поля) могут быть использованы также для решения методических задач. Например, для изучения слоистых магнитно-неколлинеарных структур широко

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

используется рефлектометрия поляризованных нейтронов. При проведении поляризационного анализа в экспериментальные данные вносится дополнительная ошибка, связанная с поляризующей эффективностью поляризатора и анализатора. Поэтому повышение точности поляризационного анализа является актуальной задачей. Применение пространственного расщепления пучка даёт возможность улучшения поляризационного анализа.

Хотя к 1996 году имелись все указания на перспективность использования пространственного расщепления нейтронного пучка, детального экспериментального исследования эффекта расщепления до сих пор не проводилось.

Данная работа посвящена вопросам изучения явления пространственного расщепления нейтронного пучка и использования эффекта расщепления для исследования магнитно-неколлинеарных сред.

Цель работы состоит в экспериментальном исследовании эффекта пространственного расщепления нейтронного пучка и возможности его применения для изучения магнитно-неколлинеарных сред.

В соответствии с целью работы поставлены следующие основные задачи:

1. Зарегистрировать и исследовать эффект пространственного расщепления пучка нейтронов в геометрии пропускания через магнитную плёнку.
2. Зарегистрировать и исследовать эффект пространственного расщепления нейтронного пучка при прохождении через границы раздела плёнки с вакуумом и плёнки с подложкой.
3. Провести сравнение экспериментальных данных по пространственному расщеплению с численными расчётами, определив параметры однородно намагниченной магнитно-неколлинеарной плёнки.
4. Показать возможности метода пространственного расщепления по исследованию доменной структуры слоистого образца.
5. Исследовать перспективность использования эффекта расщепления для формирования и анализа пучков нейтронов.

Результаты, выносимые на защиту

1. Впервые экспериментально показано, что на границе раздела магнитно-неколлинеарных сред преломлённый пучок нейтронов расщепляется на четыре пучка. Определены значения напряжённости магнитного поля и магнитной индукции плёнки отдельно для каждой границы раздела вакуум-плёнка и плёнка-подложка.

2. Впервые экспериментально продемонстрирована возможность поляризации и монохроматизации пучка при незеркальном отражении нейтронов от магнитной плёнки. Предложен метод определения ядерного потенциала немагнитной подложки с помощью измерения напряжённости приложенного внешнего магнитного поля.
3. Экспериментально показано, что при незеркальном отражении нейтронов уменьшается ошибка коэффициентов отражения, связанная с поляризующей эффективностью поляризатора и анализатора.
4. Пространственное расщепление пучка впервые использовано для наблюдения стоячих нейтронных волн в слоистой структуре $\text{Ti}(300 \text{ \AA})/\text{Co}(60 \text{ \AA})/\text{Ti}(2000 \text{ \AA})/\text{Cu}(1000 \text{ \AA})/\text{стекло}$ при полном отражении поляризованного пучка нейтронов.
5. Введено понятие анализа спиновых состояний нейтронов во внешнем и внутреннем магнитных полях. Предложен способ разделения этих состояний с помощью поляризационного анализа и пространственного расщепления пучка.
6. В магнитной плёнке $\text{Gd}(50 \text{ \AA})/\text{Fe}(1000 \text{ \AA})/\text{стекло}$ с помощью пространственного расщепления пучка обнаружены магнитно-неколлинеарные области малых размеров (около 2 % от площади поверхности плёнки), в которых намагниченность направлена под углом 60° к плоскости образца.

Научная новизна

Впервые проведено систематическое исследование эффекта пространственного расщепления нейтронного пучка в зависимости от величины и направления внешнего магнитного поля, длины волны нейтронов, для различной геометрии. Была использована схема полного поляризационного анализа с позиционно-чувствительным детектором, что позволило повысить надёжность данных и значительно сократить время измерений.

Впервые экспериментально показано, что при преломлении неполяризованного нейтронного пучка на границе раздела магнитно-неколлинеарных сред наблюдаются четыре пучка, соответствующие четырём спиновым переходам.

Впервые пространственное расщепление пучка использовано для наблюдения стоячих нейтронных волн в слоистой магнитной структуре.

Впервые рассмотрено совместное использование поляризационного анализа и эффекта пространственного расщепления нейтронного пучка.

Показано, что при незеркальном отражении в 5 раз уменьшается ошибка коэффициентов отражения, связанная с поляризующей эффективностью поляризатора и анализатора.

Впервые показано, что можно разделять спиновые состояния нейтронов во внешнем магнитном поле и внутреннем магнитном поле. Это позволяет исследовать сложные магнитные структуры, что и было экспериментально продемонстрировано на конкретном примере бислоя FeGd.

Впервые в диссертационной работе экспериментально показана возможность применения эффекта пространственного расщепления для поляризации и монохроматизации нейтронного пучка. Продемонстрирован метод определения ядерного потенциала немагнитной подложки с помощью измерения внешнего магнитного поля.

Практическая ценность работы

Метод определения параметров магнитно-неколлинеарной среды, развитый в работе, имеет перспективу использования для неразрушающего контроля магнитных границ, находящихся в объёме.

Зависимость углового распределения от длины волны нейтронов и магнитного поля в среде может быть использована для визуализации нейтронных волн в слоистых структурах и распределения локальных магнитных полей вблизи границ раздела магнитных сред. Результаты работы могут быть использованы для спектральных измерений с белым пучком нейтронов. В этом случае резко увеличивается интенсивность нейтронов, поскольку можно отказаться от монохроматизации нейтронов и работать с пространственным распределением интенсивности. Это особенно важно для источников нейтронов с малым и средним потоком, на которых затруднены спектральные измерения из-за низкой интенсивности нейтронов.

Уменьшение ошибки коэффициентов отражения при незеркальном отражении может быть использовано при исследовании малых эффектов спиновых переходов нейтронов “+” и “-” в магнитно-неколлинеарных средах.

Продемонстрированный в работе метод исследования магнитной доменной структуры в слоистой плёнке Fe-Gd может быть применён при изучении других систем с магнитной анизотропией.

Результаты, полученные в работе, могут быть использованы на практике при создании конкретного монохроматора-поляризатора с регулируемой полосой пропускания.

Метод определения ядерного потенциала среды с помощью внешнего магнитного поля может быть применён для экспрессного контроля свойств подложек после напыления на них магнитных плёнок. Метод позволяет использовать в эксперименте мондетектор и источник нейтронов с неизвестным спектром.

Апробация работы

Основные результаты работы опубликованы в 8 статьях и 5 препринтах.

Результаты, представленные в работе, докладывались на международных и российских конференциях, конференциях молодых учёных в ОИЯИ, на семинарах в отделе нейтронных исследований конденсированных сред Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка:

1. International Workshop "Polarized Neutrons for Condensed Matter Investigations", Dubna, Russia, June 18-20, 1996.
2. 1st European Conference on Neutron Scattering, Interlaken, Switzerland, October 8-11, 1996.
3. XV International Workshop on the Application of Neutron Scattering to Solid State Physics, Zarechny, Russia, March 17-23, 1997.
4. 6th Summer School on Neutron Scattering, Zuoz, Switzerland, August 8-14, 1998.
5. Вторая национальная конференция по применению рентгеновского, синхротронного излучений, нейтронов и электронов для исследования материалов, Москва, Россия, 23-27 мая 1999.
6. 7th Summer School on Neutron Scattering, Zuoz, Switzerland, August 7-13, 1999.
7. 2nd European Conference on Neutron Scattering, Budapest, Hungary, September 1-4, 1999.
8. XVI Совещание по использованию рассеяния нейтронов в исследованиях конденсированного состояния, Обнинск, Россия, 13-17 сентября 1999.
9. European Workshop on Neutron Optics for the Next Millenium, PSI, Villigen, Switzerland, November 25-27, 1999.
10. 2^{ème} Ecole Française de Réflectivité, Le Croisic, France, June 4-9, 2000.
11. International Workshop "Polarized Neutrons for Condensed Matter Investigations", Gatchina, Russia, June 20-25, 2000.
12. International Conference on Neutron Scattering, Munich, Germany, September 9-13, 2001.
13. 3rd International Conference on Physics of Low Dimensional Structures, Chernogolovka, Russia, October 14-19, 2001.
14. Scientific Seminar "Magnetic Multilayers as seen by Photons and Neutrons", Budapest, Hungary, December 6-9, 2001.

Личный вклад автора

Автор участвовал во всех экспериментах, результаты которых вошли в диссертацию, в получении и обсуждении научных результатов, в развитии методики проведения эксперимента. Все экспериментальные данные обработаны автором. Им написаны программы первичной обработки экспериментальных данных, полученных с помощью позиционно-чувствительного детектора. Автор предложил исследовать эффект компенсации ядерного потенциала немагнитной подложки внешним магнитным полем. Им показана возможность монохроматизации нейтронного пучка с помощью пространственного расщепления. Значительный вклад автор внёс в разработку метода рефрактометрии. Он подготовил и провёл сложный эксперимент по преломлению нейтронного пучка на одной границе раздела сред (малые размеры образца, величина эффекта на уровне фона) и предложил интерпретацию экспериментальных данных.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Работа изложена на 94 страницах, включая 45 рисунков, 2 таблицы и 102 наименования литературы.

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.

В первой главе рассмотрено поведение пучка нейтронов в магнитном поле. Сформулированы экспериментальные условия, необходимые для наблюдения пространственного расщепления пучка, сделаны оценки величины эффекта расщепления. Показано, что для нейтронов с длиной волны 4 \AA при угле скольжения пучка 3 мрад в магнитном поле 1 кГс на расстоянии 10 метров от границы раздела магнитной области пространственное расщепление пучка составляет 3 мм . Из закона сохранения для углов скольжения пучков нейтронов при отражении и преломлении на границе раздела двух магнитно-неколлинеарных сред (рис. 1) следуют выражения, соответствующие четырём спиновым переходам [5]:

$$(\theta^{+-})^2 = \theta_0^2 + \gamma[(U_1 - U_2) + \mu(B_1 + B_2)]\lambda^2 \quad (1)$$

$$(\theta^{++})^2 = \theta_0^2 + \gamma[(U_1 - U_2) + \mu(B_1 - B_2)]\lambda^2 \quad (2)$$

$$(\theta^{--})^2 = \theta_0^2 + \gamma[(U_1 - U_2) - \mu(B_1 - B_2)]\lambda^2 \quad (3)$$

$$(\theta^-)^2 = \theta_0^2 + \gamma[(U_1 - U_2) - \mu(B_1 + B_2)]\lambda^2 \quad (4)$$

где $\gamma = \frac{2m}{h^2}$; m – масса нейтрона; h – постоянная Планка; μ – магнитный момент нейтрона; λ – длина волны нейтрона; θ_0 – угол скольжения начального пучка нейтрона; θ – угол скольжения преломлённых и отражённых пучков; $U_{1,2}$ – ядерный потенциал сред; $B_{1,2}$ – магнитная индукция. Зависимость вероятности спиновых переходов “+” и “-” от угла χ между векторами магнитной индукции в соседних областях определяется выражением $W^{+-}, W^{++} \sim \sin^2 \chi$ [2,6]. Из выражений (1)-(4) видно, что при преломлении на одной границе происходит расщепление неполяризованного пучка нейтронов на четыре пучка. При отражении нейтронов наблюдается три пучка – один зеркальный и два незеркальных. При пропускании нейтронов через магнитно-неколлинеарный слой на немагнитной подложке ($U_1=0$; $U_2=U$; $B_2=B_1$) также наблюдается три пучка.

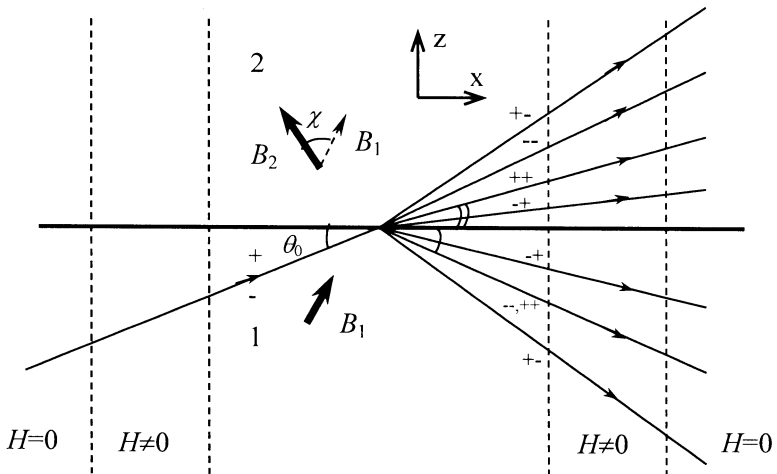


Рис. 1. Пространственное расщепление пучка нейтронов на границе раздела магнитно-неколлинеарных сред.

Далее в первой главе приведён обзор экспериментальных работ, связанных с пространственным расщеплением пучка в магнитных доменных структурах и магнитно-неколлинеарных средах.

Вторая глава посвящена методике эксперимента. Описан спектрометр поляризованных нейтронов СПН-1 на реакторе ИБР-2 в Дубне [7]. По сравнению со старой конфигурацией СПН-1 [8] новыми элементами являются многощелевой анализатор, адиабатический радиочастотный спин-флиппер [9] и однокоординатный позиционно-чувствительный детектор [10]. Применение новых элементов позволило работать с широкими сечениями пучка и значительно сократить время измерений. В диссертационной работе экспериментально измерены эффективности детекторов, спин-флипперов, анализатора и поляризатора [7]. Личный вклад автора состоит в участии в экспериментах, в написании программ первичной обработки данных, в проведении калибровки рефлектометра по известному методу 3P2S (три поляризатора, два спин-флиппера) [11,12].

В третьей главе описаны результаты исследования эффекта пространственного расщепления пучка при отражении и преломлении нейтронов. Для сравнения эксперимента с теорией были проведены эксперименты с магнитными плёнками во внешнем магнитном поле, направленном под углом к плоскости образца (рис. 2). В этом случае локальное магнитное поле около поверхности плёнки $H_{loc} = H_{ext} + (J_{\perp} - H_{sc})$ равно внешнему магнитному полю H_{ext} , поскольку размагничивающее поле H_{sc} полностью компенсирует перпендикулярную

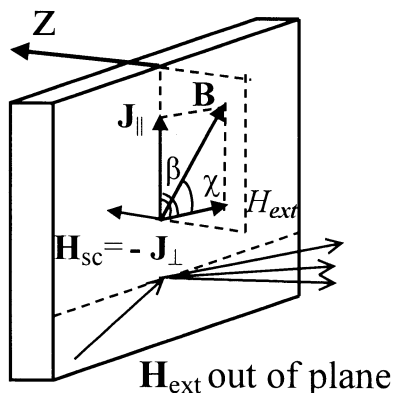


Рис.2. Однородно намагниченная плёнка в наклонном внешнем магнитном поле.

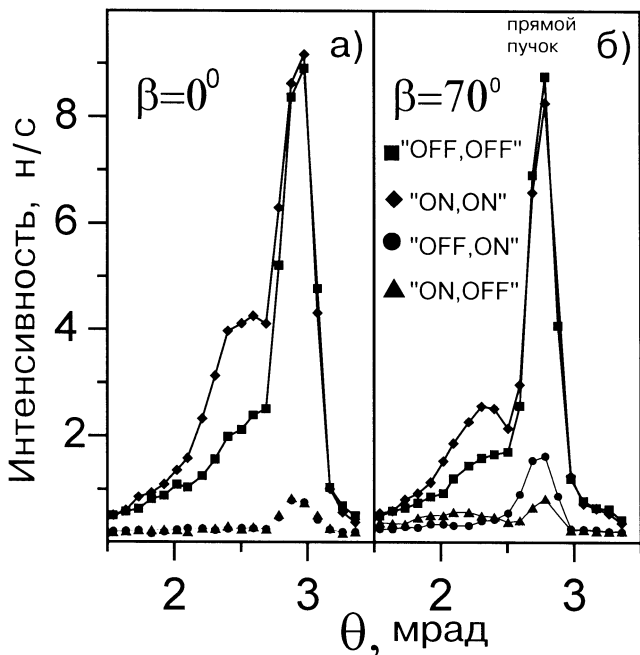


Рис. 3. Угловое распределение интенсивности нейтронов в интервале длин волн 0,9-2,7 Å, прошедших через магнитную плёнку FeAlSi.

плоскости компоненту намагниченности. На рис. 3 показано угловое распределение интенсивности нейтронов, прошедших через магнитную плёнку FeAlSi (толщина 5 мкм, размеры $10 \times 20 \times 1$ мм³) и преломлённых в немагнитной подложке [A1]. В измерениях использовался монодетектор и анализатор с узкой щелью. Большой пик справа обусловлен нейтронами, прошедшими мимо плёнки. Индексами “off(on),off(on)” обозначены состояния спин-флипперов “выкл.(вкл.), выкл.(вкл.)”, которые отвечают, в основном, спиновым состояниям нейтронов “+(-),+(-)” во внешнем магнитном поле. Для более точного анализа спиновых состояний необходимо учитывать поляризующие эффективности поляризатора и анализатора. В параллельном внешнем магнитном поле 6,8 кЭ (рис. 3 а) интенсивность в режимах “off,on” и “on,off” равна нулю. В наклонном внешнем магнитном поле (рис. 3 б) пики интенсивности “off,off” и “on,on” уменьшаются, слева от них появляются нейтроны в режиме “on,off”, а справа в режиме “off,on”. Таким образом, наблюдается три пучка нейтронов. Такой эксперимент по пространственному расщеплению пучка при пропускании через магнитно-неколлинеарный слой на немагнитной подложке был проведён впервые. При этом был использован поляризационный анализ.

В этом же эксперименте показано, что пропускание нейтронов, испытавших спиновые переходы “+” и “-” увеличивается с ростом угла β между плоскостью образца и вектором напряжённости внешнего магнитного поля. Из уравнений (1) и (4) следует, что при одном угле скольжения θ нейтроны, испытавшие спиновые переходы “+” и “-”, должны иметь разные длины волн λ_{+-} и λ_{-+} . В работе экспериментально продемонстрировано, что расщепление в спектре нейтронов при одном угле скольжения растёт с увеличением напряжённости внешнего магнитного поля по закону:

$$(\lambda_{-+}^{-2} - \lambda_{+-}^{-2}) = \frac{8m\mu}{h^2(\theta_0^2 - \theta^2)} H \quad (5)$$

В работе [13] были получены коэффициенты отражения нейтронов от тонкой магнитной плёнки Co (700 Å) на подложке из стекла. Из подгонки расчётной модели к экспериментальным данным были получены параметры магнитно-неколлинеарной плёнки. В наших работах [A2,3] мы использовали этот же образец для исследования пространственного расщепления пучка. Размеры образца составляли 50×100×5 мм². Использовался многощелевой анализатор и ПЧД. Показано, что величина пространственного расщепления пучка при отражении и пропускании растёт с увеличением длины волны нейтронов и напряжённости внешнего магнитного поля (рис. 4). Сплошными линиями показан расчёт по формулам (1)-(4) с соответствующими значениями величины ядерного потенциала подложки и напряжённости внешнего магнитного поля. Из экспериментальных данных (рис. 4 а) получено, что пучок нейтронов, испытавших спиновый переход “+”, в магнитном поле $H^* = 7,9 \pm 0,2$ кЭ проходит через образец без преломления. При этом магнитное поле компенсирует величину ядерного потенциала подложки: $2\mu H^* = U$. Отсюда было определено значение ядерного потенциала подложки: $U = 95,3 \pm 2,4$ нэВ [A4].

В диссертационной работе продемонстрировано, что коэффициенты пропускания “+” и “-” увеличиваются с ростом угла β между плоскостью образца и вектором напряжённости внешнего магнитного поля. Экспериментально показано, что незеркально отражённый пучок нейтронов, угол скольжения которого $\theta > \theta_0$ (рис. 5 а,в), обусловлен спиновым переходом “+”. Измерена степень поляризации этого пучка, усреднённая по интервалу длин волн нейтронов 8-10 Å: $P = 0,94 \pm 0,11$. Показано, что нейтроны с $\theta < \theta_0$ (рис. 5 б,г) испытывают спиновый переход “-”, а степень поляризации пучка, усреднённая по интервалу длин волн 6-8 Å, составила $P = 0,97 \pm 0,08$.

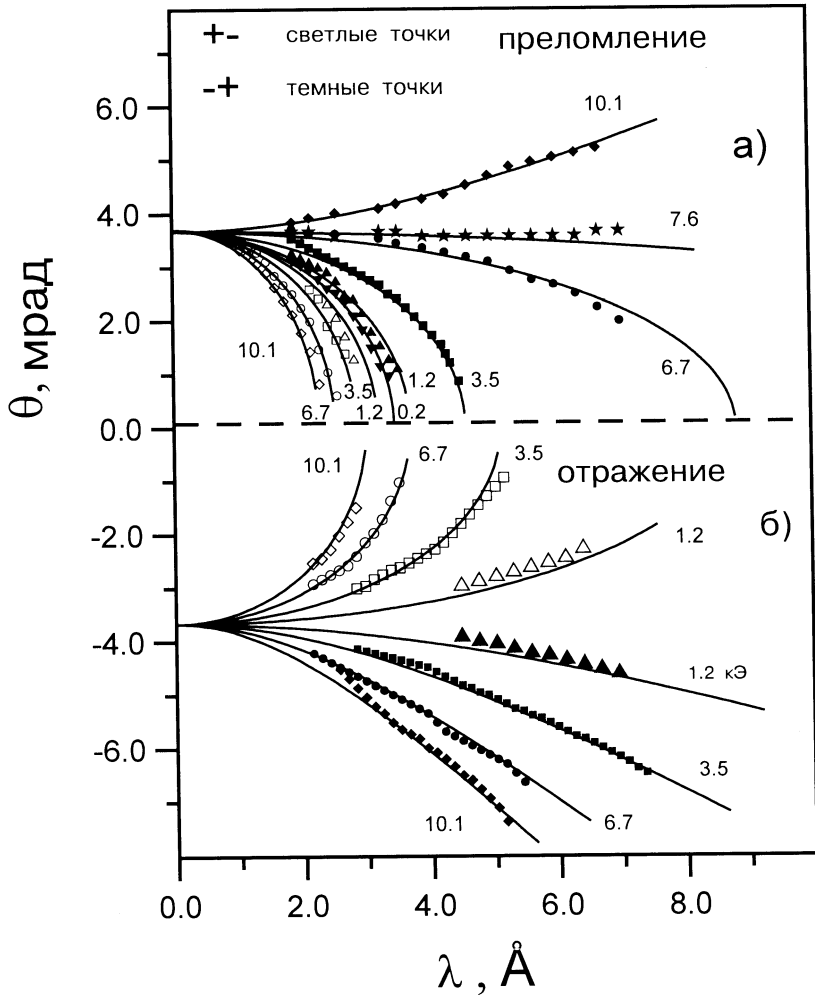


Рис. 4. Угол скольжения преломлённых (а) и отражённых (б) пучков нейтронов в зависимости от длины волны (магнитная плёнка Co) при различных значениях напряжённости внешнего магнитного поля.

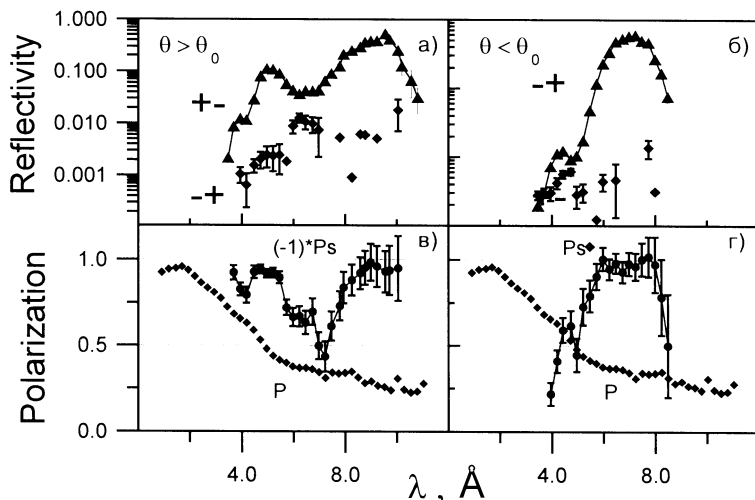


Рис. 5. а,б – коэффициенты отражения незеркальных пучков нейтронов; в,г – степень поляризации пучка нейтронов после поляризатора (P) и отражённого от плёнки Co в наклонном внешнем магнитном поле (P_s).

В нашей работе [A5] впервые экспериментально продемонстрировано, что при преломлении пучка нейтронов на границе раздела магнитно-неколлинеарных сред в пространстве наблюдаются четыре пучка, соответствующие четырём спиновым переходам. На рис. 6 приведена схема эксперимента. Внешнее магнитное поле 4,5 кЭ было приложено под углом 70° к плоскости магнитной плёнки $FeAlSi$ толщиной 20 мкм. Подложка и тонкий слой Cr (500 Å) были немагнитными, размеры образца составляли $5 \times 20 \times 1$ мм³. На рис. 7 показана зависимость угла скольжения от длины волны нейтронов для первой и второй границ раздела. Можно видеть, что для первой границы наблюдаются четыре пучка, а для второй только три. Четвёртый пучок, обусловленный спиновым переходом “-+”, слабо преломляется и перекрывается прямым пучком, прошедшим мимо образца. Из экспериментальных значений углов скольжения преломлённых пучков (1)-(4) были получены параметры вблизи каждой границы раздела:

$U_1=148,3 \pm 4,4$ нэВ; $B_1=11,8 \pm 0,2$ кГс; $H_1=5,0 \pm 0,3$ кЭ; $(U_2-U)=108,4 \pm 3,2$ нэВ; $B_2=10,9 \pm 0,4$ кГс; $H_2=3,0 \pm 0,7$ кЭ, где U_1 и U_2 – ядерный потенциал магнитной плёнки $FeAlSi$ вблизи первой и второй границы; U – ядерный потенциал немагнитной подложки; B_1 и B_2 – величина магнитной индукции в магнитной плёнке $FeAlSi$ вблизи первой и второй границы раздела; H_1 и H_2 – величина напряжённости магнитного поля в вакууме около поверхности магнитной

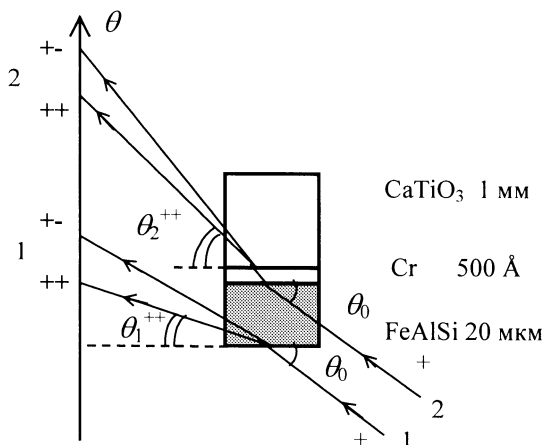


Рис. 6. Схема эксперимента по преломлению нейтронного пучка на границе раздела магнитно-неколлинеарных сред: 1 – вакуум-плёнка; 2 – плёнка-подложка.

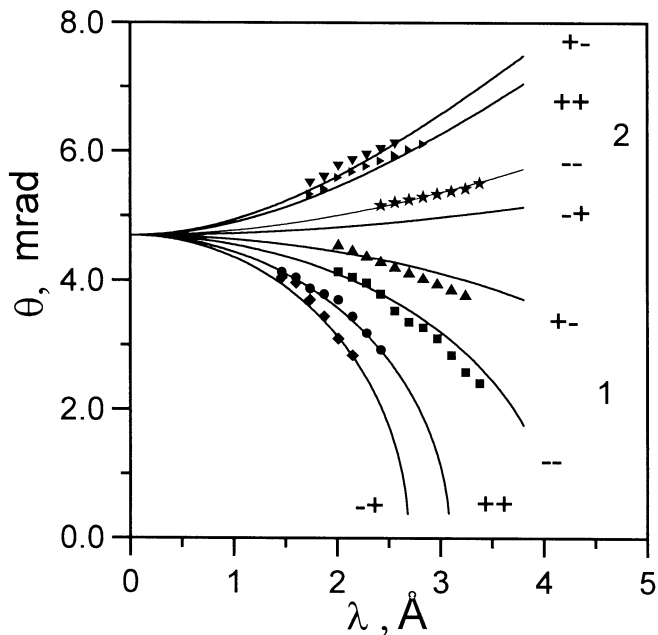


Рис. 7. Угол скольжения преломлённых пучков нейтронов в зависимости от длины волны нейтронов: 1 – преломление на первой границе; 2 – преломление на второй границе раздела.

плёнки и в подложке соответственно. Сплошными линиями на рис. 7 показан расчёт с полученными экспериментальными параметрами.

В работе [14] методом нейтронной радиографии с рефракционным контрастом на границах раздела восстановлены изображения магнитных доменов в монокристалле Fe. В нашей работе [A5] получены значения магнитных параметров вблизи границ раздела. Нами показана возможность количественного анализа магнитных параметров на границе раздела магнитно-неколлинеарных сред. Из граничных условий получены значение угла $\chi_{1,2}$ между векторами $\mathbf{B}_{1,2}$ и $\mathbf{H}_{1,2}$, величина намагниченности $J_{1,2}$, значение угла $\alpha_{1,2}$ между вектором $\mathbf{J}_{1,2}$ и плоскостью образца (знак угла α соответствует знаку проекции вектора \mathbf{J} на направление нормали к плоскости плёнки):

$$\begin{aligned} \chi_1 &= 46.7 \pm 1.6^\circ; J_1 = 10.1 \pm 0.3 \text{ кОе}; \alpha_1 = 3.1 \pm 2.0^\circ; \\ \chi_2 &= 45.6 \pm 10.8^\circ; J_2 = 9.2 \pm 0.8 \text{ кОе}; \alpha_2 = -10.2 \pm 6.2^\circ. \end{aligned}$$

Эти параметры близки к средним по объёму значениям $B=12,2$ кГс и угла $\chi=50^\circ$, полученным методом ларморовской прецессии спина нейтрона при пропускании пучка через магнитную плёнку FeAlSi толщиной 5 мкм. Таким образом, в работе показано, что пространственное расщепление пучка можно использовать для определения магнитных параметров вблизи границ раздела магнитно-неколлинеарных сред с точностью 3 %. Преимуществом данного метода является то, что граница раздела сред может находиться в объёме образца. К недостаткам можно отнести зависимость точности метода от шероховатости границ раздела.

Четвёртая глава посвящена методическим применениям пространственного расщепления для формирования и анализа пучков нейтронов. В работе показано, что незеркально отражение нейтронов можно использовать для поляризации и монохроматизации пучка. Как видно из рис. 5 в,г, незеркально отражённые пучки полностью поляризованы для больших длин волн. Длина волны отражённых нейтронов, имеющих один угол скольжения, зависит от величины напряжённости внешнего магнитного поля (рис. 4). Для отражённого пучка нейтронов, испытавших спиновый переход “+”, выполняется соотношение:

$$\lambda^2 = \frac{h^2}{4m\mu} \frac{(\theta^2 - \theta_0^2)}{H} \quad (6)$$

Выбирая с помощью диафрагмы на детекторе угол θ и коллимацию $\Delta\theta$, можно выбрать из спектра нейтроны с определённой длиной волны. В работе [A6] экспериментально показано, что с помощью внешнего магнитного поля можно регулировать положение по λ и ширину полосы пропускания $\Delta\lambda$ такого монохроматора-поляризатора. В таблице приведены экспериментальные и

расчётные характеристики монохроматора при $H_1=3,5$ кЭ и $H_2=6,7$ кЭ и $\theta=4,48$ мрад, $\Delta\theta=0,26$ мрад.

Таблица. Характеристики монохроматора

	эксперимент	расчёт
$\lambda_1, \text{Å}$	$3,4\pm 0,1 \text{ Å}$	$3,58 \text{ Å}$
$\lambda_2, \text{Å}$	$2,7\pm 0,1 \text{ Å}$	$2,59 \text{ Å}$
$\Delta\lambda_1, \text{Å}$	$0,7\pm 0,1 \text{ Å}$	$0,73 \text{ Å}$
$\Delta\lambda_2, \text{Å}$	$0,5\pm 0,1 \text{ Å}$	$0,53 \text{ Å}$
$\sqrt{H_2 / H_1}$	$1,38\pm 0,10$	
λ_1/λ_2	$1,26\pm 0,06$	$1,38$
$\Delta\lambda_1/\Delta\lambda_2$	$1,40\pm 0,34$	$1,38$
$\Delta\lambda_1/\lambda_1$	$0,21\pm 0,07$	$0,21$
$\Delta\lambda_2/\lambda_2$	$0,19\pm 0,04$	$0,21$

Можно видеть, что экспериментальные характеристики близки к расчётным, положение и ширина полосы пропускания увеличиваются с уменьшением величины напряжённости внешнего магнитного поля по закону $\lambda \sim H^{-1/2}$ и $\Delta\lambda \sim H^{-1/2}$. При этом коэффициент отражения составляет примерно 50-60% (рис. 5 а,б). Монохроматор может быть использован для холодных нейтронов. Преимуществами такого монохроматора являются простота конструкции, плавно регулируемая полоса пропускания, возможность получения больших длин волн. Недостатками являются ограничение со стороны коротких длин волн, влияние качества поверхности образца на ширину полосы пропускания, коэффициент отражения меньше единицы.

В диссертационной работе экспериментально продемонстрировано, что при незеркальном отражении нейтронов уменьшается ошибка коэффициентов отражения (в 5 раз при длине волны 6 Å), связанная с поляризующей эффективностью поляризатора и анализатора.

Поскольку угол скольжения незеркального пучка связан с длиной волны нейтронов, то интерференция по длине волны может проявляться через угловое распределение интенсивности. Это свойство пространственного расщепления использовано нами в работе [А7] для наблюдения стоячих нейтронных волн при полном отражении нейтронов от слоистой структуры Ti(300 Å)/Co (60 Å)/Ti(2000 Å)/Cu(1000 Å)/стекло. Размеры образца составляли $50\times 100\times 5$ мм³. Показано, что на угловом распределении интенсивности незеркально отражённых нейтронов наблюдаются максимумы, соответствующие образованию стоячих нейтронных волн в слоистой структуре.

В диссертационной работе введены понятия спиновых состояний нейтронов во внешнем и локальном внутреннем магнитном поле. С помощью обычного поляризационного анализа, когда используются поляризатор и анализатор поляризации, определяются спиновые состояния нейтронов во внешнем магнитном поле. А пространственному расщеплению ставятся в соответствие спиновые состояния нейтронов в локальном магнитном поле. В работе продемонстрирована методика разделения спиновых состояний во внешнем и локальном магнитных полях, что можно использовать для определения параметров сложной магнитной структуры.

В пятой главе экспериментально продемонстрированы возможности развитых в работе методов для получения параметров магнитно-неколлинеарной структуры. В нашей работе [A8] исследовано отражение и преломление нейтронов в бислое $Gd(50 \text{ \AA})/Fe(1000 \text{ \AA})/стекло$. Размеры образца были равны $60 \times 100 \times 5 \text{ мм}^3$. Проведено два типа измерений: в наклонном к плоскости образца внешнем магнитном поле $6,5 \text{ кЭ}$ и в параллельном внешнем магнитном поле $18 \text{ Э} - 4,4 \text{ кЭ}$. В эксперименте с наклонным полем (угол 80° между направлением вектора напряжённости внешнего магнитного поля и плоскостью плёнки) получено, что локальное магнитное поле около поверхности плёнки совпадает с величиной напряжённости внешнего магнитного поля. Из граничных условий найдена величина угла между векторами магнитной индукции и напряжённости внешнего магнитного поля $\chi = 60^\circ$. Получено, что коэффициенты отражения нейтронов, испытавших спиновые переходы “+” и “-”, равны около $0,08$ при длине волны нейтронов $2,5 \text{ \AA}$. Из экспериментальных данных сделан вывод, при наклонном внешнем магнитном поле большой величины плёнка однородно намагничена. Для неоднородно намагниченных сред может возникать большое локальное магнитное поле при малом внешнем магнитном поле.

В работе [15] исследовалось преломление и отражение нейтронов от ненамагниченной плёнки $FeCo$ во внешнем магнитном поле 15 Э , приложенном параллельно плоскости образца. Наблюдалось большое пространственное расщепление, которое объяснялось образованием доменной структуры в плёнке. В наших работах сделана попытка более детального анализа магнитно-неколлинеарной структуры в плёнке $Fe-Gd$ с помощью пространственного расщепления пучка. При отражении в малом параллельном поле образец предварительно был намагничен в большом отрицательном (по отношению к направлению ведущего поля) магнитном поле. Обнаружено незеркальное отражение нейтронов (рис. 8), вызванное спиновыми переходами в большом локальном магнитном поле, обозначенными индексом “L”. Области $\theta < \theta_0$ поставлен в соответствие спиновый переход “-+L”, а области $\theta > \theta_0$ переход “+-L”. В поле 163 Э пространственное расщепление отсутствовало, но в зеркальном пучке зарегистрирована интенсивность нейтронов,

обусловленных спиновыми переходами “+ \rightarrow ” и “ \rightarrow +”. При зеркальном отражении мы не можем различить спиновые переходы в локальном и внешнем магнитном поле. В поле 277 Э спиновые переходы в локальном магнитном поле “+ \rightarrow L” (рис. 8 в) наблюдаются в режиме измерений “on,off”, что соответствует спиновому переходу во внешнем магнитном поле “ \rightarrow +”. А спиновый переход в локальном поле “+ \rightarrow L” наблюдается в режиме “off,on”, соответствующем спиновому переходу нейтронов во внешнем магнитном поле. Отсюда следует наличие границ раздела в среде, перпендикулярных направлению движения пучка, на которых происходят спиновые переходы с изменением проекции спина, но без изменения направления движения

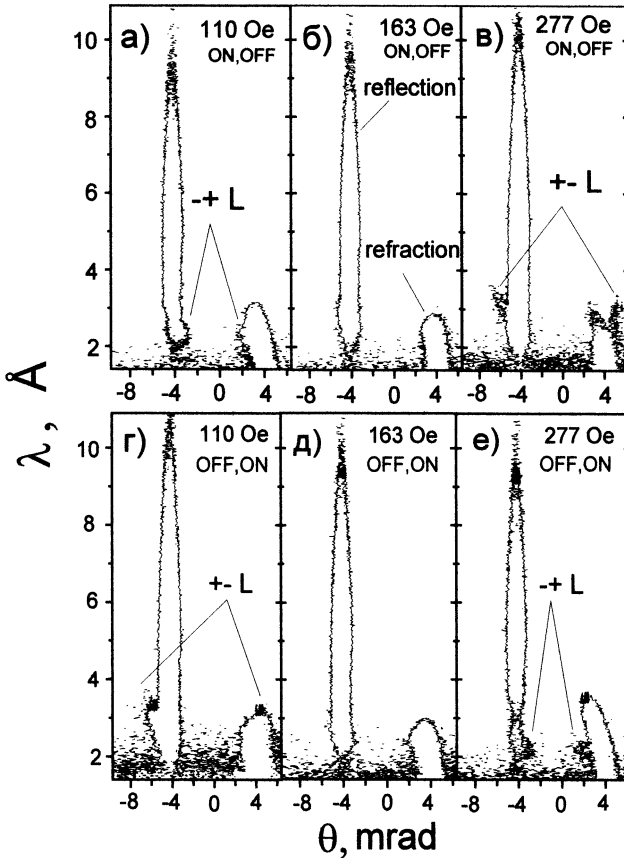


Рис. 8. Контуры равной интенсивности нейтронов для параллельного внешнего магнитного поля (Fe-Gd).

нейтронов. Анализ экспериментальных коэффициентов отражения по разработанной нами методике разделения спиновых состояний с помощью совместного использования поляризационного анализа и пространственного расщепления пучка показал, что необходимо предположить наличие двух магнитных областей: коллинеарной и неколлинеарной. Из величины углового расщепления получено значение локального магнитного поля в неколлинеарной области 14-17 кЭ. Это означает, что вектор намагниченности выходит из плоскости плёнки на угол 50-60°. Получено, что коэффициенты отражения “+” и “-” равны 0,002. При сравнении с коэффициентами в отражении в наклонном поле сделан вывод, что площадь неколлинеарной области в 40 раз меньше, чем коллинеарной. На основе проведённого исследования нами предложена доменная структура, описывающая экспериментальные данные (рис. 9).

Наличие малых магнитно-неколлинеарных областей размером около 0,6 мкм было подтверждено на оптическом микроскопе с магнитооптическим эффектом Керра.

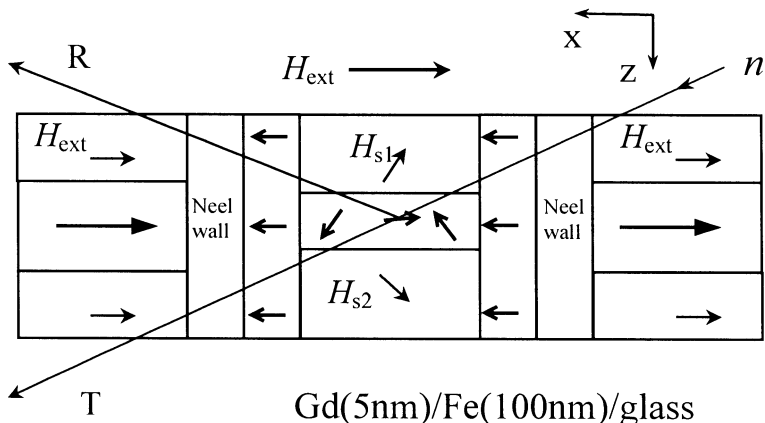


Рис. 9. Доменная структура в плёнке Fe-Gd.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

1. Проведено систематическое исследование эффекта пространственного расщепления нейтронного пучка при отражении и пропускании через однородно намагниченную плёнку. Показано, что экспериментальные результаты подтверждают предсказания теории: а) величина пространственного расщепления пучка растёт с увеличением напряжённости внешнего магнитного поля и длины волны нейтронов; б) поляризующая эффективность незеркально отражённых пучков в пределах ошибки равна единице для больших длин волн нейтронов; в) вероятность спиновых переходов “+” и “-” увеличивается с ростом угла между плоскостью плёнки и вектором напряжённости внешнего магнитного поля. Впервые экспериментально продемонстрировано, что при преломлении пучка нейтронов на одной границе раздела магнитно-неколлинеарных сред наблюдаются четыре пучка нейтронов. Определены магнитные параметры вблизи границ раздела вакуум-плёнка и плёнка-подложка: $B_1=11,8\pm 0,2$ кГс; $H_1=5,0\pm 0,3$ кЭ и $B_2=10,9\pm 0,4$ кГс; $H_2=3,0\pm 0,7$ кЭ. Сделан вывод о зависимости величины магнитной индукции плёнки от среды, контактирующей с плёнкой (вакуум и подложка).
2. Показано, что полоса пропускания монохроматора регулируется величиной напряжённости внешнего магнитного поля по закону $\lambda \sim H^{-1/2}$ и $\Delta\lambda \sim H^{-1/2}$. Относительная ширина полосы пропускания составила величину $\Delta\lambda/\lambda = 0,2$, которая типична для зеркальных монохроматоров. Таким образом, экспериментально продемонстрирована возможность поляризации и монохроматизации пучка нейтронов с помощью пространственного расщепления пучка.
3. Пространственное расщепление пучка впервые использовано для наблюдения стоячих нейтронных волн при полном отражении нейтронов от слоистой магнитной структуры $Ti(300 \text{ \AA})/Co(60 \text{ \AA})/Ti(2000 \text{ \AA})/Cu(1000 \text{ \AA})/стекло$. Для регистрации стоячих нейтронных волн используют как первичное излучение (нейтронный пучок), так и вторичное излучение (заряженные частицы; гамма-кванты; нейтроны, испытавшие спиновые переходы “-” и “+”). Пространственное расщепление пучка нейтронов служит ещё одним вторичным каналом регистрации стоячих нейтронных волн.
4. Показано, что при незеркальном отражении нейтронов с длиной волны, например 6 \AA , в 5 раз уменьшается ошибка коэффициентов отражения, связанная с поляризующей эффективностью поляризатора и анализатора.

Сделан вывод о том, что пространственное расщепление пучка улучшает поляризационный анализ.

5. Введено понятие анализа спиновых состояний нейтронов во внешнем и локальном внутреннем магнитном поле. Показан способ разделения этих состояний с помощью поляризационного анализа и пространственного расщепления пучка. Такой подход позволяет исследовать сложную магнитно-неколлинеарную структуру.
6. В магнитной плёнке Gd(50 Å)/Fe(1000 Å)/стекло обнаружены магнитно-неколлинеарные области, составляющие около 2 % от площади поверхности плёнки, в которых намагниченность направлена под углом 60° к плоскости образца. Таким образом, экспериментально продемонстрировано использование пространственного расщепления пучка для изучения магнитно-неколлинеарной структуры.

Список публикаций по теме диссертации

- [A1] V.L. Aksenov, E.B. Dokukin, S.V. Kozhevnikov, Yu.V. Nikitenko, A.V. Petrenko, J. Schreiber, Refraction of polarized neutrons in a magnetically non-collinear layer, *Physica B* **234-236** (1997) 513-515.
- [A2] S.V. Kozhevnikov, Spin-flip and beam-splitting of polarized neutrons transmitted through a Co film on glass, *Physica B* **283** (2000) 333-335.
- [A3] V.L. Aksenov, Yu.V. Nikitenko, S.V. Kozhevnikov, Spin-flip spatial neutron beam-splitting in magnetic media, *Physica B* **297** (2001) 94-100.
- [A4] V.L. Aksenov, S.V. Kozhevnikov, Yu.V. Nikitenko, Spin-flipped transmission of polarized neutrons through Co film on glass, *Physica B* **276-278** (2000) 956-957.
- [A5] V.L. Aksenov, S.V. Kozhevnikov, Yu.V. Nikitenko, Refraction of polarized neutrons on boundaries of a magnetic film, *Physica B* **276-278** (2000) 958-959.
- [A6] S.V. Kozhevnikov, Neutron monochromatization using spin-flip and spatial beam splitting, *Physica B* **283** (2000) 305-307.
- [A7] В.Л. Аксёнов, Ю.В. Никитенко, С.В. Кожевников, Ф. Раду, Р. Круйс, Т. Реквельдт, Генерация стоячей нейтронной волны при полном отражении поляризованных нейтронов, *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования* **8** (2000) 10-15.
- [A8] V.L. Aksenov, S.V. Kozhevnikov, Yu.V. Nikitenko, H. Lauter, Reflection and refraction of spin-flip neutrons in Fe-Gd structure, *Physica B* **276-278** (2000) 179-180.

Список цитируемой литературы

1. Абов Ю.Г., Гулько А.Д., Крупчицкий П.А. Поляризованные медленные нейтроны. М.: Атомиздат, 1966.
2. В.К. Игнатович, Деполяризация ультрахолодных нейтронов при преломлении и отражении на поверхности магнитных плёнок, Письма в ЖЭТФ **28** (1978) 311.
3. G.P. Felcher, S. Adenwalla, V.O. de Haan, A.A. van Well, Zeeman splitting of surface-scattered neutrons, *Nature* **377** (1995) 409.
4. D.A. Korneev, V.I. Bodnarchuk, V.K. Ignatovich, Off-specular neutron reflection from magnetic media with nondiagonal reflectivity matrices, *JETP Lett.* **63** (1996) 944.
5. V.L. Aksenov, H. Fredrikze, S.V. Kozhevnikov, Yu.V. Nikitenko, M.Th. Rekveldt, J. Schreiber, Observation of spatial splitting of a polarized neutron beam as it is refracted on the interface of two magnetically non-collinear media, *JINR Communications* E14-98-85 (1998).
6. N.K. Pleshanov, Neutrons at the boundary of magnetic media, *Z. Phys.* **B 94** (1994) 233.
7. Yu.V. Nikitenko, S.V. Kozhevnikov, A.V. Petrenko, V.V. Proglyado, Polarization analysis in glancing geometry at spectrometer SPN-1, (готовится к печати).
8. D.A.Korneev, V.V. Pasyuk, A.V. Petrenko, E.B. Dokukin, "Neutron Reflectivity Studies on Superconducting, Magnetic and Absorbing Thin Films on the Polarized Neutron Spectrometer at the Pulsed Reactor IBR-2", 2nd Int. Conf. On "Surface X-Ray and Neutron Scattering", Bad Honnef, June 25-28, 1991.
9. S.V. Grigoriev, A.I. Okorokov, V.V. Runov, Peculiarities of the Construction and Application of Broadband Adiabatic Flipper of Cold Neutrons, *Nucl. Instr. Meth. A* **384** (1997) 451.
10. P.T. Por, W.H. Kraan, M.Th. Rekveldt, Separating the polarizing power from depolarization in a set-up with 3 neutron polarizers, *Nucl. Instr. Meth. A* **339** (1994) 550.
11. H. Fredrikze, R.W.E. van de Kruijs, Calibration of a polarized neutron reflectometer, *Physica* **B 297** (2001) 143.
12. О.В. Фатеев, Г.А. Черемухина, С.П. Черненко, Ю.В. Заневский, Х. Лаутер, В.В. Лаутер, С.В. Кожевников, Ю.В. Никитенко, А.В. Петренко, Позиционно-чувствительный детектор для спектрометра поляризованных нейтронов, ПТЭ **2** (2001) 5.
13. R.W.E. van de Kruijs, H. Fredrikze, M.Th. Rekveldt, A.A. van Well, Yu.V. Nikitenko, V.G. Syromyatnikov, Polarization analysis of neutron reflectometry on non-collinear magnetic media: polarized neutron reflectometry experiment on a thin cobalt film, *Physica* **B 283** (2000) 189.

14. К.М. Подурец, Д.В. Сокольский, Р.Р. Чистяков, С.Ш. Шильштейн, Реконструкция объёмной доменной структуры монокристаллов кремнистого железа по нейтронрефракционным изображениям доменных границ, ФТТ, т. 33, № 10 (1991) 2954.
К.М. Подурец, Исследование макроструктуры вещества с помощью преломления нейтронов, диссертация на соискание учёной степени доктора физ.-мат. наук, М., 2000.
15. Th. Krist, D.J. Müller, F. Mezei, Non-specular reflectivity of spin-flipped neutrons, Physica **B 267-268** (1999) 194.

Получено 16 мая 2002 г.

Макет *Н. А. Киселевой*

ЛР № 020579 от 23.06.97.

Подписано в печать 18.05.2002.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,56. Уч.-изд. л. 2,03. Тираж 100 экз. Заказ № 53287.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.