

Д13-2004-47

В. Л. Аксенов¹, К. Н. Жерненков¹, С. В. Кожевников¹,
Х. Лаутер², В. Лаутер-Пасюк^{1,2,3}, Ю. В. Никитенко¹,
А. В. Петренко¹

**СПЕКТРОМЕТР ПОЛЯРИЗОВАННЫХ НЕЙТРОНОВ
РЕМУР НА ИМПУЛЬСНОМ РЕАКТОРЕ ИБР-2**

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

²Институт Лауэ–Ланжевена, Гренобль, Франция

³Мюнхенский технический университет, Мюнхен, Германия

Аксенов В. Л. и др.

D13-2004-47

Спектрометр поляризованных нейтронов REMUR
на импульсном реакторе ИБР-2

Создан и введен в эксплуатацию новый спектрометр поляризованных нейтронов REMUR, предназначенный как для проведения исследований многослойных структур и поверхностей путем регистрации отражения поляризованных нейтронов, так и для изучения неоднородного состояния твердого тела с учетом диффузного рассеяния поляризованных нейтронов на малые углы. Спектрометр работает в интервале длин волн нейтронов $1 \div 10 \text{ \AA}$ и в рефлектометрическом режиме измерений позволяет осуществлять полный поляризационный анализ и позиционно-чувствительное детектирование нейтронов в телесном угле рассеяния $2,2 \cdot 10^{-4}$ рад. На спектрометре статистически обеспеченными являются рефлектометрические измерения в интервале изменения вектора рассеяния нейтронов $3 \cdot 10^{-3} \div 5 \cdot 10^{-1} \text{ \AA}^{-1}$. В малоугловом режиме измерений спектрометр позволяет проводить исследование процессов рассеяния нейтронов без переворота спина в диапазоне телесного угла регистрации нейтронов детектором от $4 \cdot 10^{-3}$ до 10^{-1} рад в интервале значений вектора рассеяния от $0,006 \div 0,15$ до $0,03 \div 0,7 \text{ \AA}^{-1}$ соответственно.

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

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2004

Перевод авторов

Aksenov V. L. et al.

D13-2004-47

The Polarized Neutron Spectrometer REMUR
at the Pulsed Reactor IBR-2

A new polarized neutron spectrometer REMUR has been constructed and commissioned. The spectrometer REMUR is dedicated to investigations of multilayers and surfaces by polarized neutron reflection and of the inhomogeneous state of solids by diffuse small-angle polarized neutron scattering. The spectrometer operates in the neutron wavelength interval $1 \div 10 \text{ \AA}$. In the reflectometry mode it allows one to complete polarization analysis and neutron position-sensitive detection within the solid angle of scattering $2,2 \cdot 10^{-4}$ rad. The spectrometer ensures good statistics of the reflectometric data in the scattering wave vector interval $3 \cdot 10^{-3} \div 5 \cdot 10^{-1} \text{ \AA}^{-1}$. In the small-angle scattering mode the spectrometer allows the investigation of neutron scattering processes without spin-flip over the detector's neutron registration solid angle interval from $4 \cdot 10^{-3}$ to 10^{-1} rad and the scattering wave vector interval from $0.006 \div 0.15$ to $0.03 \div 0.7 \text{ \AA}^{-1}$, respectively.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2004

ВВЕДЕНИЕ

Первоначально поляризованные нейтроны использовались для исследования структуры неоднородного магнитного состояния ферромагнетика с помощью измерения поляризации (метод деполяризации нейтронов) прошедшего через образец поляризованного пучка нейтронов [1–3]. В настоящее время область применений поляризованных нейтронов значительно расширилась. К ней относятся, например, изучение структуры магнетика с помощью диффузного рассеяния нейтронов [4], исследование магнитных возбуждений в ферромагнетике по угловому распределению рассеянных поляризованных нейтронов [5], изучение методом нейтронного спинового эха низкочастотных возбуждений в твердом теле [6] и, наконец, изучение слоистой наноструктуры с помощью отражения нейтронов (метод нейтронной рефлектометрии) [7]. Нейтронная рефлектометрия начала активно развиваться как метод исследования поверхности твердого тела сравнительно недавно — в 1980-х гг.

Одним из первых в мире рефлектометров с поляризованными нейтронами был начавший работать в 1984 г. спектрометр с поляризованными нейтронами (СПН) на реакторе ИБР-2. Оригинальным элементом СПН был спин-флиппер Корнеева с протяженной рабочей областью в вертикальном направлении [8, 9]. Первые эксперименты на СПН выполнены в режиме деполяризации, затем он долгое время работал как нейтронный рефлектометр [10].

В настоящее время вследствие бурного развития нанотехнологии возникла необходимость в создании сложных магнитно-неколлинеарных периодических структур и бислоев с совершенными границами раздела, наноструктур, структурированных в плоскости, структур с зигзагообразными границами раздела и т. д. [11]. В связи с необходимостью решения этих задач в различных нейтронных центрах сейчас уже создано порядка сорока нейтронных рефлектометров и продолжает интенсивно развиваться метод поляризационной нейтронной рефлектометрии.

Развитие метода идет в следующих направлениях: увеличение информативности измерений, повышение его поляризационной эффективности, увеличение диапазона изменения и разрешения в измерении переданного момента, повышение светосилы измерений, увеличение чувствительности измерения какого-либо параметра (например, абсолютной величины вектора намагниченности, угла поворота вектора намагниченности, толщины слоя

и т. д.), увеличение телесного угла регистрации рассеянных нейтронов и снижение фонового уровня интенсивности счета нейтронов. Нанощероховатости в окрестности границ раздела, магнитные и ядерные неоднородности в отдельных слоях оказывают влияние на те или иные взаимодействия и макросвойства структур. Поэтому важным является регистрация диффузного рассеяния поляризованных нейтронов от структуры. В этой связи следует отметить, что метод нейтронной рефлектометрии в своей технической реализации хорошо совместим с методом диффузного рассеяния нейтронов на неоднородностях среды. Действительно, экспериментальная основа метода нейтронной рефлектометрии — необходимость проведения измерений отражения нейтронов в окрестности критического значения переданного волнового вектора $k_c = 4\pi \sin \theta_c / \lambda$, где λ — длина волны нейтрона, θ_c — критический угол скольжения нейтронов. Значение k_c зависит от плотности ядер и величины амплитуды рассеяния нейтронов на ядре и составляет порядка $2 \cdot 10^{-2} \text{ \AA}^{-1}$, что для тепловых нейтронов с длиной волны $\lambda = 1,8 \text{ \AA}$ соответствует углу рассеяния $\theta_{\text{scat},r} = 2\theta_c \approx 6 \cdot 10^{-3}$ рад. Экспериментальной же основой метода диффузного рассеяния нейтронов является необходимость проведения измерений в окрестности значения переданного волнового вектора $q = 2\pi \sin(\theta_{\text{scat},d}) / \lambda = 2\pi / d$, где d — линейный размер неоднородности среды (корреляционная длина). Из соотношения для q следует, что при $d \approx 300 \text{ \AA}$ угол рассеяния составляет $\theta_{\text{scat},d} \approx 5,9 \cdot 10^{-3}$, это очень близко к критическому углу рассеяния $\theta_{\text{scat},r}$ в методе рефлектометрии.

Таким образом, соответствие угловых характеристик двух типов рассеяния нейтронов, необходимость знать структуру и ее искажения на границах раздела, а также степень однородности вещества в слоях структуры, приводит нас к мысли, что в спектрометре поляризованных нейтронов важно предусмотреть как регистрацию зеркального и диффузного отражения от границ раздела и поверхностей, так и регистрацию малоуглового рассеяния нейтронов на неоднородностях в объеме.

1. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА СПЕКТРОМЕТРА

В спектрометре поляризованных нейтронов РЕМУР реализованы следующие возможности.

1. Режим измерения отражения поляризованных нейтронов и пропускания их через слоистую структуру (рефлектометрическая мода измерений) и режим измерения диффузного рассеяния нейтронов на малые углы (малоугловая мода измерений).

2. Полный поляризационный анализ [12] отраженного и рассеянного пучков нейтронов, позволяющий проводить исследование процессов с изменением и без изменения спинового состояния нейтронов.

3. Поляризационный анализ пучка нейтронов относительно локального поля в исследуемом образце, основанный на существующем при ненулевой вероятности перехода нейтрона между спиновыми состояниями эффекте пространственного расщепления пучка нейтронов.

4. Позиционно-чувствительное детектирование нейтронов с угловым разрешением в горизонтальной плоскости $\pm 0,17$ мрад.

5. Перемещение поляризационной эффективности рефлектометрической моды измерений в диапазоне длин волн нейтронов $1,5 \div 5 \text{ \AA}$, осуществляемое путем изменения угла скольжения пучка нейтронов на суперзеркале поляризатора нейтронов.

6. Автоматическое переключение состояний спектрометра при работе в определенном измерительном режиме, автоматический набор спектрометрической информации, контроль состояния отдельных узлов спектрометра.

7. Визуализация и экспресс-анализ экспериментальных данных.

На рис. 1 показана функциональная схема спектрометра. Быстрые нейтроны, образовавшиеся в активной зоне реактора AZ, термализуются в водяном замедлителе WM, окружающем активную зону реактора. Толщина замедлителя составляет 5 см и определяет время замедления быстрых нейтронов и длительность импульса тепловых нейтронов 320 мкс [13]. Момент испускания тепловых нейтронов замедлителем в дальнейшем есть точка отсчета для определения времени пролета нейтронов от замедлителя до детектора нейтронов. Время пролета, в свою очередь, определяет длину волны нейтронов, что и является основой метода времени пролета на импульсном источнике нейтронов. Пучок тепловых нейтронов, вылетающих из замедлителя, формируется двухдисковым прерывателем нейтронов DCh (расстояние от прерывателя до замедлителя $L_1 = 4,5$ м). Прерыватель нейтронов служит для пропускания основного импульса тепловых нейтронов и отсекаания четырех спутанных импульсов тепловых нейтронов, появляющихся через время, кратное 40 мкс, после возникновения основного импульса. Появление спутанных импульсов связано с прохождением второго дополнительного отражателя нейтронов вблизи активной зоны. После прерывателя пучок нейтронов проходит коллиматор C1 (диаметр проходного для нейтронов круглого отверстия коллиматора составляет 200 мм, расстояние от коллиматора до замедлителя $L_2 = 9$ м), расположенный в стене биологической защиты реактора, конический сходящийся нейтронотвод NG и находящийся на выходе нейтронотвода второй коллиматор C2 (сечение проходного для нейтронов отверстия коллиматора составляет 20×160 мм, расстояние от замедлителя $L_3 = 20$ м). На участке протяженностью 4,5 м после второго коллиматора в направлении вдоль пучка и параллельно друг другу расположены системы формирования поляризованного пучка для рефлектометрического и малоуглового режимов работы спектрометра. Каждая из систем формирования поляризованного пучка нейтронов состоит из двух узлов, размещенных соответственно на двух общих для обеих

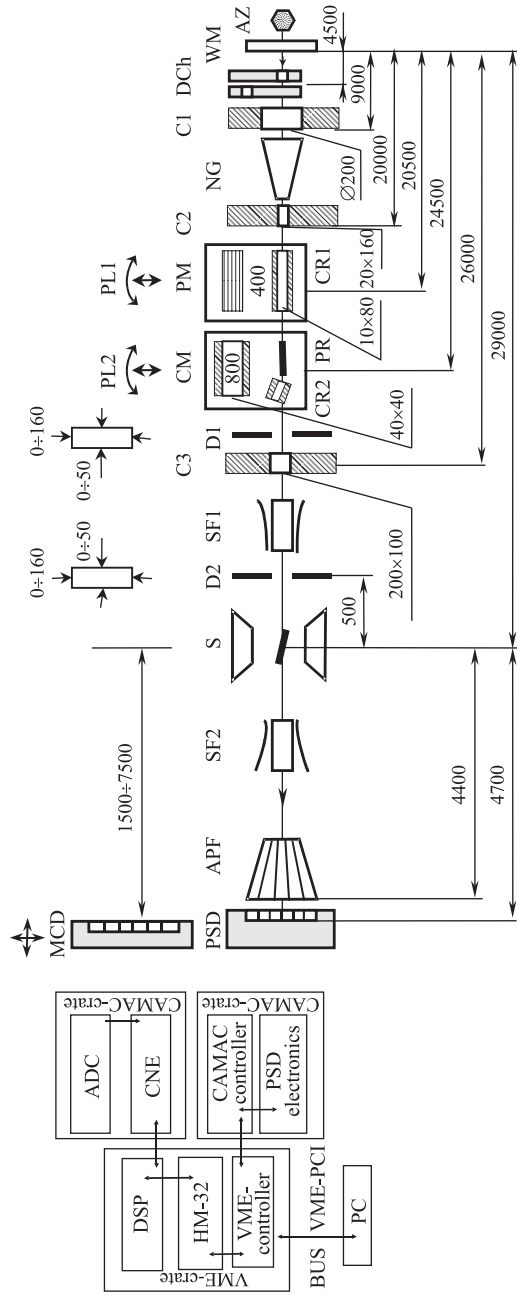


Рис. 1. Функциональная схема спектрометра РЕМУР и блок-схема системы сбора данных: AZ — активная зона реактора; WM — водяной замедлитель; DCCh — двухдисковый прерыватель; C1, C2, C3 — коллиматоры; NG — конический нейтронвод; PL1, PL2 — управляемые платформы №1 и 2; CR1, CR2 — коллиматоры рефлектометрической моды; PR — поляризатор рефлектометрической моды; PM — поляризатор малоугловой моды; CM — коллиматор малоугловой моды; D1, D2 — управляемые диафрагмы; SF1, SF2 — спин-флиперы; S — образец; APF — сфокусированный анализатор; PSD — позиционно-чувствительный детектор; MCD — многосчетчиковый детектор малоугловой моды

систем подвижных платформах PL1 ($L_4 = 20,5$ м) и PL2 ($L_5 = 24,5$ м). Платформы протяженностью 1200 мм в направлении вдоль пучка нейтронов имеют на своих концах приводы для перемещения их поперек пучка. С помощью этих приводов выполняется юстировка узлов относительно пучка нейтронов.

Система формирования поляризованного пучка рефлектометрической моды состоит из коллиматора CR1, поляризатора нейтронов PR и коллиматора CR2. Коллиматор CR1 длиной 1200 мм размещен на первой платформе и имеет проходное сечение 10×80 мм. Поляризатор PR находится на второй платформе и представляет собой суперзеркало, изготовленное на стеклянной подложке размером $28 \times 100 \times 800$ мм. Коллиматор CR2 имеет длину 400 мм и проходное отверстие с сечением на выходе 2×80 мм. Оптимальное положение коллиматора CR2, обеспечивающее прохождение через него отраженного от поляризатора пучка нейтронов и низкий уровень фона быстрых нейтронов, достигается поворотом коллиматора вокруг оси вращения, совмещенной с выходом поляризатора. На выходе коллиматора формируется поляризованный пучок нейтронов сечением 2×80 мм.

Система формирования поляризованного пучка малоугловой моды измерений состоит из поляризатора PM и коллиматора CM, размещенных на первой и второй платформах соответственно. Поляризатор представляет собой стопку прямых суперзеркал длиной 300 мм с расстоянием между ними 1 мм. Проходное отверстие поляризатора имеет сечение 38×42 мм. На выходе поляризатора формируется пучок нейтронов сечением 20×42 мм. Коллиматор CM длиной 1200 мм имеет проходное отверстие сечением 40×40 мм.

Сформированный поляризованный пучок нейтронов на пути до образца проходит еще кадмиевую диафрагму D1 ($L_6 = 25$ м), выходной коллиматор C3 ($L_7 = 26$ м), спин-флиппер SF1 и вторую диафрагму D2 ($L_7 = 28,5$ м). Сечение проходного отверстия диафрагм регулируется дистанционно в пределах $(0 \div 50) \times (0 \div 160)$ мм. Сечение проходного отверстия коллиматора C3 равно 100×200 мм. Градиентный радиочастотный спин-флиппер осуществляет изменение направления поляризации нейтронного пучка на противоположное и представляет собой соленоид длиной 300 мм и диаметром 160 мм, окруженный изогнутыми катушками специальной формы. Переменное магнитное поле величиной 10 Э и частотой 75 кГц направлено по оси соленоида параллельно пучку нейтронов, а постоянное магнитное поле от изогнутых катушек направлено перпендикулярно направлению пучка нейтронов и изменяется по величине вдоль направления пучка в пределах $40 \div 10$ Э.

Место установки образца находится от замедлителя на расстоянии $L_8 = 29$ м. Образец крепится в специальном держателе, на входе и выходе которого могут устанавливаться диафрагмы, выполненные из листового кадмия толщиной 1 мм. В рефлектометрической моде измерений отраженные от образца нейтроны проходят второй спин-флиппер SF2 (аналогичен спин-

флипперу SF1), сфокусированный (вверный) анализатор поляризации пучка APF ($L_9 = 33,4$ м) [14] и регистрируются позиционно-чувствительным детектором PSD ($L_{10} = 33,7$ м) [15]. Данная аппаратура может быть использована и для малоугловых исследований в щелевой геометрии измерений, что продемонстрировано в работе [15].

В малоугловой моде измерений рассеянные на образце нейтроны регистрируются 32-счетчиковым детектором нейтронов MCD, который устанавливается от образца на расстоянии $1,5 \div 7,5$ м.

2. АППАРАТУРА СПЕКТРОМЕТРА

2.1. Поляризаторы и анализатор поляризации. Поляризаторы и анализатор поляризации выполнены из суперзеркала [16], имеющего критический угол отражения тепловых нейтронов $\theta_c(\lambda = 1,8 \text{ \AA}) = 6,3$ мрад, что в 2 раза превышает критический угол отражения нейтронов от поверхности из естественного никеля. Поскольку угол скольжения θ пучка нейтронов в поляризаторе (анализаторе поляризации) фиксирован, то критическому углу $\theta_c(\lambda = 1,8 \text{ \AA})$ соответствует критическая длина волны $\lambda_c(\text{ \AA}) = 1,8\theta/\theta_c(\lambda = 1,8 \text{ \AA})$. Как хорошо известно, принцип работы зеркального поляризатора (анализатора поляризации) заключается в том, что нейтроны с проекцией спина по направлению магнитного поля (нейтроны в «+» спиновом состоянии) отражаются от магнитного суперзеркального слоя, а нейтроны с проекцией спина против направления магнитного поля (нейтроны в «-» спиновом состоянии) проходят этот слой и поглощаются в следующем слое, который имеет большое сечение захвата нейтронов. Отношение числа отраженных нейтронов в «+» и «-» спиновых состояниях $r = j^+/j^-$ определяет поляризационную эффективность поляризатора (анализатора поляризации) $P = (r - 1)/(r + 1)$. Поляризационная эффективность P близка к единице (при этом $r \gg 1$) в интервале длин волн $\lambda \geq \lambda_c$, в котором коэффициент отражения нейтронов в «+» спиновом состоянии есть $R^+ \approx 1$, а между коэффициентами отражения выполняется соотношение $R^+ \gg R^-$.

Поляризатор рефлектотрической моды представляет собой стеклянную пластину размером $H \times D \times L = 100 \times 28 \times 800$ мм, на плоскость $H \times L$ которой нанесен слой суперзеркала. Здесь сторона L направлена вдоль пучка нейтронов, а H и D — поперек пучка, при этом H — в вертикальном, а D — горизонтальном направлениях. Толщина пластины $D = 28$ мм выбрана из соображений обеспечения достаточной плоскостности пластины, что в итоге обеспечивает небольшую угловую ширину отраженного пучка нейтронов. Ширина поляризованного пучка нейтронов d (размер в направлении перпендикулярно плоскости зеркала), определяющая при некоторых условиях значительную долю углового разрешения спектрометра, связана с

углом скольжения θ нейтронного пучка и длиной зеркала поляризатора l соотношением $d = l\theta$. Угол скольжения пучка нейтронов на поляризаторе путем вращения зеркала может быть выбран в пределах $3 \cdot 10^{-3} \div 10^{-2}$ рад, что дает $d = 0,24 \div 0,8$ мм. При этом критическая длина волны изменяется в пределах $0,86 \div 2,84$ Å.

Для работы в малоугловой моде предусмотрены два поляризатора: стопка прямых зеркал (СПЗ) и стопка изогнутых зеркал (СИЗ). Использование стопки зеркал связано с необходимостью на ограниченном расстоянии вдоль пучка получить поляризованный пучок нейтронов большого сечения. Из-за возможности реализации небольшого угла скольжения нейтронов поляризатор СПЗ отличается небольшим значением λ_c , что важно при работе на «теплом» источнике нейтронов. Среднее значение угла скольжения в СПЗ равно $\theta_{av} = \Delta d/l$, где Δd — расстояние между зеркалами, равное для данного СПЗ 1 мм. При длине зеркал $l = 300$ мм имеем $\theta_{av} = 3,3 \cdot 10^{-3}$ рад, что дает для критической длины $\lambda_c = 0,94$ Å. Недостатком СПЗ является то, что часть нейтронов может проходить поляризатор, не отражаясь от зеркала, если не принимать специальных мер. В итоге будет снижаться поляризующая эффективность поляризатора. Чтобы исключить снижение эффективности, необходимо выполнить условие $d < 2L_{ps}\theta_{av}$, где L_{ps} — расстояние от поляризатора до места установки образца. В спектрометре выбрано $L_{ps} = 9$ м, что для ширины пучка дает максимальное значение $d_{max} = 59,4$ мм. Однако из-за расходимости пучка и конечного размера образца значение d_{max} снижается до 40 мм.

С другой стороны, преимущество поляризатора СИЗ — отсутствие прямой видимости через него. На выходе такого поляризатора будут только нейтроны, отразившиеся от его зеркала. В связи с этим максимальная ширина пучка нейтронов равна ширине входного окна поляризатора. Однако для СИЗ λ_c оказывается больше, чем для СПЗ, и определяется рядом параметров [17]: $\lambda_c = 4a/l_d\sigma$, где $l_d = 2(2a\rho)^{1/2}$ — длина прямой видимости; a — ширина канала; ρ — радиус кривизны; $\sigma = (Nb/2\pi)^{1/2}$, N — плотность ядер вещества, b — амплитуда когерентного рассеяния, являющаяся суммой ядерной и магнитной амплитуд. Для СИЗ спектрометра РЕМУР $l_d = 500$ мм, $a = 0,6$ мм и $\sigma = 3,5 \cdot 10^{-3}$ Å⁻¹, что дает значение $\lambda_c \approx 1,4$ Å.

Анализатор спектрометра РЕМУР единственный в своем роде [14]. Некоторый аналог такого устройства представляет собой анализирующая система зеркал спектрометра малоуглового рассеяния в Петербургском институте ядерной физики (ПИЯФ) РАН в Гатчине [18]. Однако в рефлектометрическом эксперименте с преимущественно зеркальным отражением особенно важным является взаимное расположение исследуемого образца и зеркал анализатора. Если в обычном анализаторе плоскость зеркал ориентируется перпендикулярно образцу или параллельно плоскости рассеяния, то в анализаторе поляризации спектрометра РЕМУР плоскости его зеркал и плоскость

образца параллельны. При этом каждое зеркало анализатора ориентировано так, что образует один и тот же определенный угол с прямой линией, проведенной из одной точки — фокуса анализатора. Стопка зеркал по форме напоминает веер, и поэтому сфокусированный анализатор называется также веерным. В фокусе анализатора помещается исследуемый образец. Фокусное расстояние анализатора равно 4400 мм, расстояние между зеркалами толщиной 0,3 мм составляет 0,93 мм на входе и 1 мм на выходе, а угол скольжения пучка нейтронов на зеркале (угол наклона плоскости зеркала к радиусу-вектору, проведенному из фокуса) равен 4,5 мрад. Среднеквадратичная неопределенность угла скольжения пучка нейтронов на отдельном зеркале анализатора составляет 0,09 мрад, что в 2 раза меньше такой же величины для детектора и практически не приводит к ухудшению углового разрешения детектирования нейтронов. При этом относительное среднеквадратичное отклонение угла скольжения на зеркале составляет 2 %, а среднеквадратичный по зеркалам разброс поляризационной эффективности не превышает 0,5 %. Очевидно, чтобы обеспечить такие же параметры поляризационной эффективности и с образцом, ширина нейтронного пучка на образце (эффективная толщина образца) не должна превышать половины шага дискретности анализатора $\Delta d/2 = 0,65$ мм. При этом протяженность образца в направлении пучка должна быть не более 90 мм, а точность установки образца в направлении поперек пучка не хуже 0,2 мм. Эти требования, как правило, выполняются при работе в рефлектометрической моде измерений. Важным преимуществом этого типа анализатора поляризации является его высокая светосила. Обусловлено это тем, что при вертикальной ориентации зеркал анализатора и образца, как это есть в веерном анализаторе, анализатор и образец оказываются согласованными по расходимостям как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях. Оценим выигрыш в светосиле анализатора РЕМУР по сравнению с обычным анализатором. Для произведения площади проходного сечения анализатора РЕМУР S_a на телесный угол видимости образца Ω_s соотношение $S_f = S_a \Omega_s = S_a S_s / L_{sa}^2$, где $S_s = h_s d_s$ — площадь сечения образца; $S_a = h_a d_a$ — площадь сечения анализатора; h_s и h_a — размер образца и анализатора соответственно в направлении ориентации плоскости образца; $d_s = l_s \sin(\theta)$ и d_a — эффективный размер образца и размер зеркала анализатора соответственно в направлении перпендикулярно плоскости образца; L_{sa} — расстояние от образца до анализатора.

Для анализатора обычного типа имеем выражение $S_n = S_s \delta\theta_a (h_a / L_{sa})$, где $\delta\theta_a$ — среднеквадратичное значение угла скольжения, при котором эффективно работает зеркало анализатора. Для выигрыша в светосиле получаем фактор $\beta = S_f / S_n = d_a / (\delta\theta_a L_{sa})$. Определим $\delta\theta_a$ как $\Delta d_a / 4l_a$, где l_a — длина зеркала и Δd_a — расстояние между зеркалами анализатора. Тогда получим $\beta = 4d_a l_a / (\Delta d_a L_{sa})$. При имеющихся место для анализатора значениях $d_a = 38$ мм, $l_a = 300$ мм, $\Delta d_a = 1$ мм, $L_{sa} = 4400$ мм получаем $\beta \approx 10$.

Видно, что выигрыш растет при увеличении d_a и уменьшении L_{sa} , в то время как $l_a/\Delta d_a$ является постоянной величиной, характеризующей качество зеркала. В табл. 1 приведены значения параметров для трех различных поляризаторов и анализатора поляризации спектрометра РЕМУР.

Таблица 1. Параметры поляризаторов и анализатора спектрометра РЕМУР

Устройство	Значение
Рефлектометрический поляризатор (одно зеркало)	
Размер подложки, мм	$28 \times 100 \times 800$
Сечение поляризованного пучка, мм	$0,24 \div 0,8$
Угол скольжения пучка, мрад	$1 \div 3,3$
Критическая длина волны, Å	$0,86 \div 2,84$
Малоугловой поляризатор (стопка прямых зеркал)	
Число зеркал	32
Толщина подложки из стекла, мм	0,2
Расстояние между зеркалами, мм	1
Длина зеркала, мм	300
Покрытие	С двух сторон
Сечение поляризованного пучка, мм	20×42
Размеры проходного сечения, мм	42×38
Критическая длина волны, Å	0,94
Малоугловой поляризатор (стопка изогнутых зеркал)	
Число зеркал	45
Толщина подложки, мм	0,3
Расстояние между зеркалами, мм	0,6
Длина зеркала, мм	$2 \times 260 = 520$
Покрытие с двух сторон	50(FeCo/TiZr)
Размеры проходного сечения, мм	$40 \times 40,2$
Радиус кривизны, м	50
Критическая длина волны $\lambda_{\text{крит}}$, Å	1,4
Рефлектометрический анализатор (стопка сфокусированных зеркал)	
Число зеркал	94
Размеры подложки, мм	$250 \times 60 \times 0,3$
Угол наклона зеркал к радиусу-вектору, проведенному из фокуса, мрад	4,5
Сечение канала	
на входе, мм	$0,93 \times 40$
на выходе, мм	$1,0 \times 40$
Угол захвата пучка в горизонтальной плоскости, мрад	27,3
Фокусное расстояние, мм	4400
Размер проходного сечения, мм	40×120
Геометрическое пропускание	0,66
Покрытие с двух сторон	FeCoV/TiZr
Критическая длина волны, Å	1,3

На рис. 2 приведены зависимости коэффициента отражения для нейтронов «+» спиновой компоненты (рис. 2, *a, в*) и поляризационной эффективности (рис. 2, *б, г*) для зеркал, из которых изготовлен веерный анализатор и поляризатор в виде СИЗ. На рис. 2, *a, б* приведены данные для одной стороны зеркала, а на рис. 2, *в, г* — для второй стороны. Измерения выполнены при длине волны нейтронов $1,435 \text{ \AA}$. По оси абсцисс на рис. 2 отложен параметр λ/θ , являющийся «перпендикулярной» длиной волны. Прежде всего видно, что характеристики зеркал для обеих сторон практически одинаковые. Далее из рис. 2, *a, в* следует, что критическое значение перпендикулярной длины волны равно $\lambda_{\perp} = 300 \text{ \AA}$, что дает для параметра $\sigma = 1/\lambda_{\perp} = 3,3 \cdot 10^{-3}$. Из рис. 2, *б, г* видно, что, начиная с $\lambda_{\perp} = 500 \text{ \AA}$, поляризационная эффективность несколько падает. Это есть следствие соответствующего роста коэффициента отражения для «-» спиновой компоненты (это ясно, если учесть вид зависимости $R^+(\lambda)$). На рис. 3 приведена длинноволновая зависимость

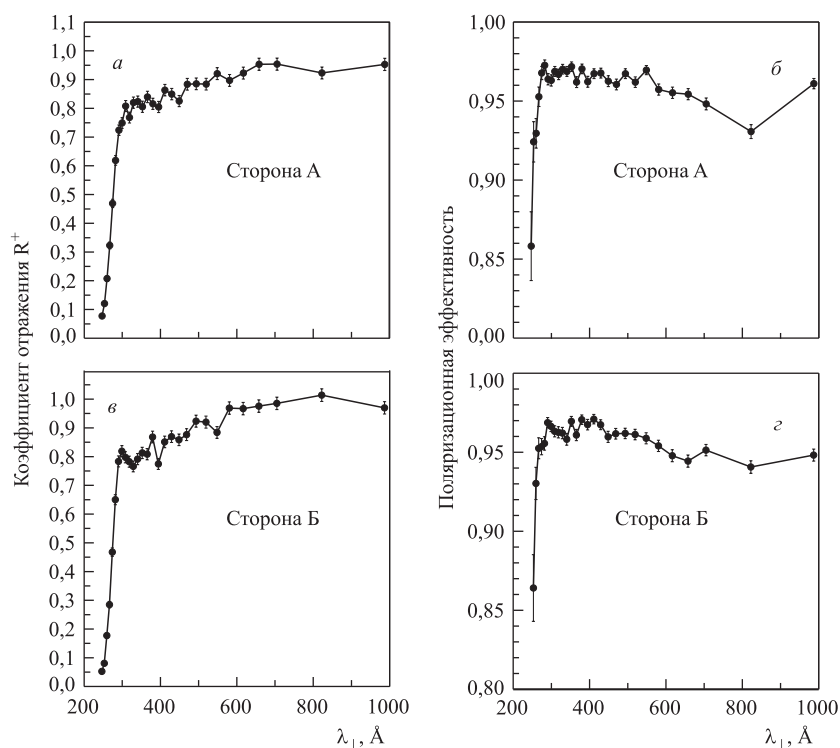


Рис. 2. Коэффициент отражения нейтронов «+» спиновой компоненты (*a, в*) и поляризационная эффективность (*б, г*) суперзеркала в зависимости от нормальной к плоскости зеркала длины волны нейтронов (измерения проведены при длине волны нейтронов $1,435 \text{ \AA}$): *a, б* — одна сторона зеркала, *в, г* — вторая

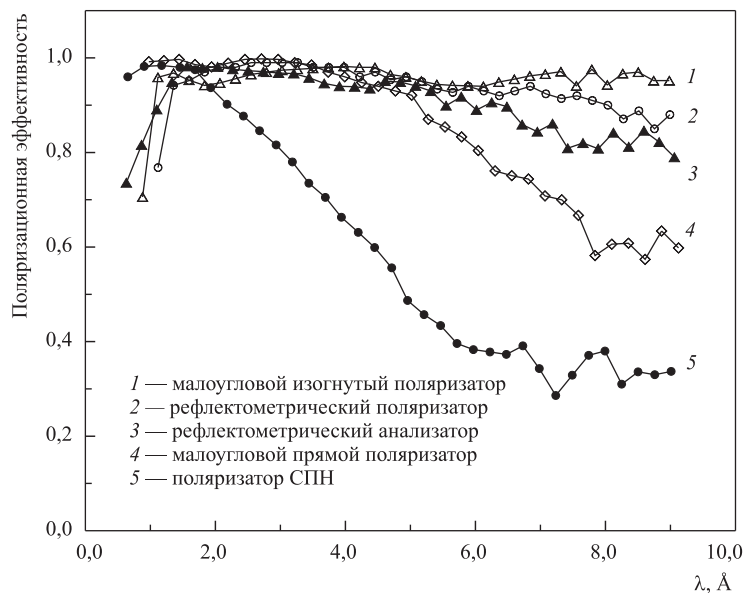


Рис. 3. Длинноволновая зависимость поляризационной эффективности: 1 — изогнутый поляризатор малоугловой моды; 2 — поляризатор рефлектометрической моды (угол скольжения 4,6 мрад); 3 — сфокусированный анализатор поляризации (угол скольжения 4,5 мрад); 4 — прямой поляризатор малоугловой моды (угол скольжения 4,6 мрад); 5 — поляризатор спектрометра СПН

поляризующей эффективности для рефлектометрического поляризатора (кривая 1), веерного анализатора (кривая 2), изогнутого поляризатора малоугловой моды (кривая 3), прямого поляризатора малоугловой моды (кривая 4). Для сравнения представлена также зависимость поляризующей эффективности поляризатора спектрометра СПН (кривая 5) [10]. Можно видеть, что для интервала длин волн $\lambda > 2 \text{ \AA}$ кривые поляризующей эффективности всех поляризаторов и анализатора поляризации спектрометра РЕМУР проходят выше поляризующей эффективности поляризатора спектрометра СПН.

На рис. 4 приведено поляризационное отношение η счета нейтронов в интервале длин волн $1,4 \div 10 \text{ \AA}$ для выключенного и включенного флишера в зависимости от угла поворота анализатора α и положения пучка нейтронов на анализаторе слева от центра (если смотреть по направлению пучка нейтронов), по центру и справа от центра. Диафрагма на месте образца имела ширину 0,5 мм, ширина пучка нейтронов на детекторе была равна 14 мм. Расстояние от диафрагмы до анализатора составляло 4,15, 4,45 и 4,95 м. Видно, что при расстоянии 4,45 м кривые, соответствующие различным положениям

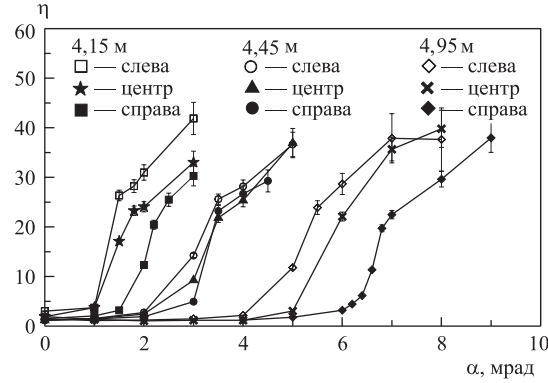


Рис. 4. Поляризационное отношение η в интервале длин волн $1,4 \div 10 \text{ \AA}$ в зависимости от угла поворота анализатора α при расстояниях от диафрагмы до анализатора 4,15, 4,45 и 4,95 м

пучка нейтронов, совпадают. Это указывает на то, что при расстоянии 4,45 м диафрагма находится в фокусе анализатора.

2.2. Спин-флипперы. В спектрометре РЕМУР используется градиентный радиочастотный спин-флиппер [19–22], в котором напряженности постоянного и переменного магнитных полей изменяются синусоидально в зависимости от координаты z вдоль направления пучка нейтронов. При этом постоянное магнитное поле изменяется по закону $H_0(z) = H_0(z_0) + A \cos(\pi z/L_{SF})$, а амплитуда переменного магнитного поля описывается выражением $H_{rf}(z) = 2A \sin(\pi z/L_{SF})$, где L_{SF} — длина флиппера, $z_0 = L_{SF}/2$ — координата центра спин-флиппера, $A = H(0) - H(z_0)$ — амплитуда модуляции. Переменное магнитное поле изменяется с частотой, равной частоте ларморовской прецессии нейтронов ω_L в магнитном поле $H(z_0)$ в центре спин-флиппера. Вероятность переворота спина нейтронов данным спин-флиппером есть [23]

$$f = \frac{k^2 + \cos^2((\pi/2)\sqrt{1+k^2})}{k^2 + 1}. \quad (1)$$

При выводе формулы (1) предполагалось, что параметр адиабатичности $k = \gamma H_e / \Omega$ является величиной постоянной. Здесь $H_e = [(H(z) - H(z_0))^2 \times (H_{rf}/2)^2]^{1/2}$ — эффективное магнитное поле, $\Omega = v(H_{rf}/2)[d(H(z) - H(z_0))/dz]/H_e^2$, v — скорость нейтронов, γ — гиромагнитное отношение нейтрона. На рис. 5 показана зависимость вероятности переворота спина нейтронов от параметра адиабатичности. Можно видеть, что некоторое заданное минимальное значение f_{\min} достигается при минимальном значении k_{\min} , соответствующем минимальной длине волны нейтронов λ_{\min} . Далее, с ро-

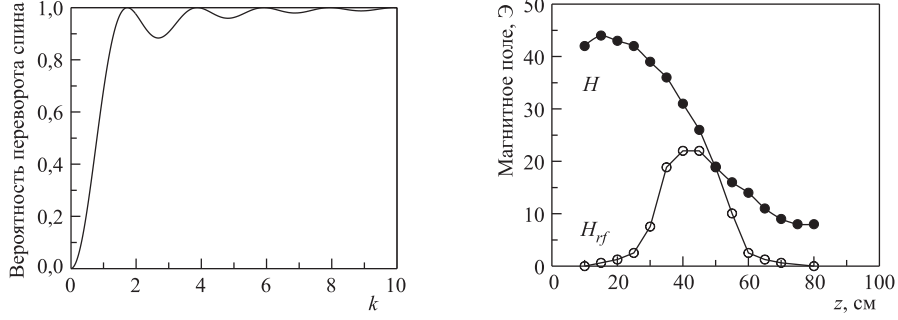


Рис. 5. Вероятность переворота спина нейтронов в зависимости от параметра адиабатичности

Рис. 6. Экспериментальное распределение магнитных полей по длине градиентного радиочастотного спин-флиппера

стом длины волны вплоть до бесконечности, значение $f(\lambda)$ растет и стремится к единице. Таким образом, полоса длин волн работы спин-флиппера с $f_{\min} < f < 1$ есть $\lambda \geq \lambda_{\min}$. Используя явный вид зависимостей $H(z)$ и $H_{rf}(z)$, получаем для k :

$$k = \gamma AL_{sf} / [\pi v \sin^2(\pi z / L_{SF})]. \quad (2)$$

Из (2) видно, что k есть функция координаты z и обратно пропорционально скорости нейтрона. Отсюда для минимального значения k получаем $k_{\min} = \gamma AL_{SF} / (\pi v_{\max})$ и для среднего по координатам значения $k_{av} = 2k_{\min} > k_{\min}$. Выражение $k_{av} = 2\gamma AL_{sf} / (\pi v)$ может быть использовано для оценки параметров спин-флиппера. Зададим значение $f_{\min}(\lambda_{\min} = 1 \text{ \AA}) \geq 0,99$, соответствующее $k_{av}(\lambda_{\min} = 1 \text{ \AA}) = 10$. При заданной длине $L_{SF} = 500$ мм получаем для $A = 7,5$ Э. Методика расчета градиентного радиочастотного спин-флиппера подробно описана в работе [20]. В спин-флипперах спектрометра РЕМУР выбрано $H(z_0) = 26$ Э, что соответствует частоте радиочастотного магнитного поля 76 кГц. Управление спин-флиппером осуществляется в ручном и автоматическом режимах через специальный блок управления флиппером (FD). Постоянный ток с источника питания подается на блок FD, который выдает сигнал частотой 76 кГц на радиочастотную катушку. Величина амплитуды переменного магнитного поля регулируется величиной постоянного тока от источника питания. Величина напряженности постоянного магнитного поля изменяется в зависимости от тока в ведущих катушках. Процесс настройки градиентного спин-флиппера более подробно описан в [22]. Из рис. 6 можно видеть, что реальное распределение магнитных полей по длине градиентного спин-флиппера близко к синусоидальному. Величина ведущего магнитного поля вне области спин-флиппера составляет около 10 Э.

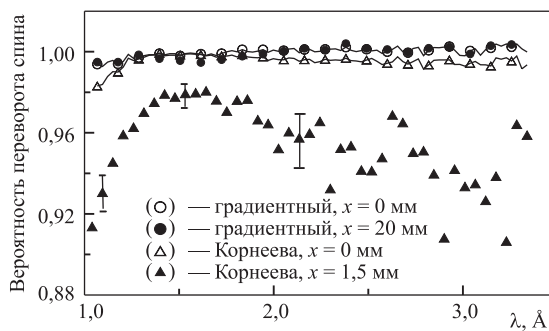


Рис. 7. Длинноволновая зависимость вероятности переворота поляризации при различном положении пучка x относительно центра спин-флиппера: (○) — градиентный спин-флиппер, $x = 0$; (●) — градиентный спин-флиппер, $x = 20$ мм; (△) — спин-флиппер Корнеева, $x = 0$; (▲) — спин-флиппер Корнеева, $x = 1,5$ мм

К преимуществам градиентного радиочастотного спин-флиппера относятся:

- 1) неколлимированный (расходимость до 0,1 рад) пучок нейтронов большого сечения ($\sim 100 \text{ см}^2$);
- 2) отсутствие жестких требований к стабильности и однородности напряженности магнитного поля и стабильности частоты переменного магнитного поля;
- 3) отсутствие вещества на пути нейтронного пучка.

На рис. 7 приведена длинноволновая зависимость вероятности переворота поляризации для градиентного радиочастотного спин-флиппера и спин-флиппера Корнеева [8, 9], измеренная с нейтронным пучком шириной 1,5 мм и высотой 30 мм. Кривые 1 и 2 относятся к градиентному радиочастотному спин-флипперу с положением пучка по центру и на расстоянии 20 мм от центра флиппера соответственно. Кривые 3 и 4 относятся к спин-флипперу

Таблица 2. Параметры градиентных радиочастотных спин-флипперов

Параметры	Первый флиппер	Второй флиппер
Внутренний диаметр вакуумной трубы, мм	150	100
Габариты: длина × ширина × высота, мм	800 × 360 × 520	800 × 320 × 530
Катушка постоянного магнитного поля:		
Диаметр медного провода, мм	1	1
Сопротивление катушки, Ом	32,3	23,4
Величина тока в катушке, А	1,8	2,2
РЧ-катушка:		
Длина катушки вдоль пучка, мм	300	300
Частота переменного магнитного поля, кГц	76,4	73,4
Постоянный ток источника питания, А	1,5	1,3
Потребляемое напряжение источника питания, В	22	14

Корнеева с положением пучка по центру и на расстоянии 1,5 мм от его центра соответственно. Хорошо видно, что вероятность переворота изменяется значительно для спин-флиппера Корнеева даже при небольшом смещении пучка. И наоборот, она практически не изменяется для градиентного спин-флиппера при значительном смещении пучка нейтронов. В табл. 2 приведены параметры установленных на РЕМУР спин-флипперов.

2.3. Детекторы нейтронов. Ниже рассмотрим следующие детекторы нейтронов: детектор рефлектометрической измерительной моды и детектор малоугловой измерительной моды.

2.3.1. Детектор рефлектометрической измерительной моды. Регистрация нейтронов в рефлектометрическом режиме работы спектрометра РЕМУР осуществляется газонаполненным однокоординатным позиционно-чувствительным детектором (PSD) [15]. Применение PSD вместо использовавшегося до этого газонаполненного счетчика нейтронов позволило значительно упростить процесс юстировки образца, сократить в десятки раз время набора статистики при исследовании диффузно рассеивающего нейтроны образца, выполнять мониторинг интенсивности нейтронов путем одновременного измерения прямого и рассеянного пучков, измерять при отсутствии диффузного рассеяния интенсивность зеркальных пучков и фон одновременно.

PSD представляет собой пропорциональную многопроволочную камеру, помещенную в герметичный бокс из дюралюминия с входным окном сечением 120×40 мм. Внутренние размеры бокса составляют $200 \times 100 \times 48$ мм. Регистрация нейтронов основана на реакции захвата нейтронов ядрами ^3He и вылета вторичных продуктов распада протонов и ядер трития: $^3\text{He}(n, p)^3\text{H} + 764$ кэВ. Толщина газового слоя составляет 24 мм при давлении ^3He , равном 3,4 атм. Для улучшения пространственного разрешения в объем газа детектора добавляется пропан при парциальном давлении 2 атм. Пространственное разрешение детектора составляет $1,5 \div 2,5$ мм (FWHM). Наилучшее разрешение порядка 1,5 мм достигается в центре детектора. Ширина позиционного канала детектора составляет 0,69 мм, а число позиционных каналов равно 256. Длительность временного канала составляет 128 мкс, а их число равно 2048. Мертвое время детектора составляет 37 нс. Параметры детектора представлены в табл. 3.

Для определения эффективности регистрации нейтронов детектором PSD была использована схема, в которой кроме собственно PSD дополнительно был использован монодетектор (гелиевый счетчик СММ-17, ширина временного канала равна 64 мкс, число каналов 2048), размещенный непосредственно перед PSD. При этом были измерены три интенсивности счета: J_p — интенсивность счета PSD без монодетектора перед ним, J_m — интенсивность счета монодетектора и J_{pm} — интенсивность счета PSD, когда перед ним установлен монодетектор. Для данных величин можно записать соотношения:

Таблица 3. Параметры PSD

Газовая смесь	${}^3\text{He}(3,4 \text{ атм}) + \text{C}_3\text{H}_8(2 \text{ атм})$
Размеры чувствительного объема, мм	$120 \times 40 \times 24$
Размеры входного окна, мм	120×40
Материал входного окна	Al (сплав Д16Т)
Пространственное разрешение (FWHM)	
в центре, мм	1,5
по краям, мм	2,5
Эффективность регистрации для $\lambda = 2 \text{ \AA}$, %	70

$$J_m = J_0 A_m \varepsilon_m, \quad J_p = J_0 A_p \varepsilon_p, \quad J_{pm} = J_0 A_p \varepsilon_p A_m^2 (1 - \varepsilon_m),$$

где J_0 — интенсивность пучка нейтронов перед детекторами; $A_m = \exp(-b_m \lambda)$ — коэффициент пропускания нейтронов стенкой монодетектора; $A_p = \exp(-b_p \lambda)$ — коэффициент пропускания нейтронов входным окном PSD; $\varepsilon_m = 1 - \exp(-c_m \lambda)$ и ε_p — эффективность регистрации нейтронов монодетектором и PSD соответственно; λ — длина волны нейтрона. При записи явного вида эффективности регистрации нейтронов монодетектором предполагается, что эффективность регистрации определяется только поглощением нейтронов в газе (эффективность считывания импульсов электроникой считается равной единице). Для ε_m , ε_p и J_0 имеем соотношения

$$\varepsilon_m = 1 - \frac{J_{pm}}{J_p A_m^2}, \quad \varepsilon_p = \frac{J_p A_m^2 - J_{pm}}{A_p A_m J_m}, \quad J_0 = \frac{A_m J_m J_p}{J_p A_m^2 - J_{pm}}.$$

При расчетах ε_m , ε_p и J_0 были использованы значения $b_m = 3,55 \cdot 10^{-3} \text{ \AA}^{-1}$ (стенка монодетектора из латуни толщиной 0,2 мм) и $b_p = 3,09 \cdot 10^{-3} \text{ \AA}^{-1}$ (окно PSD из алюминия толщиной 4 мм). На рис. 8 приведены зависимости J_0 , ε_p , ε_m от длины волны нейтронов. Видно, что эффективности де-

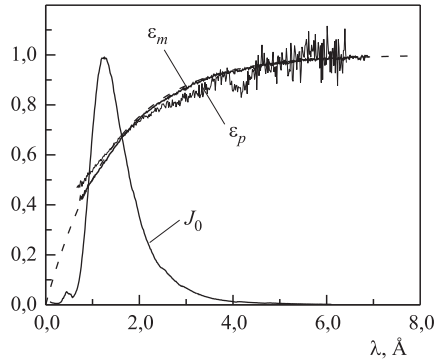


Рис. 8. Эффективность регистрации нейтронов PSD (ε_p) и монодетектором (ε_m), здесь пунктирная линия — расчетная зависимость коэффициента поглощения нейтронов в монодетекторе атомами ${}^3\text{He}$, J_0 — расчетная зависимость интенсивности нейтронного потока перед детекторами

текторов незначительно отличаются друг от друга и в области $1 \div 2 \text{ \AA}$ составляют $50 \div 70 \%$. Пунктирной линией показан расчет скорости счета нейтронов благодаря поглощению нейтронов в газе с коэффициентом поглощения $c_m = 0,7 \text{ \AA}^{-1}$. Можно видеть хорошее согласие эксперимента с расчетом.

Особенно важным параметром детектора при регистрации интенсивного потока нейтронов на импульсном реакторе является его быстродействие. Оценка быстродействия детектора была выполнена в измерениях зависимости интенсивности счета от сечения пучка нейтронов, устанавливаемого с помощью кадмиевой диафрагмы. На рис. 9 показана зависимость интенсивности счета нейтронов от высоты диафрагмы (ее ширина была 1 мм) для случаев регистрации в одном временном канале (рис. 9, а) и в интервале $0,6 \div 8,8 \text{ \AA}$ (рис. 9, б). Из этих данных можно оценить максимальную интенсивность, которая имеет место при высоте диафрагмы 1,7 мм. Она равна $2,7 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$, что дает для мертвого времени детектора значение 37 нс.

2.3.2. *Детектор малоугловой измерительной моды.* Для проведения экспериментов по малоугловому рассеянию нейтронов на спектрометре РЕМУР используется 32-счетчиковый детектор. Он состоит из цилиндрических счетчиков четырех типоразмеров. При этом восемь счетчиков одного размера размещены на окружности определенного радиуса через 45° один от другого. Так, счетчики диаметром 12, 18, 32 и 50 мм и длиной чувствительной области 50, 50, 95 и 110 мм, размещенные на окружностях радиусами 75, 120, 190 и 300 мм соответственно. Далее, счетчики по 16 штук размещены на двух держателях, которые относительно друг друга повернуты на 45° , а по глубине в направлении пучка нейтронов отстоят на 50 мм. На рис. 10 представлен вид детектора спереди (а), сбоку (б) и вид окон с их размерами (в). Окна сделаны из листового кадмия и определяют сечения пучков на счетчиках.

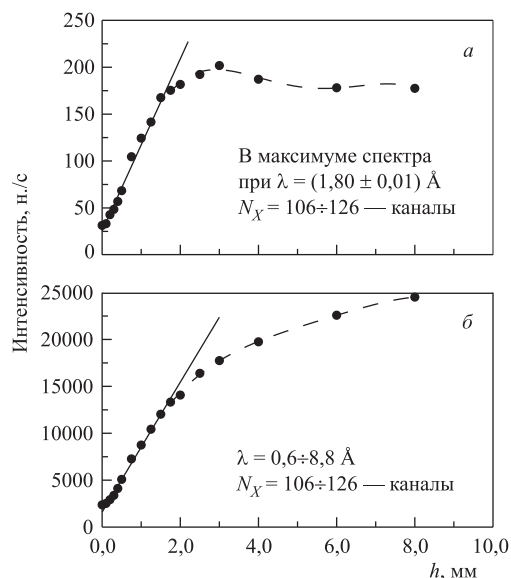


Рис. 9. Зависимость интенсивности счета нейтронов от высоты диафрагмы на детекторе (ее ширина 1 мм): а) в максимуме спектра при длине волны $1,8 \text{ \AA}$ и регистрации в одном временном канале; б) для интервала длин волн $0,6 \div 8,8 \text{ \AA}$

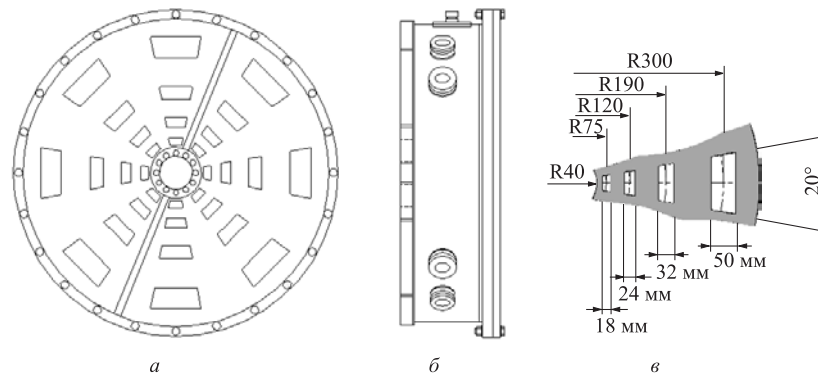


Рис. 10. Детектор малоугловой моды: а) вид спереди; б) вид сбоку; в) вид окон для счетчиков

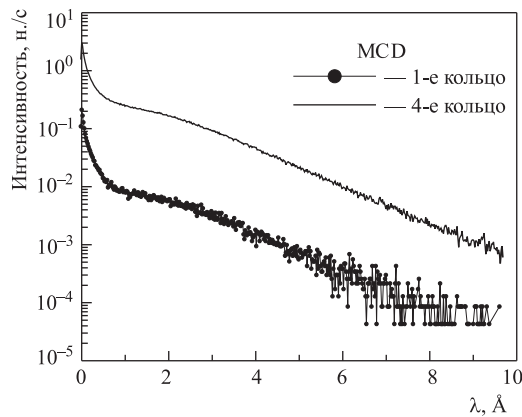


Рис. 11. Фоновая интенсивность счета для счетчиков первого и четвертого колец детектора малоугловой моды

ного 38,3. Детектор может быть размещен от образца на расстоянии $1,5 \div 7,5$ м. Таким образом, в интервале длин волн нейтронов $\lambda = 1,5 \div 10$ Å детектором перекрывается диапазон значений переданного волнового вектора, равный $Q = 6 \cdot 10^{-3} \div 0,7$ Å⁻¹.

2.4. Аппаратура окружения образца. Исследуемый образец помещается в держателе образца, устанавливаемом в центре гониометра. Гониометр имеет три оси вращения с шагом поворота $0,01^\circ$, с помощью которых осуществляются следующие операции: 1) поворот электромагнита на угол $\pm 90^\circ$ вокруг

На рис. 11 представлена зависимость фоновой интенсивности счета от номера временного канала для счетчиков первого кольца (диаметр окружности 150 мм) и счетчиков четвертого кольца (диаметр окружности 600 мм). Из представленных данных видно, что фоновая скорость счета для счетчиков четвертого кольца примерно в 40 раз больше, чем для счетчиков первого кольца. Это, как и ожидалось, близко к значению отношения чувствительных объемов счетчиков четвертого и первого колец, равного

оси пучка нейтронов; 2) поворот образца с электромагнитом вокруг вертикальной оси на угол $\pm 20^\circ$; 3) поворот электромагнита на угол $\pm 15^\circ$ вокруг горизонтальной оси, перпендикулярной пучку нейтронов. Гониометр также перемещается от ручного привода в направлениях вдоль и перпендикулярно пучку нейтронов в пределах ± 100 мм.

Магнитное поле на образце при комнатной температуре создается с помощью электромагнита, имеющего набор сменных полюсов сечением 40×20 мм, 60×40 мм и 110×70 мм. Магнитное поле в плоскости, перпендикулярной пучку, может быть выбрано направленным в диапазоне от вертикального направления до горизонтального. Зазор между полюсами может быть установлен в диапазоне $15 \div 70$ мм. Максимальное значение напряженности магнитного поля при зазоре между полюсами 15 мм для полюсов сечением 40×20 мм составляет 20 кЭ, а для полюсов сечением 110×70 мм — 10 кЭ.

Для экспериментов при низких температурах используется криостат, имеющий на пути пучка нейтронов кварцевые окна диаметром 22 мм. Криостат поддерживает температуру образца (размер образца до 40×40 мм) в пределах $1,4 \div 600$ К с точностью 0,01 К. Он снабжен криомагнитом с максимальной напряженностью вертикально направленного магнитного поля 30 кЭ. Точность установки магнитного поля составляет $\pm 0,3$ Э для диапазона $0 \div 3,4$ кЭ и ± 30 Э для диапазона $3,4 \div 30$ кЭ.

3. ПАРАМЕТРЫ НЕЙТРОННОГО ПУЧКА

На рис. 12, *a–в* показаны длинноволновые зависимости интенсивности счета тепловых нейтронов и фонового счета (пучок нейтронов перекрыт пластиной из листового кадмия толщиной 1,5 мм) для трех различных вариантов поляризационной аппаратуры: а) прямой поляризатор малоугловой моды, детектор в позиции 29 м от замедлителя, сечение пучка $0,021$ см²; б) рефлектометрический поляризатор с веерным анализатором, детектор в позиции 29 м от замедлителя, сечение пучка $1,4$ см²; в) изогнутый поляризатор с веерным анализатором, детектор в позиции 34 м от замедлителя, сечение пучка $0,035$ см². На основании измеренной интенсивности счета проведены расчеты потока нейтронов в позиции установки образца. Данные измерений и расчетов представлены в табл. 4. При этом учитывалось, что интегральная эффективность детектора составляет 70 %, а пропускание веерного анализатора равно 0,6. Во второй колонке табл. 4 приведен телесный угол, под которым виден выход поляризатора со стороны детектора нейтронов. В третьей колонке приведена интегральная по длине волны скорость счета нейтронов детектором при номинальной мощности реактора 1,5 МВт. В четвертой колонке таблицы приведено расчетное значение потока нейтронов в позиции образца на расстоянии 29 м от замедлителя при мощности реактора 2 МВт.

Данные этой колонки важны для их сравнения со значением 2×10^5 н./с/см² этого параметра на спектрометре СПН, когда реактор работал на мощности 2 МВт. Наконец, в пятой колонке приведено расчетное значение плотности потока поляризованных нейтронов в единице телесного угла. Эти значения интересно сравнить с максимально возможным значением плотности потока неполяризованных нейтронов 7×10^{11} н./с · см² · ср) в водяном замедлителе и значением $1,2 \times 10^{10}$ н./с · см² · ср) этого параметра для спектрометра СПН. Видно, что потери нейтронов минимальны для случая прямого малоуглового поляризатора и составляют фактор 0,7.

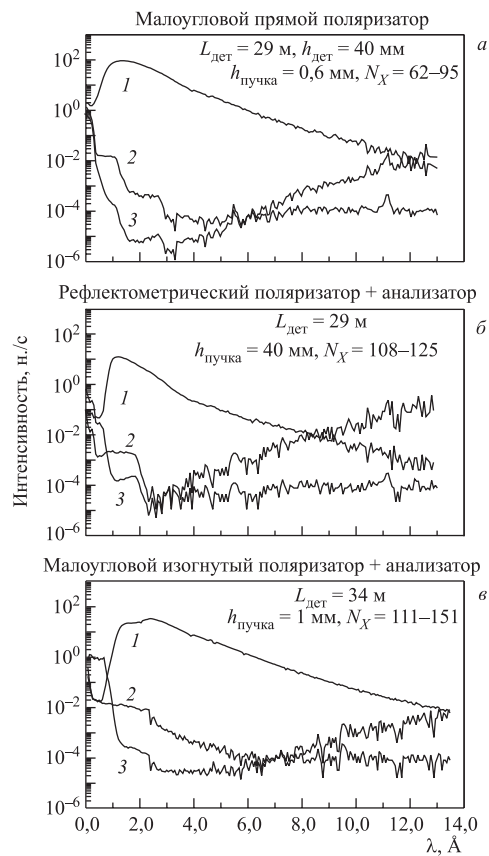


Рис. 12. Интенсивность счета тепловых нейтронов (кривая 1), надкадмиевых нейтронов (кривая 2) и их отношение (кривая 3): а) прямой поляризатор малоугловой моды; б) поляризатор рефлектометрической моды с аттенюатором интенсивности в 100 раз и веерным анализатором поляризации; в) изогнутый поляризатор малоугловой моды с веерным анализатором поляризации

Таблица 4. Поток нейтронов на спектрометре РЕМУР

Аппаратура	Ω_{pol}, cp	$\int_{det}^{1,5MW} N(\lambda)d\lambda,$ н./с · см ²	$\int_{sample}^{2MW} I(\lambda)d\lambda,$ н./с · см ²	$\frac{\int_{sample}^{2MW} I(\lambda)d\lambda}{\Omega},$ н./с · см ² · ср)
1	2	3	4	5
Рефлектометрический поляризатор + веерный анализатор поляризации	$2,0 \cdot 10^{-6}$	$3,6 \cdot 10^4$	$1,6 \cdot 10^5$	$8,0 \cdot 10^{10}$
Изогнутый малоугловой поляризатор + веерный анализатор поляризации	$0,7 \cdot 10^{-6}$	$7,6 \cdot 10^3$	$6,8 \cdot 10^4$	$1,0 \cdot 10^{11}$
Прямой малоугловой поляризатор	$1,7 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^5$	$4,0 \cdot 10^5$	$2,4 \cdot 10^{11}$

4. АВТОМАТИЗАЦИЯ РАБОТЫ СПЕКТРОМЕТРА

4.1. Система управления исполнительными механизмами. Система управления исполнительными механизмами малоуглового спектрометра РЕМУР ориентирована на управление исполнительными механизмами, использующими в качестве привода шаговые двигатели. Диапазон перемещения исполнительного механизма ограничен концевиками и имеет для контроля наиболее часто используемых положений две контрольные точки. Система управления исполнительными механизмами построена на базе контроллера шаговых двигателей ВСМ в стандарте VME и имеет следующие характеристики: 1) поочередное управление 1–32 шаговыми двигателями; 2) тип управления: определенное количество шагов в заданном направлении; 3) перемещение ограничено двумя концевиками; 4) возможен контроль до двух контрольных точек на всем диапазоне перемещения; 5) частота шагов (от 1 Гц) задается программно, возможно изменение частоты шагов в процессе движения.

В качестве привода шаговых двигателей в системе управления используются коммутаторы-усилители шаговых двигателей SMD-B2A, обладающие следующими особенностями: 1) поочередное управление четырьмя двигателями; 2) количество обмоток двигателя 2, 4; 3) тип включения униполярный и биполярный; 4) ток в обмотках двигателя 2/4 А; 5) коммутатор мультиплексирует концевики и контрольные точки выбранного исполнительного механизма; 6) коммутатор выполнен в конструктиве КАМАК.

Блок контроля физической установки ВCFU обеспечивает слежение за состоянием шибера и фазой прерывателя пучка нейтронов.

Пульт ручного управления выполняет управление исполнительными механизмами непосредственно на месте их расположения, при этом осуществляет 1) выбор номера $N = 1 \div 32$ исполнительного механизма; 2) индикацию концевиков и контрольных точек; 3) задание частоты управляющего сигнала шаговых двигателей в пределах от 1 Гц до 1 кГц.

Необходимое напряжение для шаговых двигателей обеспечивается источником питания PSU 32/10A.

Тест-блок системы управления обеспечивает выполнение следующих вспомогательных функций:

- формирование сигналов старта, монитора и шибера;
- индикацию наличия стартов, счета нейтронов монитором и состояния шибера;
- фильтрацию сигнала шибера;

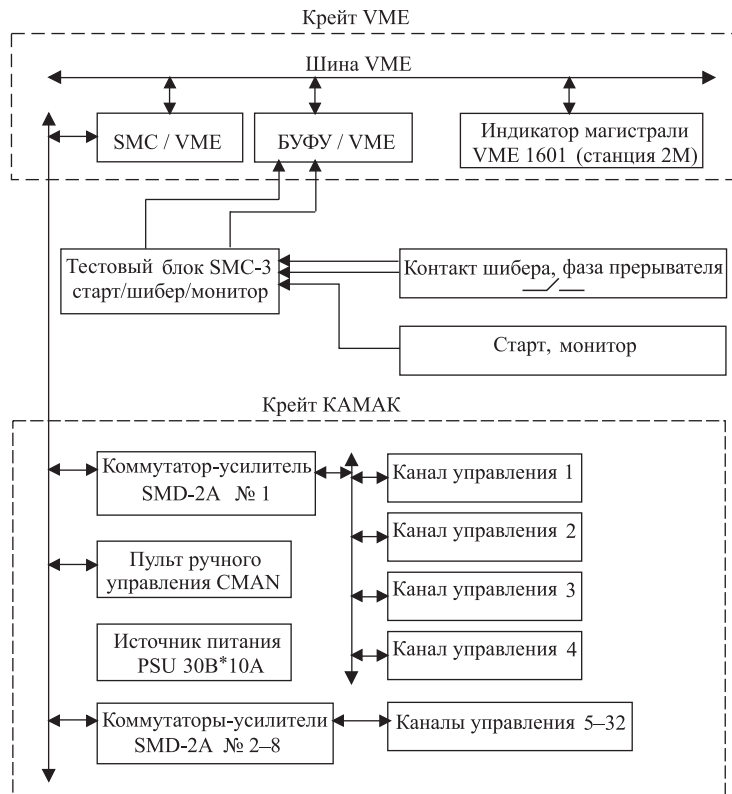


Рис. 13. Структурная схема системы управления исполнительными механизмами спектрометра РЕМУР

- размножение этих сигналов;
- тестовый режим формирования сигналов.

Система управления исполнительными механизмами спектрометра включает следующие исполнительные механизмы: 1) диафрагмы 1, 2, 3; 2) платформы 1, 2, 3; 3) поляризаторы нейтронов; 4) кадмиевую шторку; 5) гониометр; 6) анализатор поляризации и т. д.

На рис. 13 показана структурная схема системы управления исполнительными механизмами спектрометра РЕМУР.

4.2. Система сбора и накопления данных. Аппаратура накопления экспериментальных данных от детекторов PSD и MCD, питания и управления детекторами выполнена в крейтах КАМАК и VME (рис. 1).

Накопительно-измерительная схема PSD [15] имеет 256 позиционных и 2048 временных каналов. Длительность временного канала составляет 128 мкс.

Отдельный измерительный канал MCD имеет следующие характеристики: число временных каналов 2048, ширина временного канала 64 мкс, длина слова данных 24 разряда. Сигнал от отдельного счетчика MCD через усилитель и блок кодировщика номера детектора CNE в крейте КАМАК поступает прямо на вход процессорного блока DSP крейта VME, где производится его обработка и последующая запись результатов в блок гистограммной памяти НМ-32. По окончании цикла измерений данные считываются из гистограммной памяти и по каналу обмена передаются на персональный компьютер для их последующей визуализации и обработки.

Для обеспечения набора и первичной визуализации спектров, получаемых в эксперименте, применяется комплекс программ на базе пакета SONIX. Комплекс программного обеспечения состоит из программ TOFA и VSP, отвечающих за работу системы накопления, управления и контроля состояния спектрометра. Прием, обработка спектрометрических данных и передача их в гистограммную память НМ-32 осуществляется программно-аппаратным комплексом на базе сигнального процессора DSP в стандарте VME. Основным назначением программы TOFA является задание параметров и времени набора экспериментальных данных с последующей их передачей на жесткий диск VME-системы. Программа VSP является сервисной и позволяет проводить экспресс-визуализацию получаемых данных, считывая ее напрямую из гистограммной памяти. Эта программа имеет ряд других возможностей, позволяющих оценивать получаемые данные в процессе измерений. Для первичной обработки полученных экспериментальных данных используется программа, основанная на языке программирования OPEN-G2, которая позволяет осуществить представление счета детектора в зависимости от номера временного канала n_t и номера счетчика n_c , длины волны и переданного волнового числа: $I(n_t, n_c)$, $I(\lambda)$, $I(Q)$. Программа производит суммирование счетов счетчиков, расположенных на каком-либо из четырех колец; выполняет вычитание фонового счета; нормирует на какой-либо счет, например от стандартного

рассеивателя; при использовании данных рассеяния поляризованного пучка нейтронов выполняет расчет макроскопических сечений рассеяния $\Sigma^+(q)$ и $\Sigma^-(q)$ для «+» и «-» спиновых состояний.

4.3. Программное обеспечение работы спектрометра. Программное обеспечение управления экспериментом базируется на комплексе SONIX [24] с добавлением программ, специфичных для спектрометра. В состав комплекса SONIX входят модули управления накоплением и записью нейтронных спектров, контроля интенсивности пучка и других условий эксперимента (наличие и частота стартов реактора, фазировка прерывателя, открытие шибера пучка и т. д.), управления подвижными частями спектрометра и терморегулятором EUROTERM. Специально для спектрометра были разработаны и включены в состав комплекса:

- модуль управления источниками тока,
- модуль изменения положения физических осей,
- программа экспресс-визуализации экспериментальных данных,
- программа юстировки.

Для изменения положения физических осей в соответствии с заданием на эксперимент предназначен специальный модуль, в котором по заданному углу скольжения или координате точки прицеливания (позиция образца) рассчитываются значения смещений юстировочных платформ.

Программа экспресс-визуализации может использоваться для оценки качества экспериментальных данных. Эта программа позволяет изменять масштабы по всем осям (по умолчанию выбор масштабов автоматический), выбирать вид визуализации счета нейтронов (3-мерная поверхность, линии уровня, цветная карта), вращать 3-мерный график, задавать область суммирования, сохранять изображение в формате JPG и выводить его на печать. Максимальное количество одновременно отображаемых спектров счета нейтронов четыре.

Для экспериментального определения оптимальных состояний установки предназначена программа юстировки [25]. В ней реализованы возможность управления оборудованием, контроль процесса измерений, эффективный доступ к накопленной информации, экспресс-обработка спектров, визуализация спектров, а также ряд сервисных функций.

Для управления экспериментом в автоматическом режиме на специализированном языке составляется задание (скрипт). Для упрощения этого процесса разработан редактор скрипта, адаптированный для спектрометра. Пользователь, работая на персональном компьютере, последовательно заполняет поля на страницах формы, а в конце выдает команду на формирование файла задания. Предусмотрена также возможность автоматической пересылки готовой программы на VME-компьютер и загрузки готового скрипта для просмотра и редактирования.

Программа OpenG2 [26, 27], предназначенная для визуализации и экспресс-анализа спектров, измеренных на спектрометрах реактора ИБР-2, до-

полнена модулем `oreng2_spn2`, обеспечивающим специальные функции для работы с данными, измеренными на спектрометре РЕМУР в малоугловом и рефлектометрическом режимах работы. Пользовательский интерфейс программы для работы с малоугловыми данными предоставляет возможность быстрого выбора различных функций и вариантов группирования данных, в том числе позволяет одним нажатием мыши выбрать любую группу из 32 точечных детекторов рассеяния, например расположенных вдоль одного радиуса или на одном кольце. Из полученных обработанных спектров по требованию пользователя могут быть сформированы рабочие окна (workspaces) для дальнейшей интерактивной обработки стандартными функциями программы `OpenG2` или сохранения их в файлах.

Комплекс `SONIX` в основном реализован на VME-компьютере в среде операционной системы `OS-9`. Программы для юстировки установки и экспресс-визуализации работают на персональном компьютере в среде `MS Windows`, а программа предварительной обработки результатов измерений работает на рабочей станции `SUN` в операционной среде «Solaris».

5. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ НЕЙТРОНОВ

5.1. Случай магнитно-неколлинеарной структуры. Если вектор намагниченности в исследуемом образце неколлинеарен вектору напряженности магнитного поля на образце, то коэффициент отражения нейтронов является матрицей 2×2 , элементы R^{ij} которой есть коэффициент отражения нейтронов из начального спинового состояния i в конечное состояние j . В соответствии с нашими предыдущими обозначениями состояния i и j — состояния «+» или «-». Интенсивность счета нейтронов детектором может быть представлена в виде

$$I^{\nu\varphi} = I_0 \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 + P_a & 0 \\ 0 & 1 - P_a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 - f_2 & f_2 \\ f_2 & 1 - f_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R^{++} & R^{-+} \\ R^{+-} & R^{--} \end{pmatrix} \times \\ \times \begin{pmatrix} 1 - f_1 & f_1 \\ f_1 & 1 - f_1 \end{pmatrix} \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 + P_p & 0 \\ 0 & 1 - P_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где $I_0 = \frac{1}{2} I'_0 t_a t_p \varepsilon$, I'_0 — интенсивность пучка нейтронов на входе поляризатора; ε — эффективность детектора; $t_p = (t_p^+ + t_p^-)/2$, $t_a = (t_a^+ + t_a^-)/2$, $P_p = (t_p^+/t_p^- - 1)/(t_p^+/t_p^- + 1)$, $P_a = (t_a^+/t_a^- - 1)/(t_a^+/t_a^- + 1)$, t_p^+ , t_p^- и t_a^+ , t_a^- — коэффициенты пропускания поляризатора и анализатора соответственно; f_1 и f_2 — вероятность переворота поляризации для первого и второго спин-флиппера соответственно; ν и φ обозначают состояния «on» или «off» для

первого и второго флиппера соответственно. Введя обозначения $F_1 = 2f_1 - 1$ и $F_2 = 2f_2 - 1$, перепишем (3) для отдельного элемента матрицы $I^{\nu\varphi}$:

$$I^{\text{off,off}} = I_0[R^{++}(1 + P_p)(1 + P_a) + R^{--}(1 - P_p)(1 - P_a) + R^{+-}(1 + P_p)(1 - P_a) + R^{-+}(1 - P_p)(1 + P_a)]/4,$$

$$I^{\text{on,on}} = I_0[R^{++}(1 - F_1P_p)(1 - F_2P_a) + R^{--}(1 + F_1P_p)(1 + F_2P_a) + R^{+-}(1 - F_1P_p)(1 + F_2P_a) + R^{-+}(1 + F_1P_p)(1 - F_2P_a)]/4,$$

$$I^{\text{off,on}} = I_0[R^{++}(1 + P_p)(1 - F_2P_a) + R^{--}(1 - P_p)(1 + F_2P_a) + R^{+-}(1 + P_p)(1 + F_2P_a) + R^{-+}(1 - P_p)(1 - F_2P_a)]/4,$$

$$I^{\text{on,off}} = I_0[R^{++}(1 - F_1P_p)(1 + P_a) + R^{--}(1 + F_1P_p)(1 - P_a) + R^{+-}(1 - F_1P_p)(1 - P_a) + R^{-+}(1 + F_1P_p)(1 + P_a)]/4. \quad (4)$$

Из системы уравнений (4) определим коэффициент отражения нейтронов:

$$R^{++} = \frac{1}{4I_0f_1f_2P_pP_a} [I^{\text{off,off}}(F_1P_p + 1)(F_2P_a + 1) + I^{\text{on,on}}(P_p - 1)(P_a - 1) + I^{\text{off,on}}(F_1P_p + 1)(P_a - 1) + I^{\text{on,off}}(P_p - 1)(F_2P_a + 1)],$$

$$R^{--} = \frac{1}{4I_0f_1f_2P_pP_a} [I^{\text{off,off}}(F_1P_p - 1)(F_2P_a - 1) + I^{\text{on,on}}(P_p + 1)(P_a + 1) + I^{\text{off,on}}(F_1P_p - 1)(P_a + 1) + I^{\text{on,off}}(P_p + 1)(F_2P_a - 1)],$$

$$R^{+-} = \frac{1}{4I_0f_1f_2P_pP_a} [I^{\text{off,off}}(F_1P_p + 1)(F_2P_a - 1) + I^{\text{on,on}}(P_p - 1)(P_a + 1) + I^{\text{off,on}}(F_1P_p + 1)(P_a + 1) + I^{\text{on,off}}(P_p - 1)(F_2P_a - 1)],$$

$$R^{-+} = \frac{1}{4I_0f_1f_2P_pP_a} [I^{\text{off,off}}(F_1P_p - 1)(F_2P_a + 1) + I^{\text{on,on}}(P_p + 1)(P_a - 1) + I^{\text{off,on}}(F_1P_p - 1)(P_a - 1) + I^{\text{on,off}}(P_p + 1)(F_2P_a + 1)]. \quad (5)$$

Из (5) видно, что кроме интенсивностей счета $I^{\text{off,off}}$, $I^{\text{off,on}}$, $I^{\text{on,off}}$, $I^{\text{on,on}}$ необходимо также знать значения параметров I_0 , f_1 , f_2 , P_p , P_a , характеризующих собственно спектрометр. Определение параметров спектрометра

(калибровка спектрометра) выполняется по методу 3P2S (3 поляризатора и 2 спин-флиппера) [28–30], сущность которого состоит в том, что проводят по четыре измерения интенсивности счета без образца $I_e^{\text{off,off}}$, $I_e^{\text{off,on}}$, $I_e^{\text{on,off}}$ и $I_e^{\text{on,on}}$ и с образцом-калибратором $I_c^{\text{off,off}}$, $I_c^{\text{off,on}}$, $I_c^{\text{on,off}}$ и $I_c^{\text{on,on}}$. Измерения без образца эффективно соответствуют случаю $R^{++} = R^{--} = 1$ и $R^{+-} = R^{-+} = 0$. В результате этих измерений определяют параметры I_0 , f_1 , f_2 и $P_p P_a$:

$$\begin{aligned}
I_0 &= \frac{2(I_e^{\text{off,off}} I_e^{\text{on,on}} - I_e^{\text{off,on}} I_e^{\text{on,off}})}{I_e^{\text{off,off}} + I_e^{\text{on,on}} - I_e^{\text{off,on}} - I_e^{\text{on,off}}}, \\
P_p P_a &= \frac{(I_e^{\text{off,off}} - I_e^{\text{off,on}})(I_e^{\text{off,off}} - I_e^{\text{on,off}})}{I_e^{\text{off,off}} I_e^{\text{on,on}} - I_e^{\text{off,on}} I_e^{\text{on,off}}}, \\
f_1 &= \frac{1}{2} \left(1 + \frac{I_e^{\text{on,on}} - I_e^{\text{on,off}}}{I_e^{\text{off,off}} - I_e^{\text{off,on}}} \right), \quad f_2 = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{I_e^{\text{on,on}} - I_e^{\text{off,on}}}{I_e^{\text{off,off}} - I_e^{\text{on,off}}} \right).
\end{aligned} \tag{6}$$

В качестве калибратора выбирают образец, для которого выполняются соотношения $R_c^{+-} = R_c^{-+} = 0$ и $R_c^{++} \neq R_c^{--}$. В результате измерений с калибратором отдельно определяются P_p и P_a и коэффициенты отражения калибратора R_c^{++} и R_c^{--} :

$$\begin{aligned}
P_p &= \sqrt{\frac{C_1 C_2}{C_3 C_4}}, \quad P_a = \sqrt{\frac{C_1 C_4}{C_3 C_2}}, \\
R_c^{++} &= C_5 \left\{ 1 + \sqrt{\frac{C_2 C_4}{C_3 C_1}} \right\}, \quad R_c^{--} = C_5 \left\{ 1 - \sqrt{\frac{C_2 C_4}{C_3 C_1}} \right\},
\end{aligned} \tag{7}$$

где $C_1 = I_c^{\text{off,off}} + I_c^{\text{on,on}} - I_c^{\text{off,on}} - I_c^{\text{on,off}}$, $C_2 = F_2(I_c^{\text{off,off}} - I_c^{\text{on,off}}) - I_c^{\text{on,on}} + I_c^{\text{off,on}}$, $C_3 = F_1 F_2 I_c^{\text{off,off}} + I_c^{\text{on,on}} + F_1 I_c^{\text{off,on}} + F_2 I_c^{\text{on,off}}$, $C_4 = F_1(I_c^{\text{off,off}} - I_c^{\text{off,on}}) - I_c^{\text{on,on}} + I_c^{\text{on,off}}$, $C_5 = \frac{C_3}{2I_0 f_1 f_2}$.

5.2. Случай магнитно-коллинеарной структуры. При отражении нейтронов от магнитно-коллинеарной структуры нет процесса перехода нейтронов из одного спинового состояния в другое. В связи с этим отличны от нуля только коэффициенты отражения $R^{++} = R^+$ и $R^{--} = R^-$, где R^+ и R^- — коэффициенты отражения нейтронов с начальным спиновым состоянием «+» и «-» соответственно.

Для определения R^+ и R^- достаточно использовать схему измерений с одним спин-флиппером и без анализатора поляризации. При этом измеряются интенсивности счета без образца I_e и с образцом при включенном I^{on} и

выключенном I^{off} спин-флиппере соответственно:

$$\begin{aligned} R^+ &= \frac{[1 - P_p(1 - 2f_1)]I^{\text{off}} - (1 - P_p)I^{\text{on}}}{2f_1P_pI_e}, \\ R^- &= \frac{(1 + P_p)I^{\text{on}} - [1 + P_p(1 - 2f_1)]I^{\text{off}}}{2f_1P_pI_e}. \end{aligned} \quad (8)$$

Из (8) видно, что необходимо знать также параметры спектрометра f_1 и P_p . Параметры f_1 и P_p могут быть определены по процедуре, использующей измерительную схему с двумя спин-флипперами и анализатором поляризации, которая описана в предыдущем разделе. Однако если использовать калибратор с известным коэффициентом отражения, то и параметры f_1 и P_p можно определить из измерительной схемы с одним спин-флиппером и без анализатора поляризации:

$$f_1 = \frac{I^{\text{off}} - I^{\text{on}}}{2I^{\text{off}} - I_e(R_c^{++} + R_c^{--})}, \quad P_p = \frac{2I^{\text{off}} - I_e(R_c^{++} + R_c^{--})}{I_e(R_c^{++} - R_c^{--})}. \quad (9)$$

6. ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ PSD

6.1. Программное обеспечение эксперимента. Для управления экспериментом и накопления экспериментальных данных используется размещаемая на РС программа NEU00.exe. Накопленная информация с ПЧД записывается в спектральный файл, имеющий бинарный формат данных. Программа NEU00.exe осуществляет подрежимы управления Check Start и Main Start. Check Start применяется для кратковременных нейтронных измерений при проведении каких-либо настроек спектрометра. При этом экспериментатором задается время набора одного спектра в часах, минутах и секундах. При записи спектра время набора переводится в число импульсов мощности (стартов) реактора по формуле $m(\text{starts}) = 4,8163t$ (с). Формат имени файла имеет вид spectABN. Название файла состоит максимум из 8 символов. Название спектра spect задается пользователем и может содержать от 1 до 5 символов. Далее в процессе измерений к имени файла автоматически добавляются индексы ABN. Индексы A и B соответствуют состояниям первого и второго спин-флипперов соответственно, а N обозначает номер записи файла. Состояние спин-флиппера «выкл.» обозначается буквой «P», а состояние спин-флиппера «вкл.» обозначается буквой «M». Подрежим Main Start обеспечивает автоматическое переключение спин-флипперов и накопление информации для каждого из состояний пары спин-флипперов в течение заданного для данного состояния времени. Различные состояния спин-флипперов

чередуются между собой и циклически повторяются. Этим исключается влияние изменения интенсивности нейтронного пучка с течением времени. Изменяя соотношение времен набора различных состояний, можно, в зависимости от соотношения скоростей счета, оптимизировать измерение и провести его за более короткий интервал времени. После каждого цикла измерений спектры запоминаются в файлах, образуя с течением времени нарастающую сумму. По истечении определенного заданного времени к уже существующим файлам спектров добавляются файлы с теми же именами, но с увеличенным порядковым номером. Таким образом обеспечивается сохранность информации, соответствующей времени измерения, после которого произошел по какой-либо причине сбой в наборе спектров. В программе Main Start возможны четыре моды измерений, в которых создаются следующие спектры:

- мода 1 (спин-флипперы выключены) — spectPPN;
- мода 2 (работает первый спин-флиппер) — spectPPN, spectMPN;
- мода 3 (работает второй спин-флиппер) — spectPPN, spectPMN;
- мода 4 (работают оба спин-флиппера) — spectPPN, spectMPN, spectPMN, spectMMN.

6.2. Первичная обработка экспериментальных данных. С помощью программы NEUTXT.exe бинарный файл спектра spectABN переводится в текстовый файл spectABN.txt следующего формата:

- в первой строке содержится число 256 (число координатных каналов PSD) и 2048 (число временных каналов PSD);
- во второй строке находятся число стартов реактора и интегральный по всем каналам счет нейтронов;
- начиная с третьей строки, представлена двумерная матрица 2048 (число строк) \times 256 (число столбцов) счета нейтронов в одном временном и одном координатном каналах.

Для первичной обработки данных создан пакет программ, написанных на языке FORTRAN. Входными файлами для этих программ являются текстовые файлы спектров spectABN.txt, а на выходе создаются текстовые файлы данных file.dat, которые содержат колонки цифр. Файлы file.dat уже можно использовать в стандартных графических редакторах GRAPHER или ORIGIN или использовать для дальнейшей обработки.

Существуют следующие программы первичной обработки данных:

- 1) neu00.exe — просмотр двумерных распределений $J(N_\lambda, N_x)$ и одномерных распределений $J(N_\lambda)$ и $J(N_x)$;
- 2) lam_as.for — вычисление зависимости интенсивности счета нейтронов от длины волны при некотором значении интервала ΔN_x ;
- 3) x_as.for — определение пространственного распределения интенсивности счета нейтронов при некотором значении интервала ΔN_λ ;
- 4) f1_f2_pa.for — определение вероятностей переворота поляризации для первого и второго спин-флипперов и произведения поляризующих эффектов

тивностей поляризатора и анализатора из данных интенсивности счета в измерительной схеме «поляризатор → первый спин-флиппер → второй спин-флиппер → анализатор»;

5) `ra_l.for` — определение эффективностей спин-флипперов и поляризующих эффективностей поляризатора и анализатора из данных интенсивности счета в измерительных схемах «поляризатор → первый спин-флиппер → второй спин-флиппер → анализатор» и «поляризатор → первый спин-флиппер → калибратор → второй спин-флиппер → анализатор»;

6) `p.for` — определение произведения $P_p P_a$ в измерениях с одним спин-флиппером и анализатором поляризации (эффективность переворота спин-флиппером поляризации равна единице);

7) `drt_as.for` — определение коэффициентов отражения по четырем интенсивностям счета (вводятся также поляризационные эффективности поляризатора и анализатора, вероятности переворота двух спин-флипперов и интенсивность счета I_0).

6.3. Выполнение модельных расчетов. Конечной целью нейтронного рефлектометрического эксперимента является определение из экспериментальных значений коэффициента отражения R_{exp} действительных параметров структуры (ядерный и магнитный оптические потенциалы в отдельных слоях, толщины слоев, параметры шероховатостей границ раздела и т. д.). Из-за конечных величин углового и временного разрешений спектрометра экспериментальные значения коэффициента отражения являются сверткой действительного коэффициента отражения нейтронов $R(q)$ с функцией разрешения спектрометра $f(\theta, t)$:

$$R_{\text{exp}} = \int j_0(\theta, \lambda) f(\theta, t) R(q) d\theta dt \Big/ \int j_0(\theta, \lambda) f(\theta, t) d\theta dt, \quad (10)$$

где $j_0(\theta, \lambda)$ — плотность потока нейтронов на выходе поляризатора нейтронов, θ — угол скольжения нейтронов на исследуемом образце. Для преобразования (10) к более простому виду сделаем некоторые замечания. Во-первых, переданный волновой вектор q связан с θ и длиной волны λ соотношением $q = 4\pi \sin(\theta)/\lambda$. Далее, время пролета нейтронов от замедлителя до детектора t связано с λ соотношением t (мс) = $3,956\lambda(\text{Å})L(\text{м})$, где L — расстояние от замедлителя до детектора. Используя эти соотношения, мы последовательно можем перейти от переменной t к переменной λ и далее от переменных λ и θ к переменной q . После так как мы знаем среднюю длину волны λ_{av} со среднеквадратичной точностью $\delta\lambda \ll \lambda_{av}$ и угол скольжения θ_{av} со среднеквадратичной точностью $\delta\theta < \theta_{av}$, то можем переписать (10) в следующем виде:

$$R_{\text{exp}}(q_{av}) = \int j_0(q, q_{av}) f(q, q_{av}) R(q) dq \Big/ \int j_0(q, q_{av}) f(q, q_{av}) dq, \quad (11)$$

где $q_{av} = 4\pi \sin(\theta_{av})/\lambda_{av}$, а интегрирование по q выполнено в пределах небольшого изменения волнового числа от $q_{\min} = 4\pi \sin(\theta_{av} - \Delta\theta/2)/(\lambda_{av} + \Delta\lambda/2)$ до $q_{\max} = 4\pi \sin(\theta_{av} + \Delta\theta/2)/(\lambda_{av} - \Delta\lambda/2)$ и $\Delta\theta$, $\Delta\lambda$ есть интервалы изменения угла скольжения и длины волны нейтрона. Из-за небольшого изменения q вокруг q_{av} функцию разрешения можно представить в виде функции Гаусса как $f(q, q_{av}) = c \exp(-(q - q_{av})^2/2\sigma_q^2)$, где $c = 1/2\pi\sigma_q^2$, $\sigma_q = q[(\delta\theta/\theta_{av})^2 + (\delta\lambda/\lambda_{av})^2]^{1/2}$, $\delta\theta$ и $\delta\lambda$ определяются расчетным путем. Так, для определения $\delta\theta$ имеем

$$\delta\theta = [(h_1^2 + h_2^2/3)]^{1/2}/L_{\text{dia}}, \quad (12)$$

где h_1 и h_2 — полуширины первой и второй диафрагм, а L_{dia} — расстояние между диафрагмами. Первой диафрагмой является диафрагма на выходе поляризатора. Роль второй диафрагмы может выполнять или диафрагма перед образцом с полушириной h_{fs} , или диафрагма на образце с полушириной h_s , или диафрагма на детекторе с полушириной h_{det} (роль диафрагмы на детекторе могут выполнять несколько позиционных каналов PSD). Для выбора h_2 и L_{dia} используются параметры той диафрагмы, для которой отношение ее полуширины к расстоянию до первой диафрагмы меньше. Таким образом, $h_2 = h_{fs}$ и $L_{\text{dia}} = L_{fs}$, если h_{fs}/L_{fs} есть наименьшая величина. $h_2 = h_s$ и $L_{\text{dia}} = L_s$, если h_s/L_s есть наименьшая величина и, наконец, $h_2 = h_{\text{det}}$ и $L_{\text{dia}} = L_{\text{det}}$, если $h_{\text{det}}/L_{\text{det}}$ есть наименьшая величина. Следует также сказать, что если $l_s \sin(\theta) < h_s$ или если диафрагмы на образце вообще нет, то сам образец выполняет роль диафрагмы образца и $h_s = l_s \sin(\theta)/2$, где l_s — длина образца вдоль направления нейтронного пучка.

Для среднеквадратичного значения длины волны $\delta\lambda$ имеем

$$\delta\lambda = 3,956 \{[(\tau/2)^2 + (\Delta t/2)^2]/3\}^{1/2}/L, \quad (13)$$

где $\tau = 0,320$ мс — длительность импульса тепловых нейтронов, Δt — ширина временного канала детектора, для PSD, равная 0,128 мс, а для MCD — 0,064 мс. Для параметров $L = 34$ м и $\Delta t = 0,128$ мс получим, что разрешение спектрометра по длине волны при использовании PSD равно $\delta\lambda = 0,011$ Å.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При создании нового спектрометра поляризованных нейтронов был учтен многолетний опыт исследований как магнитной структуры объемных магнитных и сверхпроводящих материалов [31–33], так и многослойных магнитно-неколлинеарных наноструктур [34]. Оправданной для спектрометра на импульсном источнике нейтронов оказалась ориентация на создание широкополосной и широкоапертурной поляризационной техники и позиционно-чувствительное детектирование, а также принятая концепция совместного

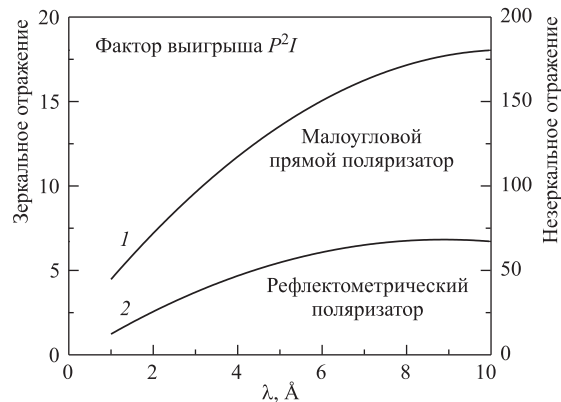


Рис. 14. Фактор выигрыша в величине параметра P^2I для малоуглового спектрометра РЕМУР с поляризаторами малоугловой и рефлектометрической мод по сравнению со спектрометром СПН для случаев регистрации зеркального и изотропного диффузного рассеяния нейтронов

исследования структуры методами рефлектометрии и малоуглового рассеяния. На рис. 14 приведена длинноволновая зависимость фактора выигрыша в значении параметра P^2I для нового спектрометра РЕМУР по сравнению со спектрометром СПН. Видно, что эффективность спектрометра в десятки раз выросла при регистрации зеркального отражения и в сотни раз при регистрации диффузного рассеяния.

Измерительная схема спектрометра органично была дополнена новыми развитыми нами методами исследований, к которым относятся пространственное расщепление пучка нейтронов [35, 36] и генерация стоячих и усиленных стоячих нейтронных волн в слоистой структуре [37, 38].

На новом спектрометре уже было проведено первое исследование явления сосуществования сверхпроводимости и магнетизма в бислое и периодической структуре Fe/V [39], что на практике подтвердило эффективность работы спектрометра РЕМУР.

В заключении хотелось бы выразить благодарность сотрудникам ПИЯФ А. И. Огорокову, С. В. Григорьеву, В. А. Ульянову, В. М. Пусенкову и А. Ф. Щебетову, принимавшим активное участие в разработке и создании поляризационной техники для спектрометра; сотрудникам научно-экспериментального отдела комплекса спектрометров ИБР-2 А. П. Сиротину, А. Кирилову, А. Богдзелю, Ф. В. Левчановскому и В. В. Журавлеву, принимавшим активное участие в создании систем автоматизации и управления спектрометром, регистрации нейтронов, накопления и обработки информации; сотрудникам

КБ ЛНФ В. И. Константинову, А. А. Кустову и Н. А. Волкову за разработку механических узлов спектрометра, а также сотрудникам других отделов Лаборатории нейтронной физики, в той или иной степени участвовавшим в создании и запуске спектрометра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Драбкин Г. М. и др. // ЖЭТФ. 1969. Т. 29. С. 261.
2. Rekveldt M. Th. // J. de Physique. 1971. V. 32. P. 579.
3. Аксенов В. Л., Никитенко Ю. В. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 1997. Т. 12. С. 5;
Aksenov V. L., Nikitenko Yu. V. // Surface Investigation. 1998. V. 13. P. 1461.
4. Okorokov A. I. et al. // J. de Physique. 1982. V. 43. P. 97.
5. Deriglazov V. V. et al. // Proceeding of PNCMI-96, Dubna, June 18–20, 1996. P. 26–35.
6. Mezei F. // Z. Phys. 1972. V. 255. P. 146.
7. Felcher G. P. // Physica. B. 1999. V. 267–268. P. 154.
8. Korneev D. A. // Nucl. Instr. Meth. 1980. V. 169. P. 65–69.
9. Korneev D. A., Kudrjashev V. A. // Nucl. Instr. Meth. 1981. V. 179. P. 509–513.
10. Korneev D. A. et al. // 2nd Intern. Conf. «On Surface X-Ray and Neutron Scattering», Bad Honnef, June 25–28, 1991.
11. Kortright J. B. et al. // JMMM. 1999. V. 207. P. 7–44.
12. Moon R. B., Riste T., Koehler W. C. // Phys. Rev. B. 1969. V. 181. P. 920.
13. Шабалин Е. П. Импульсные реакторы на быстрых нейтронах. М.: Атомиздат, 1976. 248 с.
14. Ульянов В. И. и др. Сфокусированный анализатор поляризации нейтронов. Готовится публикация.
15. Фатеев О. В. и др. // ПТЭ. 2001. Т. 2. С. 5;
Fateev O. V. et al. // Instruments and Experimental Techniques. 2001. V. 44. P. 137.
16. Mezei F. // Commun. Phys. 1976. V. 1. P. 81.
17. Maier-Leibnitz H., Springer T. // Reactor Sci. Technol. 1963. V. 17. P. 217.
18. Михайлова В. Е. и др. Препринт ЛИЯФ-696. Л., 1981.
19. Dokukin E. B., Nikitenko Yu. V. // Nucl. Instr. Meth. A. 1993. V. 330. P. 462.
20. Григорьев С. В. Препринт ПИЯФ-1840. 1992.
21. Grigoriev S. V., Okorokov A. I., Runov V. V. // Nucl. Instr. Meth. A. 1997. V. 384. P. 451.
22. Григорьев С. В. и др. Градиентные радиочастотные спин-флипперы на спектрометре поляризованных нейтронов РЕМУР. Готовится публикация.
23. Абов Ю. Г., Гулько А. Д., Крупчицкий П. А. Поляризованные медленные нейтроны. М.: Атомиздат, 1966.

24. Kirilov A. S. Current State and Perspectives of IBR-2 Instrument Control Software // Proc. of the Second International Workshop on Data Acquisition Systems for Neutron Experimental Facilities DANEF-2000. Dubna, 2001. P. 206–211.
25. Юдин В. Е. Программа юстировки спектрометра РЕМУР в среде MS Windows. Препринт ОИЯИ Р13-2003-12. Дубна, 2003. 10 с.
26. Litvinenko E. I. The Implementation of NeXus Data Format in OpenG2 Software Package // Proc. of the Second International Workshop on Data Acquisition Systems for Neutron Experimental Facilities DANEF-2000. Dubna, 2001. P. 227–241.
27. Кирилов А. С. и др. Развитие комплекса Sonix для спектрометра ЮМО реактора ИБР-2. Сообщение ОИЯИ Р13-2003-66. Дубна, 2003.
28. Por P. T., Kraan W. H., Rekveldt M. Th. // Nucl. Instr. Meth. A. 1994. V. 339. P. 550.
29. Majkrzak C. F. // Physica. B. 1996. V. 221. P. 342.
30. Fredrikze H., van de Kruijs R. W. E. // Physica. B. 2001. V. 297. P. 143.
31. Aksenov V. L. et al. // Physica. B. 1995. V. 213–214. P. 134.
32. Aksenov V. L., Dokukin E. B., Nikitenko Yu. V. // Physica. B. 1995. V. 213–214. P. 100.
33. Аksenov В. Л. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1995. Т. 61. С. 294.
34. Aksenov V. L. et al. // Physica. B. 2003. V. 335. P. 147.
35. Aksenov V. L., Nikitenko Yu. V., Kozhevnikov S. V. // Physica. B. 2001. V. 297. P. 94.
36. Кожевников С. В. Исследование и применение эффекта пространственного расщепления нейтронного пучка в магнитных средах. Дис. на соиск. уч. степ. канд. физ.-мат. наук. Дубна, 2002. 94 с.
37. Aksenov V. L., Nikitenko Yu. V. // Physica. B. 1999. V. 267–268. P. 313.
38. Aksenov V. L., Nikitenko Yu. V. // Physica. B. 2001. V. 297. P. 101.
39. Aksenov V. L. et al. JINR NEWS. 2003. No. 4. P. 25–29.

Получено 27 мая 2004 г.

Редактор *О. Г. Андреева*

Подписано в печать 13.07.2004.

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

Усл. печ. л. 2,25. Уч.-изд. л. 2,75. Тираж 235 экз. Заказ № 54521.

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

E-mail: publish@pds.jinr.ru

www.jinr.ru/publish/