

На правах рукописи

Монина Надежда Геннадьевна

**РАЗВИТИЕ МЕТОДА ЯДЕРНО-РЕЗОНАНСНОГО ОТРАЖЕНИЯ
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНЫХ МУЛЬТИСЛОЕВ**

Специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2008

Работа выполнена на кафедре физики твердого тела
физического факультета Московского государственного университета
имени М. В. Ломоносова.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
Андреева Марина Алексеевна

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Беляков Владимир Алексеевич

доктор физико-математических наук,
Манцызов Борис Иванович

Ведущая организация: Химический факультет Санкт-Петербургского
государственного университета

Защита состоится «18» июня 2008 г. в 15.30 ч. на заседании
диссертационного совета Д 501.002.01 при Московском государственном
университете имени М.В. Ломоносова по адресу 119991, г. Москва, ГСП-1,
Ленинские горы, д.1, стр.2, МГУ, физический факультет, ауд. ЮФА.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета
МГУ имени М.В. Ломоносова.

Автореферат разослан «16» мая 2008 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 501.002.01
кандидат физико-математических наук

Т.В. Лаптинская

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Метод ядерно-резонансного рассеяния – это новый метод исследования, получивший мощный импульс развития после создания специальных станций ядерно-резонансного рассеяния на синхротронах третьего и четвертого поколений. От обычной мессбауэровской спектроскопии его отличает другая шкала исследования резонансного рассеяния – временная, вместо энергетической [1]. Спектры ядерно-резонансного рассеяния трудно интерпретируются, потому что они формируются за счет интерференции отдельных сверхтонких компонент. Механизм формирования временных спектров ядерно-резонансного рассеяния достаточно сложен и нет стандартных способов обработки таких спектров, как это имеет место для обычных мессбауэровских спектров.

В то же время ядерно-резонансные исследования на синхротронах имеют много преимуществ по сравнению с традиционной мессбауэровской спектроскопией. Вследствие своей высокой естественной коллимации синхротронное излучение (СИ) позволяет проводить эксперименты, требующие хорошего углового разрешения: – по ядерно-резонансной дифракции и ядерно-резонансному зеркальному отражению, – то есть совмещать резонансный и дифракционный методы в одном эксперименте. Это дает возможность исследовать магнитные свойства селективно по элементарной ячейке или по глубине или периоду многослойных пленок [2]. А огромная яркость источников СИ дает возможность проводить исследования в уникальных условиях: при сверхвысоких давлениях, при высоких и сверхнизких температурах, причем объекты исследования могут быть уникально малыми, например, ультратонкие пленки (до одного атомного монослоя) и даже островковые структуры [3].

В большинстве случаев ультратонкие пленки исследуют в геометрии зеркального отражения при скользящих углах, так что возник специальный термин для подобных исследований – ядерно-резонансная рефлектометрия. Этот неразрушающий метод позволяет расшифровывать магнитную структуру резонансных пленок и их интерфейсов селективно по глубине. Ввиду многообещающих перспектив использования магнитных мультислоев

в спинтронике, магнитооптике и т.д., подобная информация является для многих приложений решающей.

В настоящее время на станциях ядерно-резонансного рассеяния СИ происходит быстрое накопление экспериментальных данных, в то же время методы обработки и интерпретации таких уникальных данных развиты недостаточно. Настоящая работа и посвящена теоретической разработке нового метода ядерно-резонансного отражения.

Цель работы. Практическое применение метода ядерно-резонансной рефлектометрии для исследования магнитной структуры ультратонких пленок (в том числе и в экстремальных условиях, например, при низких температурах, необходимых для возникновения сверхпроводящего состояния в соседней с резонансным слоем пленке), процессов диффузии и самодиффузии в многослойных пленках, состоящих из чередующихся слоев резонансного и нерезонансного изотопа. Разработка методики восстановления профиля распределения по глубине резонансных ядер с различными типами сверхтонких взаимодействий. Развитие и тестирование компьютерных программ для обработки временных спектров ядерно-резонансного отражения и угловых зависимостей ядерно-резонансного отражения.

Научная новизна и практическая значимость работы.

В работе впервые проанализирован вопрос об однозначности определения направления остаточной намагниченности пленок из экспериментальных временных спектров ядерно-резонансного отражения. Исследование показало, что при анализе следует учитывать возможную неоднородность ультратонких пленок. Было сделано также важное заключение, что для корректного определения предпочтительного остаточного направления намагниченности ультратонкой пленки по данным ядерно-резонансной рефлектометрии, необходимо проводить измерения спектров при разных азимутальных ориентациях пленки относительно пучка СИ.

Впервые методом ядерно-резонансной рефлектометрии с применением методики стоячих волн исследовано влияние сверхпроводящего слоя Nb на

сверхтонкое магнитное поле в прилежащем ферромагнитном слое ^{57}Fe , которое не обнаружило изменения величины или ориентации этого поля при температурах выше и ниже температуры сверхпроводящего перехода в слое Nb. Этот результат имеет значение для развития электронной теории систем сверхпроводник/ферромагнетик.

Анализ влияния динамических эффектов на формирование задержанных по времени регистрации кривых ядерно-резонансного отражения обнаружил существенные принципиальные отличия кривых ядерно-резонансного отражения от кривых рентгеновской рефлектометрии. Оказалось, что относительные интенсивности брэгговских максимумов на ядерно-резонансных кривых зависят не только от интердиффузии слоев в периодической структуре, но и от эффекта ускорения распада ядерной подсистемы в условиях полного внешнего или брэгговского отражения в условиях ограниченного временного окна регистрации ядерно-резонансного отклика, от сверхтонких параметров, уширения линий и других параметров резонансного спектра.

Было установлено, что для корректного определения коэффициента диффузии по кривым ядерно-резонансной рефлектометрии нельзя опираться только на интегральные интенсивности брэгговских максимумов, а необходимо восстанавливать концентрационный профиль резонансных ядер по временным спектрам и угловым кривым отражения и затем анализировать его Фурье компоненты. Обработка конкретных экспериментальных данных для образца $[\text{}^{57}\text{Fe}(4 \text{ нм})/\text{}^{56}\text{Fe}(8 \text{ нм})]_{10}$ показала, что ошибка при кинематическом подходе при определении коэффициентов диффузии может составлять порядок и более.

Практическая работа с конкретными экспериментальными данными по восстановлению профилей распределения резонансных ядер с различными типами сверхтонких взаимодействий позволила внести существенные коррективы и усовершенствовать комплекс программ для обработки спектров ядерно-резонансного отражения «REFTIM», помещенный в настоящее время на сайте ESRF [4].

На защиту выносятся следующее:

1. Методика обработки временных спектров ядерно-резонансного отражения, измеренных для нескольких углов скольжения, и угловых зависимостей интегральной задержанной по времени распада интенсивности отражения (кривых ядерно-резонансной рефлектометрии), позволяющая восстанавливать как параметры сверхтонких взаимодействий, так и профили распределения по глубине резонансных ядер, характеризующихся различными типами сверхтонких параметров.
2. Применимость метода стоячих рентгеновских волн, формирующихся в условиях брэгговского отражения от периодических многослойных пленок, для селективных по глубине исследований профиля распределения плотности резонансных ядер, характеризующихся различными сверхтонкими взаимодействиями, методом ядерно-резонансного отражения.
3. Вывод о том, что определение азимутального угла, характеризующего направление намагниченности в плоскости слоя структуры и являющегося основой **ядерно-резонансной магнитометрии** [5], не является корректным, если измерения проводятся только при одной ориентации образца относительно пучка СИ (за исключением вырожденного случая, когда намагниченность направлена вдоль пучка).
4. Заключение о существенном искажении кривых ядерно-резонансной рефлектометрии, и, в частности, изменении интегральных интенсивностей брэгговских максимумов ядерно-резонансного отражения, вследствие ограниченного в реальных экспериментальных условиях временного окна регистрации ядерно-резонансного сигнала. Такое искажение вносит существенную погрешность в определение коэффициентов диффузии по угловым кривым ядерно-резонансного отражения.

Апробация работы. Основные результаты работы были доложены на следующих конференциях:

- Moscow International Symposium on Magnetism (MISM) (Moscow, MSU, June 2005),

- II Всероссийской молодежной научной школе «Микро-, нанотехнологии и их применение» (ИПТМ РАН, Черноголовка, 2005),
- Национальной конференции по применению рентгеновского, синхротронного излучений, нейтронов и электронов для исследования материалов (г. Москва, Институт кристаллографии РАН, ноябрь 2005),
- X Международной конференции "Мессбауэровская спектроскопия и ее применения" (г. Ижевск, июнь 2006).
- Симпозиуме "Нанопизика и Нанозлектроника" (г. Нижний Новгород, март 2007).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ (4 статьи в реферируемых журналах, 3 статьи в сборниках трудов конференций и 3 тезисов докладов на перечисленных выше конференциях).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов и содержит 141 страницу текста, 44 рисунка, и список литературы из 153 наименований.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследований, показана научная новизна полученных результатов и их практическая ценность, изложены основные защищаемые положения диссертации.

Первая глава является обзором литературы по теме диссертационной работы. Рассмотрены особенности возбуждения синхротронным излучением ядерно-резонансных переходов, методика экспериментов при импульсном возбуждении резонансных ядер и регистрации ядерно-резонансного рассеяния на временной шкале распада возбужденных состояний. Описана методика исследования сверхтонких взаимодействий по квантовым биениям на временных спектрах. Приведены примеры исследований методом ядерно-резонансного рассеяния на синхротронах магнитных свойств и их температурных зависимостей, процессов диффузии, а также изменения свойств материалов под давлением. Описана новая методика исследования неупругого ядерно-резонансного рассеяния, активно развиваемая на станциях

ядерно-резонансного рассеяния и позволяющая восстанавливать фононные спектры исследуемых материалов. Рассмотрены когерентные эффекты в рассеянии вперед и при зеркальном отражении от резонансных пленок. Приведены некоторые результаты исследования ультратонких пленок методом ядерно-резонансной рефлектометрии.

Во второй главе диссертации изложена матричная теория отражения мессбауэровского излучения от анизотропных резонансных мультислоев при скользких углах падения, лежащая в основе пакета компьютерных программ [4], используемых в дальнейшем для расчетов энергетических и временных спектров отражения, а также рефлектометрических кривых ядерно-резонансного отражения. Проанализированы поляризационные особенности ядерно-резонансного рассеяния. Показана роль фазовых соотношений для волн, отраженных разными границами раздела, в появлении селективности информации по глубине структуры в энергетических или временных спектрах отражения. Рассмотрена применимость метода стоячих волн в рефлектометрии, обеспечивающего дополнительные возможности для селективных по глубине исследований.

Третья глава диссертации посвящена рассмотрению возможностей и способам определения коэффициента самодиффузии в периодических $^{56}\text{Fe}/^{57}\text{Fe}$ мультислоях по рефлектометрическим кривым ядерно-резонансного отражения. Измерение таких кривых осуществляется с помощью временной фильтрации отраженного сигнала. То есть рефлектометрические кривые ядерно-резонансного отражения это интегральная задержанная по времени интенсивность отражения, измеряемая в функции угла скольжения (Рис. 1). Очевидно, что ядерно-резонансное рассеяние в отличие от электронного рассеяния «чувствует» изотопную периодичность структур $^{56}\text{Fe}/^{57}\text{Fe}$, так что на кривых ядерно-резонансного отражения от таких структур должны появиться брэгговские максимумы (Рис. 1). В последние годы предпринимаются попытки [6-7] исследовать самодиффузию в мультислоях $^{56}\text{Fe}/^{57}\text{Fe}$, оценивая изменения интенсивности этих максимумов на разных стадиях отжига образцов $I_m(t)$ (m – порядок отражения, t – время отжига).

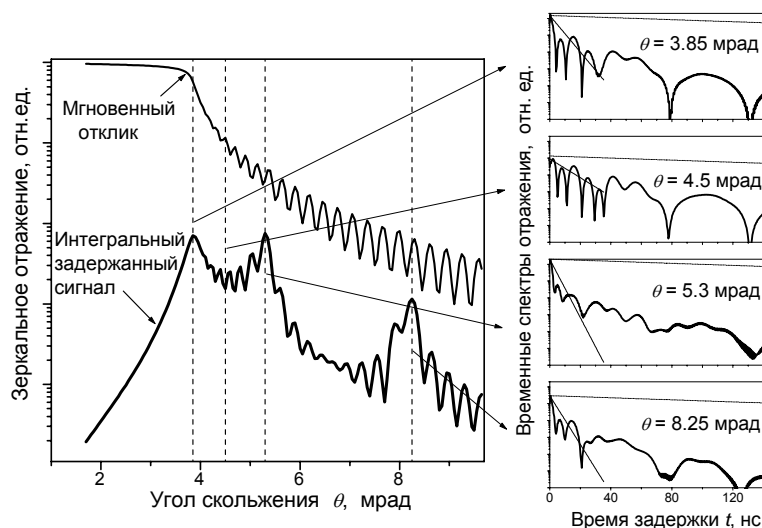


Рис. 1. Рассчитанные кривые рентгеновской рефлектометрии (мгновенный отклик) и ядерно-резонансного отражения (интегральный задержанный сигнал) для структуры $[^{56}\text{Fe}(4 \text{ нм})/^{57}\text{Fe}(8 \text{ нм})]_{10}$. Справа показаны временные спектры ядерно-резонансного отражения для разных углов скольжения, интеграл от каждого из которых дает одну точку на рефлектометрической кривой. Резонансный спектр для ядер ^{57}Fe соответствует сверхтонкому магнитному полю $\mathbf{B}_{\text{hf}} = 32 \text{ Т}$ с распределением 3 Т , лежащему в плоскости пленки. Пунктирная линия на спектрах представляет естественный распад, сплошная прямая иллюстрирует ускорение распада.

Анализ проводится в простейшем кинематическом приближении с использованием хорошо известной в теории рентгеновской дифракции формулы [8]:

$$\ln\left(\frac{I_{\mathbf{m}}(t)}{I_{\mathbf{m}}(0)}\right) = -2Q_{\mathbf{m}}^2 D t, \quad (1)$$

где D – коэффициент диффузии, $Q_{\mathbf{m}} = \frac{2\pi}{d} \mathbf{m}$ – вектор рассеяния, d – период структуры.

Однако, кривые ядерно-резонансного отражения существенно отличаются от обычных рентгеновских рефлектометрических кривых, в первую очередь вследствие существенной модификации скорости распада

ядерной подсистемы в условиях когерентного рассеяния и особенностей их регистрации.



Рис. 2. Кривые ядерно-резонансного отражения в зависимости от ширины временного окна регистрации задержанного по времени сигнала, рассчитанные для структуры $[^{56}\text{Fe}/^{57}\text{Fe}]_{10}$.

Как видно из рис. 1, начальная скорость распада существенно меняется в максимумах отражения, так что в зависимости от «временного окна» регистрации, форма измеряемой кривой ядерно-резонансного отражения искажается (Рис. 2), а брэгговские максимумы могут принимать двугорбую форму. Отметим, что в работе [7] наблюдаемое раздвоение максимумов ошибочно объяснялось дефектами периодичности в структуре.

Отсюда сделан вывод, что использование формулы (1) в случае ядерно-резонансного рассеяния неправомерно. Модельный расчет кривых ядерно-резонансного отражения от изотопной периодической структуры на разных стадиях диффузионного перемешивания слоев $Dt=0, 1, 3 \text{ нм}^2$ (Рис. 3 в) показал, что ошибка в определении Dt по интенсивности брэгговских отражений (Рис. 3 г) зависит от временного окна регистрации и наиболее существенна для брэгговских максимумов вблизи критического угла полного отражения, где динамические эффекты максимальны. Динамические эффекты в отражении и, соответственно, ускорение распада ядерной подсистемы существенно зависят от многих параметров, таких как распределение и типы

сверхтонких расщеплений ядерных уровней, плотность резонансных ядер, параметров структуры, наличия поверхностного слоя и т.д., что делает рефлектометрические кривые ядерно-резонансного рассеяния зависимыми не только от распределения плотности резонансных ядер по глубине структуры, но и от всех этих параметров.

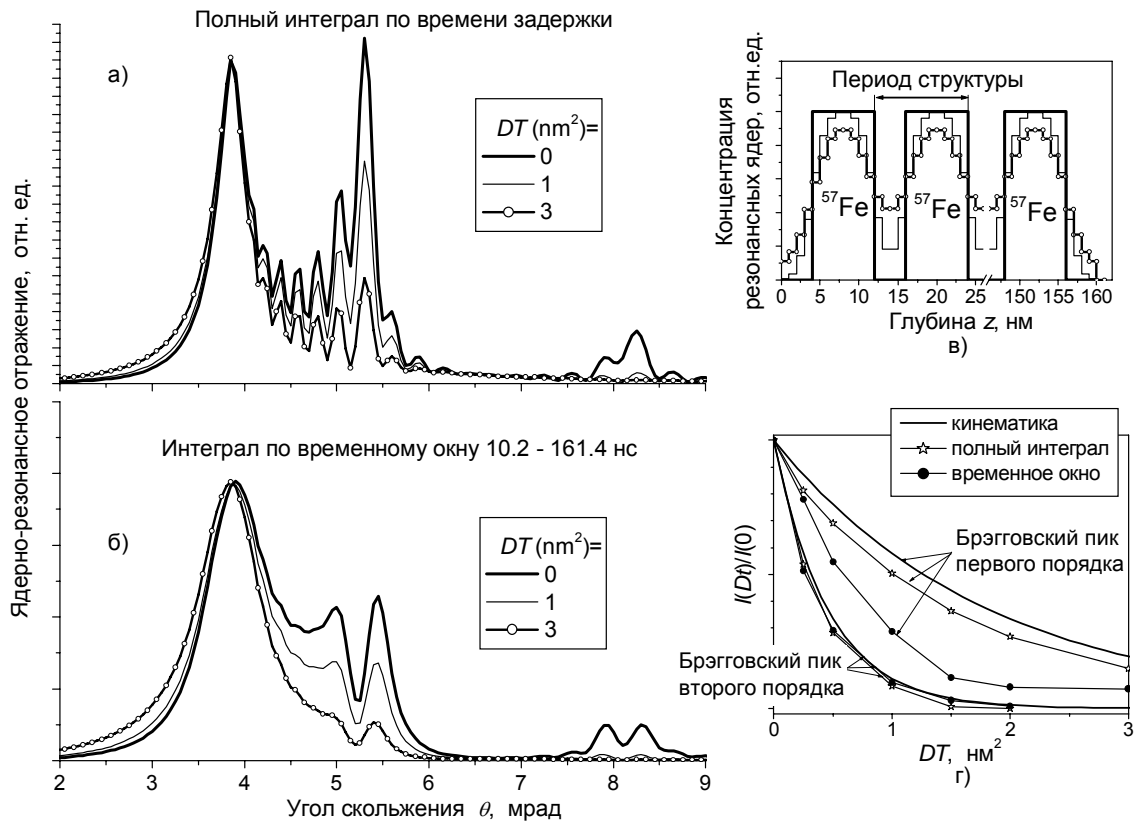


Рис. 3. а) и б) - изменение кривых ядерно-резонансного отражения вследствие межслойной диффузии, приводящей к размытию профиля распределения резонансных ядер, изображенного на графике (v); г) – изменение интенсивности брэгговских максимумов первого и второго порядка в функции параметра Dt , рассчитанное по кинематической формуле (3), а также при анализе рассчитанных теоретических кривых для разных временных окон регистрации ядерно-резонансного отражения.

В диссертации предложен другой метод определения коэффициентов диффузии, состоящий в совместной обработке набора временных спектров ядерно-резонансного отражения для разных углов скольжения и

рефлектометрических кривых ядерно-резонансного отражения. В результате удается восстановить реальный профиль распределения резонансных ядер по глубине $C_t(z)$ для образцов на разных стадиях отжига. Затем необходимо найти Фурье коэффициенты этих профилей:

$$C_m(t) = \frac{1}{d} \int_0^d C_t(z) e^{iQ_m z} dz, \quad (3)$$

которые непосредственно определяют искомые коэффициенты диффузии D :

$$\frac{C_m(t)}{C_m(0)} = e^{-Q_m^2 D t}. \quad (4)$$

Новый подход был опробован для интерпретации экспериментальных кривых ядерно-резонансного отражения от периодической структуры $[^{56}\text{Fe}/^{57}\text{Fe}]_{10}$, измеренных индийскими коллегами [6] на станции ядерно-резонансного рассеяния Европейского источника синхротронного излучения (ESRF) в Гренобле (Рис. 4).

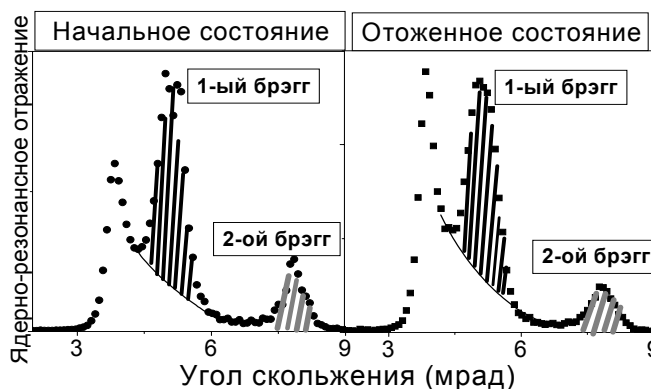


Рис. 4. Экспериментальные задержанные кривые ядерно-резонансного отражения для пленки $[^{56}\text{Fe}/^{57}\text{Fe}]_{10}$. Заштрихованные области дают интегральные интенсивности брэгговских максимумов первого и второго порядка.

Поскольку сравнивать абсолютные интенсивности отражения от разных образцов довольно сложно, мы воспользовались формулой (1) для сравнения отношения интегральных интенсивностей брэгговских максимумов разных порядков на каждой кривой для оценки коэффициента диффузии:

$$\frac{(I_{Br2}/I_{Br1})(t)}{(I_{Br2}/I_{Br1})(0)} = e^{-6\left(\frac{2\pi}{d}\right)^2 Dt} \quad (5)$$

Эта оценка коэффициента диффузии дала значение $Dt=0.1 \text{ нм}^2$.

Детальный анализ временных спектров и кривых ядерно-резонансного отражения позволил восстановить параметры сверхтонких взаимодействий и распределения плотности резонансных ядер по глубине одного периода, как для каждого типа сверхтонких взаимодействий, так и суммарного профиля распределения плотности резонансного изотопа (Рис. 5). Применяя формулы (3), (4) к полученным профилям до и после отжига, мы получили $Dt=3.8 \text{ нм}^2$.

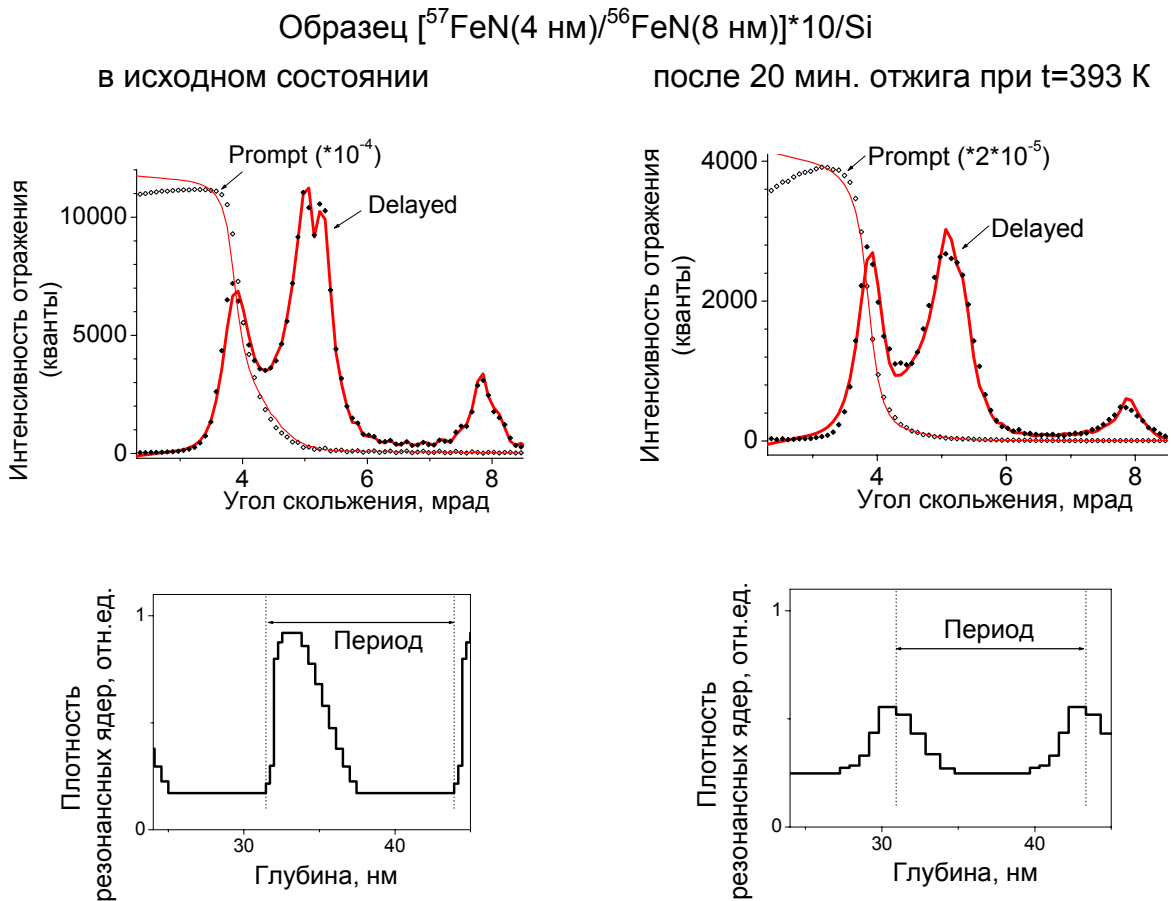


Рис. 5. Экспериментальные (точки) и теоретические (сплошные линии) рентгеновские кривые отражения и задержанные кривые ядерно-резонансного отражения для образца $[^{56}\text{Fe}/^{57}\text{Fe}]_{10}$ (верхние графики) и распределение резонансных ядер ^{57}Fe по глубине одного периода в этой структуре (нижние графики) до и после отжига.

Расхождение коэффициентов диффузии, полученных в рамках простейшего кинематического подхода и строго анализа, составило более порядка. Таким образом, мы показали, что кинематический подход неприменим для количественного исследования процессов диффузии методом ядерно-резонансного рассеяния, если динамические эффекты в рассеянии существенны.

Четвертая глава диссертации посвящена исследованию возможного влияния возникновения сверхпроводимости в пленке Nb на магнитную структуру ультратонкого слоя ^{57}Fe в образце Nb(70 нм)/ ^{57}Fe (3.8 нм)/[Si/Mo] $_{45}$ /Si методом ядерно-резонансного отражения с использованием стоячих волн. Образец был изготовлен в Институте физики микроструктур РАН (г. Нижний Новгород), периодическая структура [Si/Mo] $_{45}$ под слоем ^{57}Fe играла роль генератора стоячих волн.

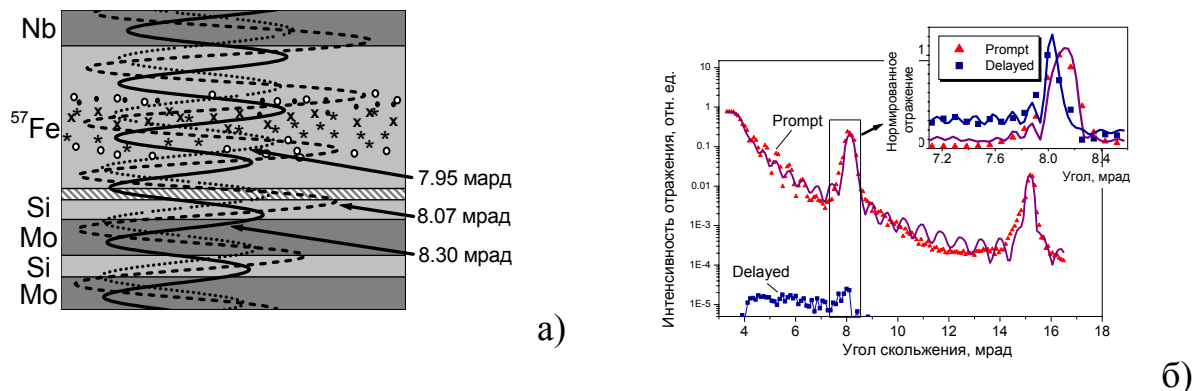


Рис. 6. а) Часть структуры вблизи ^{57}Fe слоя. Стоячие волны образованы брэгговским отражением от зеркала [Si/Mo] $_{45}$; б) Теоретические и экспериментальные кривые электронного и ядерно-резонансного отражения. Появление и сдвиг максимума на кривой ядерно-резонансного отражения обусловлен влиянием стоячих волн, возникающих при отражении от структуры [Si/Mo] $_{45}$.

Варьируя угол скольжения в окрестности угла брэгговского отражения от этой структуры, можно селективно по глубине слоя ^{57}Fe усиливать или ослаблять ядерно-резонансное возбуждение (Рис. 6).

Временные спектры и кривые ядерно-резонансного отражения были измерены на ESRF. Подгонка временных спектров, измеренных при

нескольких углах скольжения вблизи критического угла и в окрестности брэгговского максимума от «подложки» $[Mo/Si]_{45}$ (Рис. 7), позволила восстановить профили распределения по глубине слоя ^{57}Fe резонансных ядер, характеризующихся различными типами сверхтонких взаимодействий (Рис. 8).

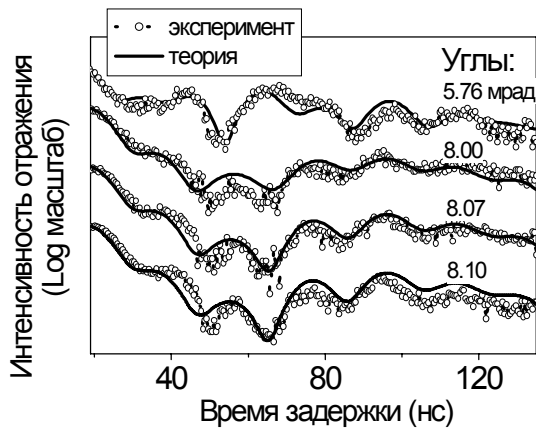


Рис. 7. Временные спектры ядерно-резонансного отражения, измеренные в критическом угле и вблизи угла Брэгга при 3 К. Точки – эксперимент, сплошная линия – подгонка. Спектры сдвинуты по вертикали.

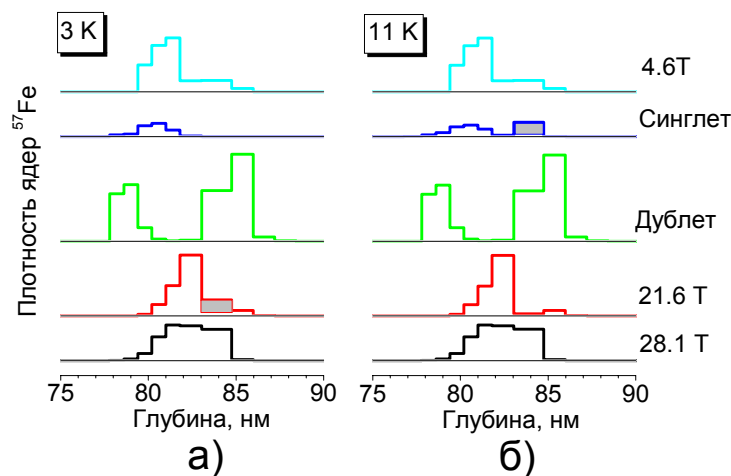


Рис. 8. Распределение по глубине ядер ^{57}Fe с различными типами сверхтонких взаимодействий, полученное при теоретической обработке временных спектров ядерно-резонансного отражения, измеренных при 3 К (а) и при 11 К (б). При понижении температуры относительная доля синглетной (немагнитной) составляющей спектра уменьшается, а магнитной составляющей (21.6 Т) одновременно увеличивается.

Анализ спектров при температурах выше и ниже температуры сверхпроводящего состояния в исследуемом образце (Рис. 9) дал возможность объяснить наблюдаемое изменение временных спектров за счет увеличения доли магнитно-упорядоченной фазы при понижении температуры (сравни а) и б) на Рис. 8). Первоначально предполагалось, что наблюдаемое изменение спектров может быть вызвано пространственной модуляцией ферромагнитного порядка (криптоферромагнетизмом) в пленке ^{57}Fe при возникновении сверхпроводимости в слое Nb вследствие эффекта близости [9]. Однако, детальный анализ показал, что не произошло никакого изменения в ориентации сверхтонких полей с уменьшением температуры.

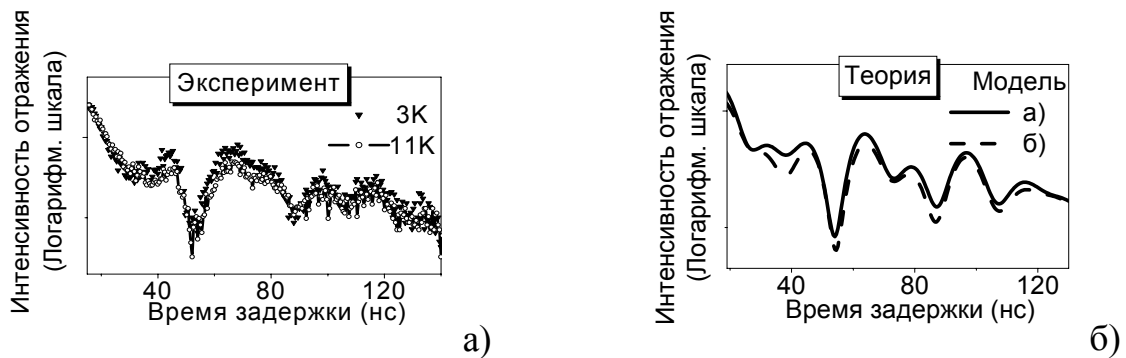


Рис. 9. Сравнение экспериментальных (а) и модельных (б) спектров, измеренных при угле 5.76 мрад для двух температур 3 K и 11 K . Теоретические спектры соответствуют распределениям по глубине плотности ядер, представленным на рис.8 а,б.

Пятая глава диссертации посвящена исследованию магнитных свойств и, в частности, ориентации остаточной намагниченности в тонкой пленке $[^{57}\text{Fe}/\text{Co}]_{35}$.

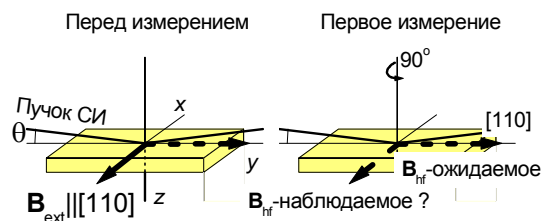


Рис. 10. Начальная и ожидаемая ориентация намагниченности пленки $[^{57}\text{Fe}/\text{Co}]_{35}$ относительно пучка СИ.

Временные спектры ядерно-резонансного рассеяния измерены на ESRF. Перед началом измерений образец был намагничен перпендикулярно плоскости рассеяния, а затем повернут на 90° относительно нормали к поверхности (Рис. 10). Мы предполагали, что если ориентация сверхтонкого поля будет вдоль пучка СИ (азимутальный угол $\gamma=90^\circ$), то временной спектр, соответствующий магнитному расщеплению ядерных уровней, будет иметь самый простой вид с одной частотой квантовых биений. Однако, за время, прошедшее между намагничиванием образца и началом измерений (около 5 часов), направление намагниченности изменилось, поскольку измеренный спектр имел явно больше одной частоты биений (Рис. 11).

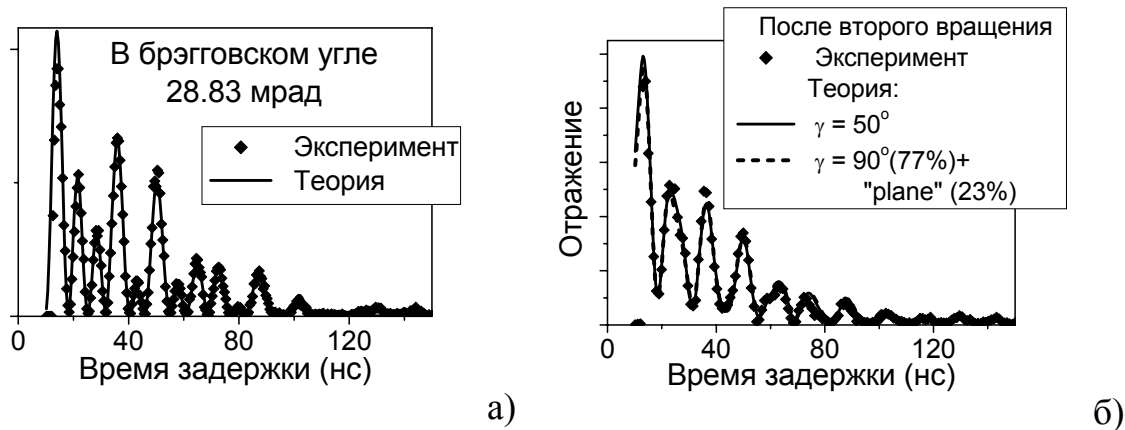


Рис. 11. Временные спектры ядерно-резонансного отражения, измеренные в брэгговском угле 28.83 мрад после первого а) и второго б) поворота образца на 90° вокруг нормали к поверхности. Теоретические спектры для двух моделей магнитного упорядочения на Рис. 11 б, как и следовало ожидать, практически неразличимы на рисунке.

Спектр можно было подогнать в предположении, что \mathbf{V}_{hf} перпендикулярно к плоскости рассеяния. Тогда образец повернули на 90° еще раз и повторили измерения. Но и новый спектр (Рис. 11 б) не соответствовал ориентации \mathbf{V}_{hf} вдоль пучка СИ, его можно было подогнать в предположении, что азимутальный угол γ составляет 50° . Возникшее противоречие результатов объяснялось тем, что мы предполагали, что направление \mathbf{V}_{hf} одинаково для всех ядер. Это имело бы место для однодоменной пленки. Реальность, по-видимому, не соответствовала этому предположению. Если в область

когерентного рассеяния попадает несколько доменов, амплитуду когерентного рассеяния следует усреднить по возможным ориентациям \mathbf{V}_{hf} . При этом важно иметь в виду, что с учетом линейной поляризации пучка СИ существуют несколько различных конфигураций распределения направления \mathbf{V}_{hf} в плоскости пленки, дающих идентичные временные спектры ядерно-резонансного рассеяния (Рис. 12): перпендикулярно плоскости рассеяния, антиферромагнитные домены с любой ориентацией и хаотическое распределение направлений \mathbf{V}_{hf} .

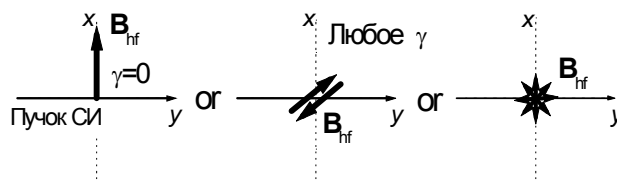


Рис. 12. Ориентации \mathbf{V}_{hf} в плоскости пленки, дающие идентичные спектры ядерно-резонансного отражения для линейной поляризации пучка СИ.

Экспериментальные спектры при двух ориентациях образца вполне согласованно объясняются в предположении, что доля ядер с хаотической ориентацией (или находящимися в антиферромагнитных доменах) составляет 23%, а остальная часть ядер характеризуется предпочтительной ориентацией намагниченности вдоль одного из направлений $\langle 110 \rangle$ (то есть $\gamma=0^\circ$ для первого измерения и $\gamma=90^\circ$, а не 50° , для второго измерения), которое является как раз легкой осью намагничивания.

Сделан вывод о том, что определение азимутального угла, характеризующего направление намагниченности в плоскости слоя структуры и являющегося основой **ядерно-резонансной магнитометрии**, не является корректным, если измерения проводятся только при одной ориентации образца.

Основные результаты диссертации.

Диссертационная работа посвящена применению ядерно-резонансной рефлектометрии – нового метода исследования сверхтонких взаимодействий в ультратонких пленках, содержащих изотоп ^{57}Fe , – к решению некоторых важных физических проблем, как-то – сосуществованию сверхпроводимости и ферромагнетизма, диффузии в ультратонких металлических слоях, определении магнитного упорядочения в ультратонких пленках. Проведенная работа с временными спектрами ядерно-резонансного отражения позволила выявить ряд методически важных особенностей нового метода и получить уникальные данные о строении исследованных объектов.

1. Обнаружено изменение временных спектров ядерно-резонансного отражения при малых изменениях угла скольжения вблизи угла брэгговского отражения от многослойной структуры $\text{Nb}(70 \text{ нм})/^{57}\text{Fe}(3.8 \text{ нм})/[\text{Si}/\text{Mo}]_{45}/\text{Si}$, обусловленное смещением по резонансному слою ^{57}Fe пучностей стоячей волны, формируемой нерезонансной структурой $[\text{Mo}/\text{Si}]_{45}$. Показано, что профиль максимума задержанной интегральной интенсивности отражения вблизи брэгговского угла характеризует толщину и положение резонансного слоя ^{57}Fe относительно «генератора стоячих волн» (структуры $[\text{Mo}/\text{Si}]_{45}$), а временные спектры резонансного отражения, измеренные при нескольких углах скольжения в окрестности брэгговского угла, дают возможность проводить селективный по глубине анализ сверхтонких взаимодействий.
2. Проведено восстановление профиля распределения по глубине плотности резонансных ядер, характеризующихся различными типами сверхтонких взаимодействий, в ультратонкой пленке ^{57}Fe , находящейся в контакте с пленкой ниобия при температурах выше и ниже температуры сверхпроводящего состояния ($\sim 8 \text{ K}$) в этой пленке. Показано, что изменение временных спектров ядерно-резонансного отражения с изменением температуры может быть объяснено увеличением доли магнитно-упорядоченной фазы при понижении

температуры, а не разрушением доменной или магнитной структуры в пленке ^{57}Fe при возникновении сверхпроводимости в слое Nb вследствие эффекта близости.

3. Проведен анализ угловых зависимостей ядерно-резонансного отражения при различных типах магнитного упорядочения в резонансном слое. Выявлена неоднозначность в определении направления сверхтонкого магнитного поля при анализе временных спектров ядерно-резонансного отражения линейно поляризованного СИ, которая может быть преодолена дополнительными измерениями при вращении образца вокруг нормали в поверхности на некоторый заданный угол.
4. Выявлены особенности интегральных задержанных по времени кривых ядерно-резонансного отражения, обусловленные специфическими динамическими эффектами при полном внешнем или брэгговском отражении, проявляющимися на временной шкале как ускорение распада ядерной подсистемы и приводящими к зависимости формы этих кривых от временного окна регистрации ядерного отклика системы.
5. Показано, что корректный анализ распределения резонансных ядер в структуре и последующее определение коэффициентов диффузии возможно только при совместной обработке набора временных спектров, измеренных при разных углах скольжения, и угловых кривых ядерно-резонансного отражения. Продемонстрировано при анализе экспериментальных данных для структуры $[\text{}^{57}\text{FeN}/\text{}^{56}\text{FeN}]^*n$, что кинематический подход в оценке коэффициентов диффузии для ядерно-резонансном рефлектометрии неприменим, если существенны динамические эффекты (ускорение распада). Внесены соответствующие изменения в общий алгоритм подгонки спектров в программе обработки таких спектров «REFTIM».

Основные результаты диссертации опубликованы в работах

1. *М.А. Андреева, Н.Г. Мони́на, Б. Линдгрен, Л. Хаггстрем, Б. Кальска* Магнитное упорядочение в ОЦК пленке $[\text{Fe}/\text{Co}]_{35}$, исследованное методом ядерно-резонансной рефлектометрии // ЖЭТФ. 2007. т. 131. вып. 4. с.652.
2. *М.А. Андреева, Н.Г. Мони́на, С. Станков* Динамические эффекты в ядерно-резонансном брэгговском отражении, влияющие на точность определения коэффициента самодиффузии в периодических $^{56}\text{Fe}/^{57}\text{Fe}$ мультислоях // Вестник Московского Университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2008. № 2. 49 – 53.
3. *М.А. Andreeva, N.G. Monina, L. Häggström, B. Lindgren, B. Kalska, P. Nordblad, S. Kamali-M, S.N.Vdovichev, Yu.N. Nozdrin, E.E. Pestov, N.N. Salashchenko, V.G. Semenov, O. Leupold, R. Rüffer* Nuclear resonant reflectivity with standing waves for the investigation of a thin ^{57}Fe layer buried inside a superconducting $\text{Si}/[\text{Mo}/\text{Si}]_{45}/^{57}\text{Fe}/\text{Nb}$ multilayer // Nuclear instruments and methods in physics research section B: Beam interactions with materials and atoms. 2008. Vol. 266. Issue. 1. 187 – 196.
4. *М.А. Андреева, Н.Г. Мони́на, Л. Хаггстрем, Б. Линдгрен, Б. Кальска, П. Нордблад, С. Камали-М, С.Н. Вдовичев, Ю. Н. Ноздрин, Е.Е. Пестов, Н.Н. Салащенко, В.Г. Семенов, О. Леопольд, Р. Рюффер* Исследование тонкого магнитного слоя ^{57}Fe , находящегося в контакте со сверхпроводящим слоем Nb с помощью ядерно-резонансного отражения // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2006. № 6. с.96 – 101.
5. *М.А. Andreeva, N.G. Monina, L. Häggström, B. Lindgren, B. Kalska, P. Nordblad, S. Kamali-M, S.N.Vdovichev, Yu.N. Nozdrin, E.E. Pestov, N.N. Salashchenko, V.G. Semenov, O. Leupold, R. Rüffer* Investigation of thin magnetic ^{57}Fe layer being in contact with superconducting Nb layer by means of the nuclear resonant reflectivity // Proceedings of Moscow International Symposium on Magnetism (Supplementary issue). Moscow. Russia. 2005. p. 100-104.

6. *М.А. Андреева, Н.Г. Мони́на, С. Станков* Динамические эффекты в ядерно-резонансном брэгговском отражении, влияющие на точность определения коэффициента самодиффузии в периодических $^{56}\text{Fe}/^{57}\text{Fe}$ мультислоях // Материалы симпозиума «Нанопизика и нанозлектроника». Нижний Новгород. ИФМ РАН. 2007. т. 1. с. 231 – 232.
7. *М.А. Андреева, Н.Г. Мони́на, Б. Линдгрен, Л. Хаггстрем, Л. Кальска* Магнитное упорядочение в бсс $[\text{Fe}/\text{Co}]_{35}$ пленке, исследованное методом ядерно-резонансной рефлектометрии // Сборник материалов II Всероссийской молодежной научной школы «Микро-, нанотехнологии и их применение», ИПТМ РАН. Черногловка. Россия. 2005 г. с.17-20.
8. *М.А. Andreeva, N.G. Monina, L. Häggström, B. Lindgren, B. Kalska, P. Nordblad, S. Kamali-M, S.N.Vdovichev, Yu.N. Nozdrin, E.E. Pestov, N.N. Salashchenko, V.G. Semenov, O. Leupold, R. Rüffer* Investigation of thin magnetic ^{57}Fe layer being in contact with superconducting Nb layer by means of the nuclear resonant reflectivity // Book of Abstracts of Moscow International Symposium on Magnetism (MISM). Moscow. Russia. 2005. p. 57 – 58.
9. *М.А. Андреева, Н.Г. Мони́на, Б. Линдгрен, Л. Хаггстрем, Б. Кальска* Магнитное упорядочение в бсс $[\text{Fe}/\text{Co}]_{35}$ пленке, исследованное методом ядерно-резонансной рефлектометрии // Тезисы докладов X Международной конференции «Мессбауэровская спектроскопия и ее применения». Ижевск. ФТИ Уро РАН. 2006. с.78.
10. *М.А.Андреева, Н.Г.Мони́на, Б.Линдгрен, Л.Хаггстрем, Б. Кальска* Ориентационная динамика намагниченности сверхструктуры $[\text{Fe}/\text{Co}]_{35}$, исследованная методом ядерно-резонансной рефлектометрии // Тезисы докладов «Национальной конференции по применению рентгеновского, синхротронного излучений, нейтронов и электронов для исследования наноматериалов и наносистем (РСНЭ)». Москва. Институт кристаллографии РАН, РНЦ "Курчатовский институт" 2005. с.240.

Цитируемая литература

1. V.G. Smirnov, Hyperfine Interactions **123/124**, 31 (1999).
2. M.A. Andreeva, B. Lindgren, Phys. Rev. **B 72**, 125422-1-22 (2005).
3. R. Röhlberger, Hyperfine Interactions **123/124**, 455 (1999).
4. <http://www.esrf.fr/computing/scientific/REFTIM /MAIN.htm>
5. C. L'abbe', J. Meersschant, W. Sturhahn, et al., PRL **93**, 037201 (2004).
6. A. Gupta, M. Gupta, S. Chakravarty, et al., Phys. Rev. B **72**, 014207 (2005)
7. M. Rennhofer, B. Sepiol, M. Sladeczek, et al, Phys.Rev. B **74**, 104301 (2006).
8. J. DuMond, J. Paul Toutz, J. Appl. Phys. **11**, 357 (1940).
9. F.S. Bergeret, K.B. Efetov, A.I. Larkin, Phys. Rev B **62** 11872 (2000).