

РЗ-2002-189

Д. А. Корнеев, В. И. Боднарчук, С. П. Ярадайкин

**РЕФЛЕКТОМЕТР ПОЛЯРИЗОВАННЫХ НЕЙТРОНОВ
«РЕФЛЕКС-П»**

Введение

Метод нейтронной рефлектометрии, развитый в последние двадцать пять лет, является одним из наиболее эффективных методов изучения поверхности твердых тел и жидкостей. Этим методом изучаются свойства внутренних границ раздела сред на глубинах от нескольких сотен до нескольких тысяч нанометров, свойства тонких пленок и многослойных структур. Наличие у нейтрона магнитного момента позволяет изучать также мезоскопические магнитные свойства приповерхностных слоев массивных образцов и магнитных тонких пленок.

В настоящее время в мире насчитывается около полутора десятков действующих нейтронных рефлектометров, два из которых, СПН и «Рефлекс», создавались в лаборатории нейтронной физики им. И.М.Франка на реакторе ИБР-2 под руководством Д.А.Корнеева. Эта статья посвящена времяпролетному рефлектометру «Рефлекс», идея которого была опубликована еще в 1992 г. [1]. Рефлектометр «Рефлекс» создан с учетом опыта, накопленного при эксплуатации подобного рода установок в других нейтронных центрах, а также с учетом многолетней практики использования первого рефлектометра на реакторе ИБР-2 - СПН. Проект рефлектометра «Рефлекс», расположенного на 9-м канале реактора ИБР-2, предполагал создание одновременно двух независимо работающих рефлектометров. Один из них, о котором пойдет речь ниже, - рефлектометр поляризованных нейтронов «Рефлекс-П». Второй - рефлектометр неполяризованных нейтронов «Рефлекс-Н» - находится на стадии доработки.

Общая характеристика рефлектометра «Рефлекс-П»

Особенность канала вывода пучка тепловых нейтронов, на котором располагается спектрометр «Рефлекс-П», состоит в том, что это тангенциальный канал, т.е. источником тепловых нейтронов служит торцевая часть замедлителя. Лицевая сторона этого замедлителя является источником для 4, 5 и 6-го каналов. В 2000 г. на реакторе ИБР-2 начата эксплуатация криогенного замедлителя для производства холодных нейтронов, обслуживающего указанные три канала. При этом источником тепловых нейтронов для 9-го канала становится торцевая часть водяного предзамедлителя криогенного замедлителя (рис. 1) [2].

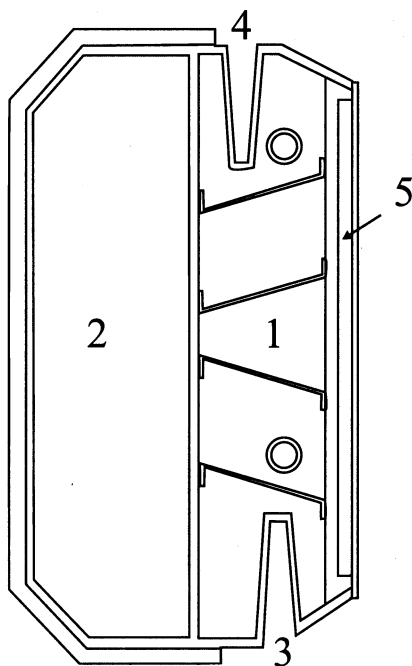


Рис. 1: Схема криогенного замедлителя реактора ИБР-2 (вид сверху): 1 - полость водяного предзамедлителя; 2 - полость, заполняемая метаном; 3, 4 - каньоны, обращенные в сторону 9-го и 1-го каналов соответственно; 5 - полость, заполняемая B_4C

Поверхность водяного предзамедлителя, обращенная в сторону 9-го канала, имеет выемку глубиной 80 мм, шириной 15 мм и высотой 200 мм. Такая форма (так называемая „нейтронная пушка“) увеличивает поток тепловых нейтронов по сравнению с плоской. Режим работы реактора предусматривает периодическую смену гребенчатого замедлителя и криогенного замедлителя, в связи с чем пространственное распределение потока тепловых нейтронов в канале будет меняться в зависимости от работающего в данный момент источника. Это требует периодической перенастройки некоторых элементов спектрометра и обуславливает необходимость размещения всех узлов, требующих юстировки, за биологической защитой для обеспечения возможности доступа к ним во время работы реактора. На рис. 2 представлено расположение основных узлов спектрометра. Непосредственно за стенкой кольцевого коридора находится механический прерыватель, установленный на юстировочном

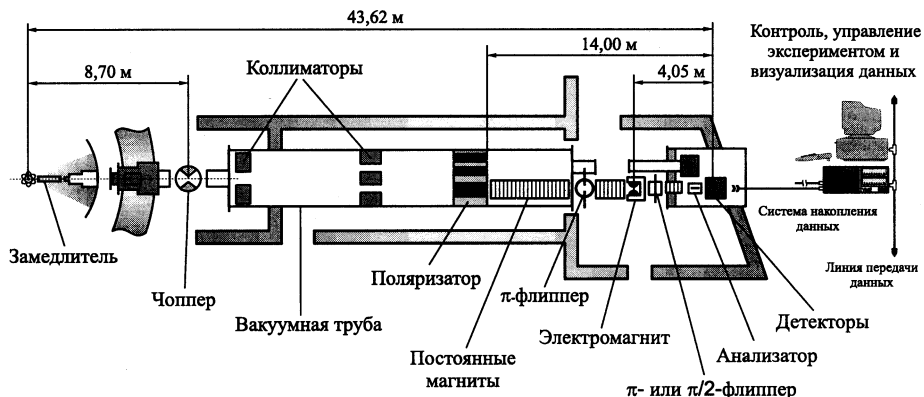


Рис. 2. Схема размещения оборудования спектрометра «Рефлекс»

столике, позволяющем смещать центр прерывателя поперек пучка для обеспечения максимальной видимости излучающей части замедлителя. Прерыватель может работать в двух режимах: с частотой вращения 150 и 300 об/мин. При частоте 150 об/мин ширина спектра составляет от 1,4 до 10,0 Å.

Пучок поляризованных нейтронов, падающих на образец, формируется нейтронно-оптической системой, представляющей из себя прямой зеркальный нейтронновод длиной 1,6 м, состоящий из двух секций по 0,8 м каждая, шириной 1,6 мм, высотой 80 мм (рис. 3). Стенки нейтронновода покрыты слоем FeCo-пленки толщиной 1500 Å на TiGd-подслое. Весь нейтронновод помещен в магнитное

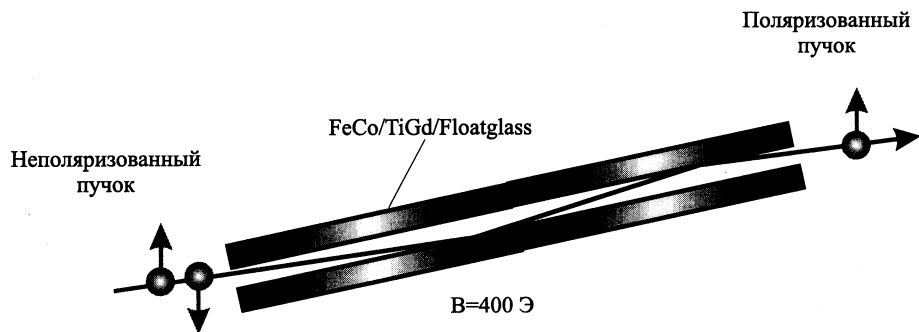


Рис. 3. Схема нейтронно-оптической системы спектрометра «Рефлекс-П»

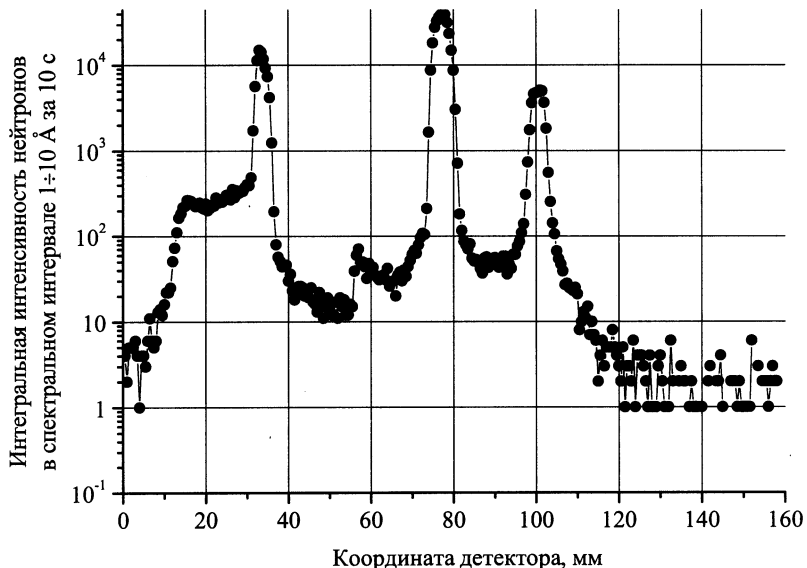


Рис. 4. Распределение потока нейтронов в плоскости, перпендикулярной пучку, на месте детектора

поле ~ 400 Э, создаваемое постоянными магнитами. Нейтронород ориентируется относительно входящего пучка таким образом, чтобы на выходе получался пучок, испытывающий 2-кратное соударение со стенками. Двукратность отражения выбрана как компромисс между желанием иметь как можно большую степень поляризации пучка в полном интервале длин волн, которая увеличивается с каждым отражением от стенок намагниченного зеркала, и желанием иметь как можно более жесткий спектр (т.е. чтобы максимум спектра лежал в более коротковолновой его части). Кратность отражений возрастает при увеличении угла скольжения входящего пучка к стенкам нейтронорода, но при этом максимум спектра смещается в длинноволновую область. Из-за некоторой расходимости входящего пучка в горизонтальной плоскости на выходе нейтронно-оптической системы присутствуют пучки, соответствующие как однократному, так и двукратному отражению. Вариация угла скольжения входящего

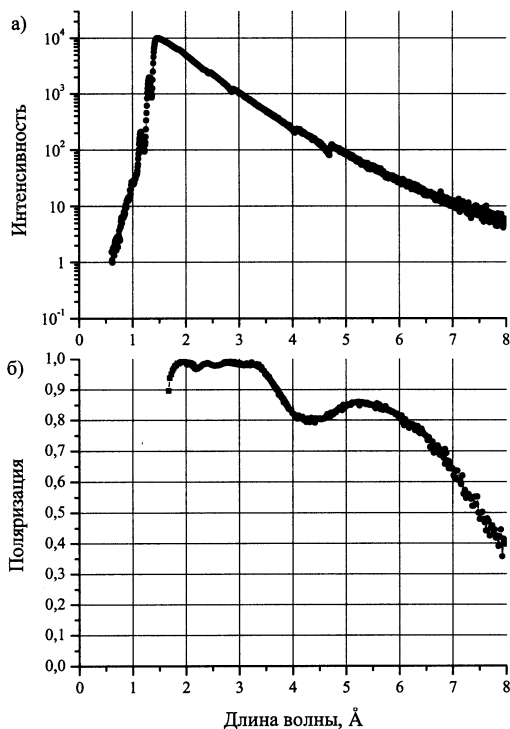


Рис. 5. а) Спéктр прямого пучка; б) зависимость поляризации от длины волны в пучке, падающем на образец

пучка „перекачивает“ поток из одного выходящего пучка в другой. Из-за дефекта сборки между двумя секциями нейтронотода имеется некоторый угол ~ 1 мрад, в результате чего распределение потока на выходе оптической системы искажено (рис. 4). Потеря интенсивности двукратно отраженного пучка при этом составляет десятки процентов, что представляет собой одну из проблем для решения в предстоящей модернизации спектрометра. В настоящее время рассматривается два варианта решения: 1) замена существующей нейтронно-оптической системы на новую с использованием поляризующих суперзеркал и 2) реконструкция существующей системы, исключая возможность изгиба нейтронотода в месте стыка двух участков.

Спектр, формируемый на выходе из поляризатора, и спектральная зависимость поляризующей эффективности поляризатора приведены на рис. 5. Интегральная плотность потока нейтронов на образце $\sim 10^5 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, что относит данный спектрометр к разряду установок с умеренной светосилой. Среднее время набора спектра отражения при угле скольжения падающего пучка около $5 \cdot 10^{-3}$ рад со средним по спектру коэффициентом отражения $\sim 10^{-3}$ составляет около 10 ч при площади отражающей поверхности $\sim 50 \text{ см}^2$ и статистической точности 10 %.

На спектрометре реализована горизонтальная геометрия отражения. Образец устанавливается в специальный держатель, закрепленный на юстировочном столике, имеющем две степени свободы: смещение в горизонтальном направлении поперек пучка и вращение вокруг вертикальной оси. Детекторная система представлена двумя типами одиночных детекторов. Первый - детектор на основе He^3 -счетчика СНМ-31, второй - сцинтилляционный счетчик на основе ZnS -керамики. Детекторы могут перемещаться вдоль горизонтальной линии, перпендикулярной оси пучка, а также, при необходимости, в вертикальном направлении (см. ниже главу „Неупругая мода рефлектометра «Рефлекс-П»“). Все перемещения выполняются с помощью шаговых двигателей, блок управления которыми выполнен в стандарте КАМАК. Электронно-накопительный модуль разработан в том же стандарте. Уровень фона на спектрометре позволяет измерять коэффициенты отражения вплоть до значений $\sim 10^{-7}$ для образцов с площадью поверхности $\sim 100 \text{ см}^2$, что подтверждено экспериментально.

Ведущее магнитное поле $\sim 120 \text{ Э}$ обеспечивает проводку поляризации от поляризующего нейтронвода до места образца $\sim 10 \text{ м}$. На спектрометре «Рефлекс-П» используется спин-флиппер с протяженной рабочей областью в вертикальном направлении для работы с монохроматическими пучками, разработанный Д.А.Корнеевым [3]. Спин-флиппер располагается перед образцом на расстоянии 0,6 м.

Разрешение

Разрешение спектрометра «Рефлекс-П» складывается из двух параметров - разрешения по длине волны, определяемого длительностью импульса реактора и пролетной базой замедлитель-детектор, и углового разрешения, определяемого геометрическими характеристиками

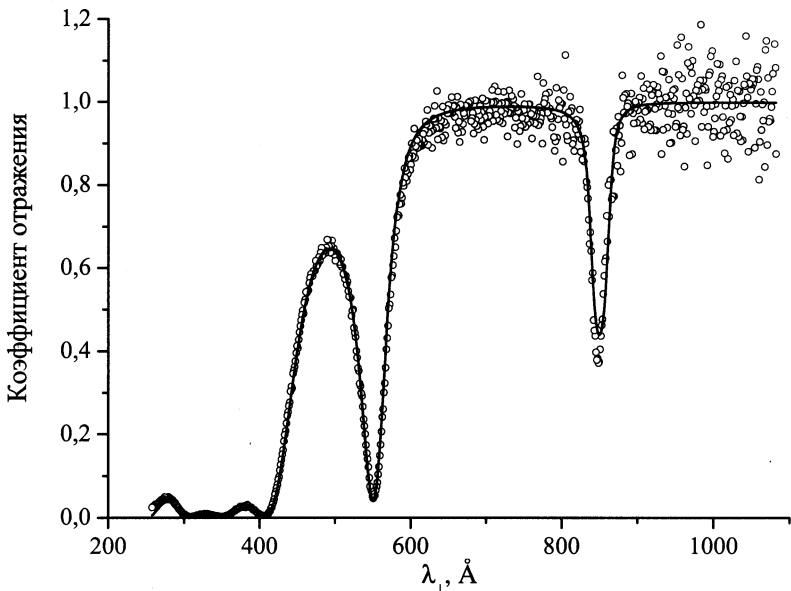


Рис. 6. Коэффициент отражения от нейтронного фильтра. По оси абсцисс отложены так называемые нормальные длины волн $\lambda_{\perp} = \lambda/\Theta$. Кругами отмечены экспериментальные значения коэффициента отражения, сплошная линия - подгонка данных методом наименьших квадратов

установки. Относительное разрешение нормальной к отражающей поверхности компоненты волнового вектора k_{\perp} можно представить в виде

$$\left(\frac{\Delta k_{\perp}}{k_{\perp}}\right)^2 = \left(\frac{\Delta\Theta}{\Theta}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right)^2, \quad (1)$$

где Θ , $\Delta\Theta$ - угол скольжения падающего на образец пучка и его неопределенность, связанная с геометрией коллимационных щелей; λ , $\Delta\lambda$ - длина волны нейтрона и ее неопределенность, связанная с неопределенностью времени вспышки реактора и конечной шириной канала временного анализатора. Для установки «Рефлекс-П» величины, входящие в правую часть выражения (1), составляют $\frac{\Delta\Theta}{\Theta} \sim 0,02$; $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx 0,01 \frac{1}{\lambda(\text{Å})}$.

Наглядным примером проявления реализованного высокого разрешения является экспериментальное исследование на установке «Рефлекс-П» нейтронного фильтра (см. рис. 6) [4]. Особенностью структуры данного образца является наличие в спектре отражения очень узкого резонанса, спектральную ширину которого $\Delta\lambda$ можно представить в виде $\Delta\lambda = 20 * \Theta(\text{Å})$, где Θ - угол скольжения (в радианах). С учетом того, что величина Θ порядка 10^{-3} рад, требуется разрешение нормальной компоненты волнового вектора порядка нескольких процентов, чтобы иметь достаточно экспериментальных точек в той части спектра, в которой имеется данный резонанс.

Неупругая мода рефлектометра «Рефлекс-П»

До настоящего времени интерпретация незеркально рассеянных нейтронов основывается на механизме упругого диффузного рассеяния на шероховатостях поверхности. Можно предположить, что определенную часть незеркально рассеянных нейтронов составляют нейтроны, испытавшие неупругое взаимодействие с фононами и/или магнонами поверхности. Такой процесс возможен и должен наблюдаться именно в области углов, близких к зеркальному, что определяется величиной волнового вектора фонона и/или магнона. При фиксированном угле скольжения к поверхности нейтроны, имеющие энергию меньше некоторой критической, не проникают в среду. Величина критической энергии зависит от величины оптического потенциала среды и угла скольжения. Волновая функция нейтронов с энергией меньше критической распадается на произведение двух сомножителей, один из которых соответствует стоячей волне плотности вероятности нейтрона по глубине, второй соответствует свободной волне в направлении, параллельном поверхности. Обмен энергией нейтронов с планарными возбуждениями идет через его параллельную поверхности компоненту скорости, а вероятность этого процесса максимальна в той области по глубине пленки, где находится пучность нормальной компоненты нейтронной волны. Последнее позволяет, изменяя длину волны падающих нейтронов, смещать пучность и проводить глубинное сканирование приповерхностного слоя, так как модуль компоненты скорости, перпендикулярной поверхности, в процессе неупругого отражения должен сохраняться. Это должно приводить к тому, что углы отлета от поверхности неупруго рассеянных

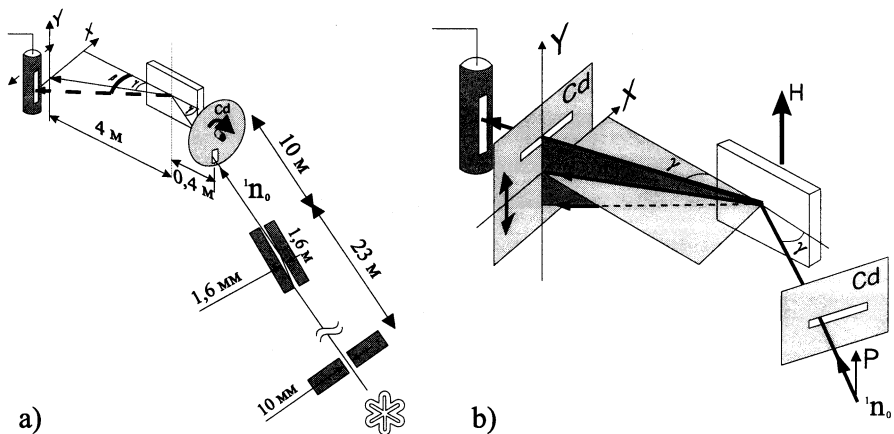


Рис. 7. Неупругая мода рефлектометра «Рефлекс-П»: а) схема эксперимента по поиску неупругого рассеяния на немагнитных поверхностных возбуждениях; б) то же для изучения поверхностных магнитных возбуждений

нейтронов продолжают оставаться малыми, т.е. сравнимыми с углами диффузно (упруго) рассеянных нейтронов. Например, четырехкратное изменение энергии (двукратное изменение скорости, параллельной поверхности) теплового нейтрона изменяет угол отлета (по сравнению с углом скольжения падающего пучка) в два раза в большую или в меньшую сторону в зависимости от того, поглотился или родился квант энергии соответственно. Неупругое магнитное рассеяние на массивных образцах сосредоточено в пределах малого углового раствора, численно равного отношению массы магнона к массе нейтрона (порядка $1/100$). Измеряя угловое распределение рассеянных нейтронов, можно определить этот характерный угол обрыва и тем самым определить величину спиновой жесткости (а значит, и массу магнона и величину обменного интеграла). Взаимодействие с поверхностными и междуслойными магнонами также содержит, в предположении квадратичного закона дисперсии, ограничение на угол рассеяния в плоскости, перпендикулярной плоскости зеркального отражения. Определение этого угла позволяет судить о параметрах, характеризующих поверхностные или междуслойные магноны. Для разделения неупруго отраженных нейтронов от упругого диффузного фона стандартный метод рефлектометрии на установке «Рефлекс-П» был несколько модифицирован (рис. 7). А именно,

во-первых, для изучения поверхностных и междуслойных фононов перед образцом установлен механический дисковый монохроматор падающих нейтронов с шириной линии $\Delta\lambda/\lambda = 4 \cdot 10^{-2}/\lambda(\text{\AA})$ (энергия нейтронов выбирается меньше критической для изучаемого образца), во-вторых, реализована возможность анализа энергии нейтронов, отраженных на малые углы в незеркальном направлении (рис. 7, а). Далее, для изучения поверхностных и междуслойных магнонов реализована методика изучения углового распределения нейтронов в плоскости, перпендикулярной плоскости отражения, то есть рассеянных в плоскости, параллельной отражающей поверхности (рис. 7, б). Нейтронных рефлектометров, работающих по такому принципу, в других лабораториях не существует, а сама идея проводить анализ энергии при зеркальном отражении тепловых нейтронов другими авторами не обсуждалась. Таким образом, неупругая мода рефлектометра «Рефлекс-П» является уникальной для данного типа установок.

В настоящее время проводятся измерения по поиску неупругого взаимодействия тепловых нейтронов с поверхностными возбуждениями.

Деполаризационная мода рефлектометра «Рефлекс-П»

Спектрометр «Рефлекс-П» оснащен так называемыми $\pi/2$ -ротаторами - устройствами, поворачивающими вектор поляризации пучка на угол $\pi/2$ относительно внешнего магнитного поля. Наличие таких устройств позволяет проводить эксперименты по методу ларморовской прецессии спина нейтрона. Суть метода заключается в том, чтобы анализировать не только параллельную магнитному полю P_z компоненту вектора поляризации, но и перпендикулярную P_y . Изучение процесса деполаризации поляризованных нейтронов при пропускании их через ферромагнитные или сверхпроводящие образцы позволяет получать информацию о мезомагнитных неоднородностях: величина локальной намагниченности, средний размер неоднородностей доменов, корреляции направлений векторов локальных намагниченностей. Физической причиной изменения величины и направления вектора поляризации является ларморовская прецессия спина нейтрона в локальных магнитных полях образца. Трехмерный анализ поляризации прошедшего пучка существенно расширяет экспериментальные возможности. Сочетание трехмерного анализа и времяпролетной

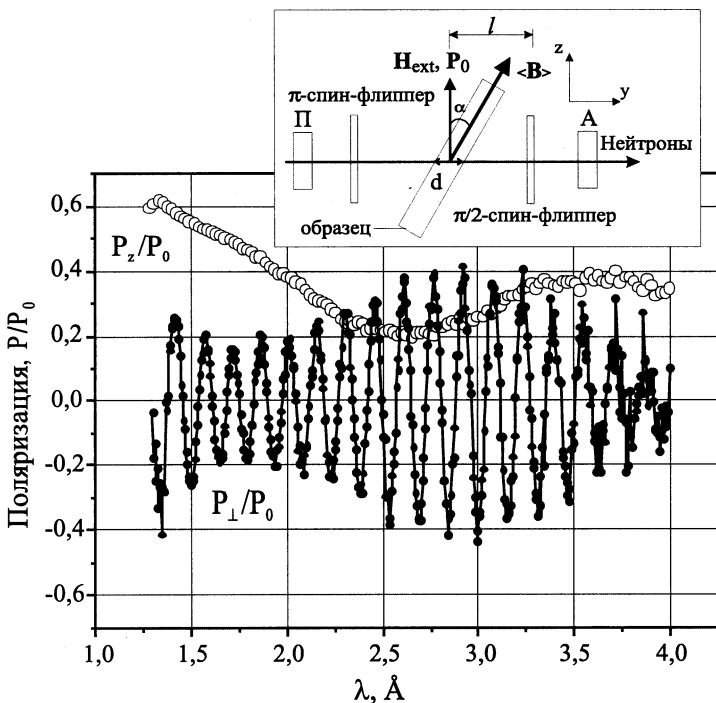


Рис. 8: Пример трехмерного анализа поляризации на установке «Рефлекс-П». Образец прямоугольной формы с намагниченностью $\langle \mathbf{B} \rangle$ помещается во внешнее магнитное поле \mathbf{H}_{ext} так, что его поверхность образует некоторый угол α с направлением \mathbf{H}_{ext} . В такой геометрии экспериментальная измеряемая поляризация пучка на образце $P(\lambda)/P_0(\lambda)$ содержит как параллельную, так и перпендикулярную компоненты к вектору $\langle \mathbf{B} \rangle$. На вставке приведена схема эксперимента. П - поляризатор, А - анализатор поляризации

методики позволит реализовать эффективное средство изучения неоднородного (многодоменного, смешанного) состояния в магнитных, сверхпроводящих массивных или пленочных образцах в зависимости от состава, технологии изготовления, внешних параметров (магнитное поле, температура, напряжение). Пример экспериментального трехмерного анализа поляризации приведен на рис. 8.

Заключение

Рефлектометр «Рефлекс-П» является многофункциональным спектрометром, предназначенным для исследований свойств поверхности и тонких пленок толщиной до нескольких тысяч ангстрем. Наиболее приемлемыми задачами для данной установки являются нейтронно-оптические исследования ядерной и магнитной мезоструктур поверхности. Благодаря высокому угловому разрешению, делающему возможным измерение детальных особенностей в поведении кривой зеркального отражения в широком спектральном интервале.

Вместе с тем, спектрометр нуждается в некоторой модернизации. Можно обозначить основные задачи модернизации. В первую очередь это решение проблемы, связанной с наличием отмеченного дефекта существующей нейтронно-оптической системы, приводящего к потере интенсивности нейтронов на образце. Кроме того, в настоящее время некоторые участки пролетной базы не вакуумированы, что также ведет к потере интенсивности из-за рассеяния на воздухе. Возможности спектрометра ограничены использованием одиночных детекторов. Доукомплектование спектрометра позиционно-чувствительным детектором позволит включить в число решаемых задачи, связанные с регистрацией незеркально отраженных нейтронов - область, которая в последнее время бурно развивается на других нейтронных рефлектометрических установках. Еще один комплекс задач связан с переводом электроники управления экспериментом и сбором данных в современный стандарт VME. Указанные изменения должны вывести спектрометр «Рефлекс-П» в разряд современных приборов мирового класса.

Сводка основных параметров рефлектометра «Рефлекс-П»

Источник тепловых нейтронов	а) гребенчатый водяной замедлитель ($T=320$ К) б) водяной предзамедлитель ($T=320$ К) холодного замедлителя
Максимальный диапазон длин волн	$0,5 \text{ \AA} < \lambda < 10,0 \text{ \AA}$
Диапазон по Q	$0,003 \text{ \AA}^{-1} < Q < 0,2 \text{ \AA}^{-1}$
Размеры поперечного сечения пучка в месте размещения образца	2 мм (ширина) \times 60 мм (высота)
Допустимые углы скольжения Θ	$1 < \Theta < 20$ (мрад)
Угловое разрешение $\frac{\Delta\Theta}{\Theta}$	$\sim 2\%$ (горизонтальная расходимость пучка $\Delta\Theta \sim 1,5 \cdot 10^{-4}$ рад) $\sim 10^5 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$
Поток нейтронов на образце	Зеркальный нейтронный пучок длиной 1,6 м на основе FeCo/TiGd-пленки
Поляризатор	Адиабатический спин-флиппер Д.А.Корнеева
Спин-флиппер	20×20 мм
Минимальные размеры образца	80×200 мм
Максимальные размеры образца	2 вращающихся вокруг оси пучка электромагнита с полями: а) до 2 кЭ б) до 10 кЭ
Магнитное поле на образце	Одиночный двух типов: а) He ³ -счетчик СНМ-31 б) сцинтилляционный счетчик на основе ZnS-керамики
Детектор	$\sim 10^{-7}$
Минимально достижимое экспериментальное значение коэффициента отражения R_{min}	а) криорефрижератор ($T > 10$ К) б) печь ($T < 900$ К)
Температура на образце	Холловский магнитометр для измерения 3-х проекций магнитного поля
Магнитометр	

Литература

- [1] V.L. Aksenov, D.A. Korneev, L.P. Chernenko. SPIE Proceedings Series, v. 1738, p.335-345 (1992).
- [2] A.A. Beliakov, V.I. Bodnarchuk, D.A. Korneev, V.F. Peresedov, E.P. Shabalin, S.P. Yaradaikin, FLNP, JINR, Annual Report, 2001.
- [3] Korneev D.A. Nucl. Instrum. Meth., 1980, vol. 169, p. 65-69;
Korneev D.A., Kudrjashev V.A. Ibid., 1981, vol. 179, p.509-513.
- [4] I.V. Bondarenko, V.I. Bodnarchuk, S.N. Balashov, P. Geltenbort, A.G. Klein, A.V. Kozlov, D.A. Korneev, S.V. Masalovich, V.G. Nosov, A.I. Frank, P. Hoghoj, A. Cimmino. Physics of Atomic Nuclei, Vol. 62, No. 5, pp.721-737, 1999.

Получено 30 июля 2002 г.

Корнеев Д. А., Боднарчук В. И., Ярадайкин С. П.
Рефлектометр поляризованных нейтронов «Рефлекс-П»

P3-2002-189

Примерно 10 лет назад была сформулирована идея нового спектрометра «Рефлекс» на реакторе ИБР-2. Первоначально спектрометр проектировался как совокупность двух рефлектометров — с поляризованными и неполяризованными нейтронами. В настоящее время реализована половина этого проекта. На 9-м канале реактора ИБР-2 успешно функционирует поляризационное плечо спектрометра — «Рефлекс-П». Настоящая работа посвящена описанию основных параметров этого рефлектометра и перспективам развития.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2002

Перевод авторов

Korneev D. A., Bodnarchuk V. I., Yaradaykin S. P.
Polarized Neutron Reflectometer «Reflex-P»

P3-2002-189

About 10 years ago the idea of a new spectrometer «Reflex» on the IBR-2 reactor was formulated. According to the initial idea, the spectrometer was projected as a combination of two reflectometers. One of them is the spectrometer with polarized neutrons and another one with nonpolarized neutrons. At present the half of the project has been executed. On the 9th beam of the IBR-2 reactor the polarized branch of the spectrometer — «Reflex-P» is successfully working. This paper is devoted to the description of main parameters of this spectrometer and development perspectives.

The investigation has been performed at the Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2002

Редактор *А. Н. Шабашова*
Макет *Н. А. Киселевой*

Подписано в печать 07.10.2002.

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

Усл. печ. л. 0,87. Уч.-изд. л. 0,9. Тираж 300 экз. Заказ № 53551.

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