

P13-2006-152

А. В. Белушкин, А. А. Богдзель, В. В. Журавлев,
С. А. Кутузов, Ф. В. Левчановский, Ли Ен Че,
Е. И. Литвиненко, А. С. Никифоров, Ц. Ц. Пантелеев,
В. И. Приходько, А. Н. Черников, А. В. Чураков,
В. Н. Швецов

**ОДНОМЕРНЫЙ ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ
ДЕТЕКТОР ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ**

Направлено в журнал «Приборы и техника эксперимента»

Белушкин А. В. и др.

P13-2006-152

Одномерный позиционно-чувствительный детектор тепловых нейтронов

Для оснащения высокоэффективных нейтронных спектрометров исследовательского реактора ИБР-2 был разработан одномерный позиционно-чувствительный детектор (ПЧД) тепловых нейтронов. Детектор выполнен в виде многопроволочной пропорциональной газовой камеры с $\text{He}^3 + \text{CF}_4$ газовым наполнением. Его основные параметры: чувствительная область — $200 \times 80 \text{ мм}^2$, координатное разрешение — 2 мм. В настоящий момент детектор успешно работает на спектрометрах «Рефлекс» и ФДВР реактора ИБР-2, а также на дифракционной установке реактора ИВВ-2М (г. Заречный).

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2006

Belushkin A. V. et al.

P13-2006-152

1D Position-Sensitive Detector for Thermal Neutrons

In order to equip highly efficient neutron spectrometers at the IBR-2 research reactor, 1D gaseous position-sensitive thermal neutron detector (PSD) has been developed. The detector design is based on Multi-Wire Proportional Chamber (MWPC) with $\text{He}^3 + \text{CF}_4$ gas mixture. Its main parameters are the following: active area — $200 \times 80 \text{ mm}^2$ and spatial resolution — 2 mm. At present, such detectors successfully work at the «Reflex» and HRFD spectrometers on IBR-2 research reactor and on the diffraction facility of the RWW-2M research reactor (Zarechniy).

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2006

ВВЕДЕНИЕ

Методы рассеяния тепловых нейтронов позволяют решать широкий круг задач физики конденсированного состояния вещества, как фундаментальных, так и прикладных. С их помощью можно изучать атомную и магнитную структуру и динамику не только в поверхностном слое, но и внутри

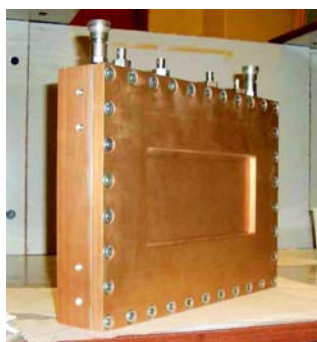


Рис. 1. Внешний вид 1D ПЧД

объема исследуемого объекта. На практике используются методы, основанные на рассеянии нейтронов. Их суть состоит в измерении углового и энергетического распределения интенсивности нейтронного пучка после взаимодействия с исследуемым образцом. Для проведения таких измерений используют позиционно-чувствительные детекторы нейтронов. Основными требованиями, предъявляемыми к данным приборам, являются высокая эффективность регистрации нейтронов, хорошее пространственное разрешение и однородность эффективности по всей площади

детектора. Также важна низкая чувствительность к гамма-квантам, являющимся основным компонентом фона на выведенных из реактора пучках нейтронов. Всем этим требованиям удовлетворяют позиционно-чувствительные детекторы (ПЧД) на основе газовых пропорциональных камер [1, 2].

В ЛНФ ОИЯИ разработан одномерный ПЧД тепловых нейтронов с чувствительной областью 200×80 мм². К настоящему времени ПЧД данного типа оснащены следующие установки: дифрактометр на исследовательском реакторе ИВВ-2М (г. Заречный), ФДВР [3] и «Рефлекс» [4] на реакторе ИБР-2 ОИЯИ.

1. ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ДЕТЕКТОРА

Основные габаритные размеры детектора указаны на рис. 2. В передней крышке расположено входное окно для нейтронов, с размерами 220×100 мм². Толщина входного окна 7 мм. В герметически изолированном внутреннем

объеме детектора расположены анодная, катодная и дрейфовые плоскости. Толщина чувствительной области детектора составляет 30 мм. Материал корпуса — алюминиевый сплав Д16Т, материал входного окна — АМГ.

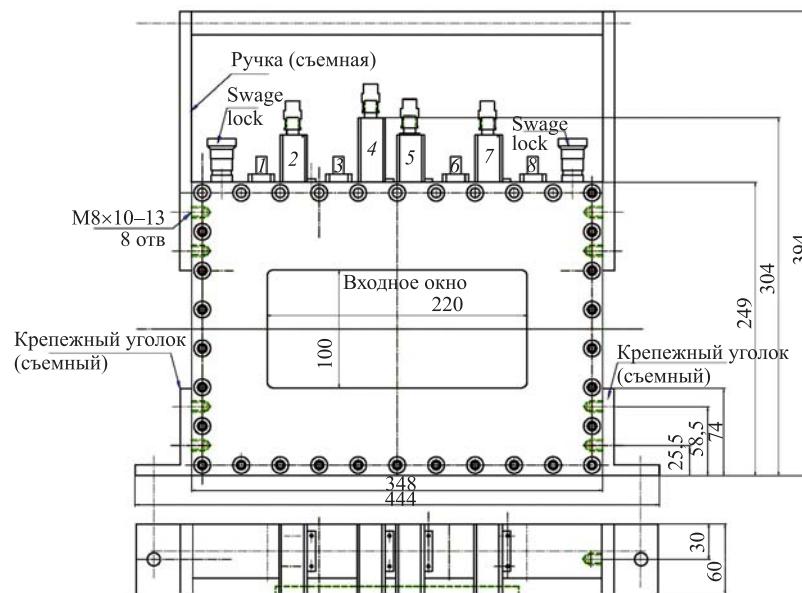


Рис. 2. Основные размеры ПЧД 200×80. Цифрами обозначены: 1 — разъем X1; 2 — предусилитель катодный X1; 3 — высоковольтный разъем +HV; 4 — фильтр; 5 — предусилитель анодный; 6 — высоковольтный разъем -HV; 7 — предусилитель катодный X2; 8 — разъем X2

На корпусе детектора закреплены три предусилителя и коробка фильтра с разделительной емкостью. Высокое напряжение подается через два разъема типа MHV. Для вывода сигналов с катодов служат два разъема BNC, анодный сигнал берется с коробки фильтра через разделительную емкость. Детектор имеет два газовых разъема типа «Swagelock», что позволяет использовать его также в проточном режиме работы.

В объеме камеры расположены две катодные, одна анодная и две дрейфовые плоскости. Анодная и катодные плоскости представляют собой текстолитовые рамки, на которые натянуты тонкие позолоченные проволочки. Толщина анодных проволочек 10, катодных — 50 мкм. Расстояние между катодами составляет 12 мм, анод расположен посередине между ними. Передняя дрейфовая плоскость такая же, как и катодная плоскость. В качестве

задней дрейфовой плоскости используется сплошной лист фольгированного текстолита. Анодные проволочки намотаны с шагом 2 мм и соединены общей шиной, катодные проволочки намотаны с шагом в 1 мм, объединены по две и выведены на линию задержки.

Линия задержки собрана из 114 дискретных элементов с $L = 145$ нГн и $C = 56$ пФ. Измеренная величина линии задержки составляет 330 нс, активное сопротивление — 7,1 Ом. При данных параметрах отношение величины линии задержки к переднему фронту сигнала составляет 15.

2. ЭЛЕКТРОНИКА

Детектор комплектуется электроникой сбора и обработки данных (рис. 3). Она включает в себя крейт NIM с блоком высокого напряжения NHQ206L фирмы Iseg Spezialelektronik GmbH, дискриминатор со следящим порогом PS715 фирмы Philips Scientific, а также блок задержек, предусилители и плату сбора и накопления данных PCI DAQ [5], разработанные в ЛНФ ОИЯИ. Плата сбора и накопления данных вместе с базовым программным обеспечением разработана в сотрудничестве с Институтом Гана–Мейтнер (НМИ), Берлин.

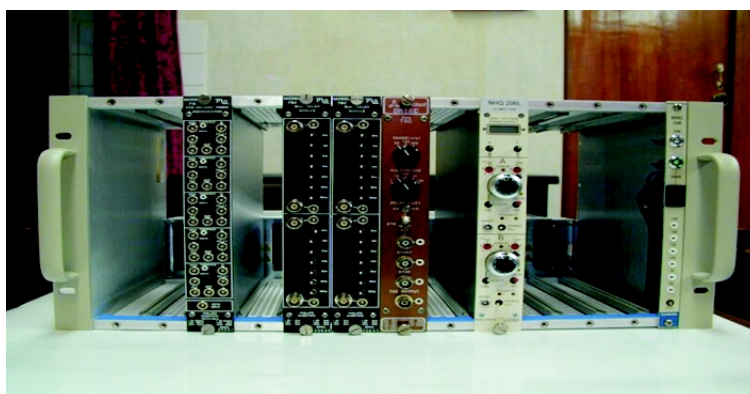


Рис. 3. Электроника сбора и обработки данных

Предусилитель реализован по трехкаскадной схеме. Входной каскад выполнен на высокочастотном биполярном транзисторе BFR93 и обеспечивает активное согласование с волновым сопротивлением линии задержки. Два последующих каскада используют операционные усилители с токовой обратной связью. Выходной импеданс равен 50 Ом.

Основные параметры предусилителя:

- коэффициент усиления (сопротивление нагрузки 50 Ом) ~ 1250 ;
- время нарастания выходного импульса ~ 20 нс;
- среднеквадратичный шум, приведенный к входу, $1,8 \div 2,5$ мкВ;
- динамический диапазон выходного сигнала (сопротивление нагрузки 50 Ом) $+1,5 \div -2,0$ В;
- напряжение питания 12 В.

В блоке электроники накопления данных (PCI DAQ, рис. 4) по сигналам с обоих концов линий задержки определяются координаты события X/Y и время пролета нейтрона от старта реактора до момента регистрации. Предусмотрены два основных режима работы: гистограммный (сортировка данных в реальном времени и построение спектров) и «списочный» (накопление «сырых» данных с последующей обработкой). Блок накопления представляет собой плату в стандарте PC, имеет PCI-интерфейс и монтируется непосредственно в корпусе персонального компьютера.



Рис. 4. Блок накопления данных (PCI DAQ)

Все функции блока являются программируемыми. Различные версии встроенных программ (в зависимости от типа детектора и выбранного режима работы) записываются управляющей программой PC в логическую матрицу (ALTERA EP1K30) и цифровой сигнальный процессор (DSP 320C6711), что позволяет реализовать различные функции и использовать этот блок для накопления данных как для 1D, так и для 2D ПЧД без каких-либо изменений в аппаратной части.

К функциям встроенных программ относятся цифровая обработка сигналов, фильтрация данных (по известному правилу сумм — сумма временных сигналов с обоих концов линий задержки с определенной точностью должна быть равна длине линии задержки), счет числа принятых и отбракованных событий, гистограммирование данных и др. На верхнем программном уровне реализованы функции пользовательского интерфейса, задания параметров и выбора режимов измерений, визуализации в реальном времени, сохранения данных и протоколирования работы системы. Многоуровневая модульная структура программного обеспечения позволяет встраивать как модули нижних уровней, производящие обращения к аппаратуре, так и модули верхнего уровня в другие программные комплексы [6].

Скорость накопления данных платой DAQ в режиме гистограммирования не менее 100 К соб./с, в режиме накопления «сырых» данных — не менее 500 К соб./с, объем гистограммной памяти 256 Мбайт. Эти параметры удовлетворяют требованиям большинства экспериментов, проводимых на нейтронных источниках.

Программное обеспечение системы работает на персональных компьютерах под управлением Microsoft Windows 2000 или Windows XP и позволяет использовать детектор как автономно, так и в составе программного комплекса SONIX+ [7], применяемого на спектрометрах ИБР-2 ЛНФ ОИЯИ.

3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТЕКТОРА. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения характеристик детектора проводились на исследовательском реакторе ИБР-2. Были измерены координатное разрешение и однородность эффективности детектора. Координатное разрешение измерялось по ширине пика на полувысоте (FWHM) от щелевого источника. Детектор с кадмиевой маской помещался в прямой пучок. Маска представляла собой кадмиевую пластину толщиной 1 мм с прорезанной в ней щелью шириной 0,3 мм. Засвечивались различные области детектора. Полученные пики аппроксимировались распределением Гаусса и определялась его ширина на полувысоте. По данным измерений разрешение детектора получилось не хуже чем 2 мм на всей чувствительной области. На рис. 5 показан координатный спектр одного из измерений.

Для измерения дифференциальной неоднородности эффективности детектора снимался координатный спектр детектора в равномерном нейтронном потоке (рис. 6). Дифференциальная неоднородность определялась как отношение максимального отклонения от средней величины к средней величине отсчетов. Дифференциальная неоднородность составила менее 5 %.

Полная эффективность детектора определяется парциальным давлением ^3He в газовой смеси. Она составляет около 50 % для тепловых нейтронов.

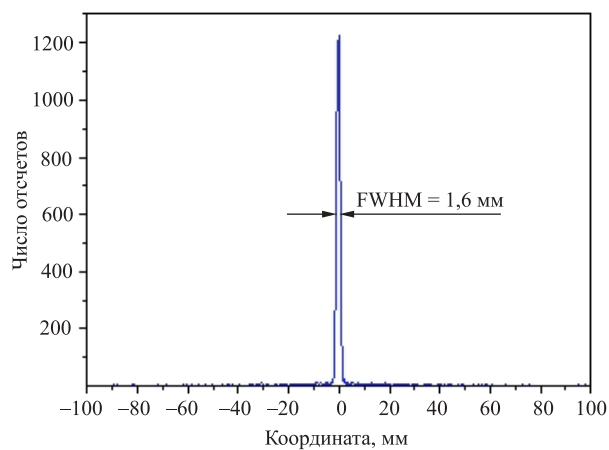


Рис. 5. Координатный спектр 1D ПЧД 200×80 от узкой ($s = 0,3$ мм) щели, расположенной по центру детектора

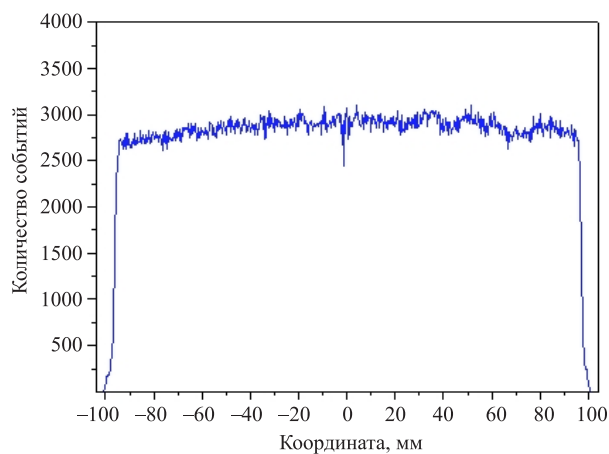


Рис. 6. Равномерная засветка 1D ПЧД 200×80 в рассеянном пучке

4. ФИЗИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве примеров использования детекторов данного типа можно привести результаты, полученные на установках ФДВР и «Рефлекс» реактора ИБР-2.

Спектрометр ФДВР находится на пучке № 5 реактора ИБР-2. Он представляет собой нейтронный корреляционный фурье-дифрактометр высокого

разрешения, использующий метод обратного времени пролета для накопления данных [3]. Основными задачами, решаемыми на ФДВР, являются уточнение кристаллических структур поликристаллов, измерение внутренних напряжений в объемных изделиях и исследования фазовых переходов, происходящих при изменении температуры. Дифракционные спектры с высоким разрешением ($\Delta d/d \approx 0,001$) измеряются детекторами обратного рассеяния на базе ZnS(Li)-сцинтилляторов с использованием метода временной фокусировки. Однако максимальное измеряемое этими детекторами d_{hkl} (межплоскостное расстояние) составляет около 4 Å. Для расширения диапазона по d_{hkl} на ФДВР применяется 1D ПЧД 200×80. Пример измеренных с помощью 1D ПЧД 200×80 спектров от соединения $(La_{0.1}Pr_{0.9})_{0.7}Ca_{0.3}Mn_{0.3}$ показан на рис. 7. При температуре 290 К образец находится в парамагнитном состоянии (рис. 7, а). При понижении температуры до 10 К он переходит в антиферромагнитное состояние, о чем свидетельствует появление магнитных пиков с $d_{hkl} \approx 8$ и 11 Å. Центр детектора соответствовал углу $2\theta = 30^\circ$.

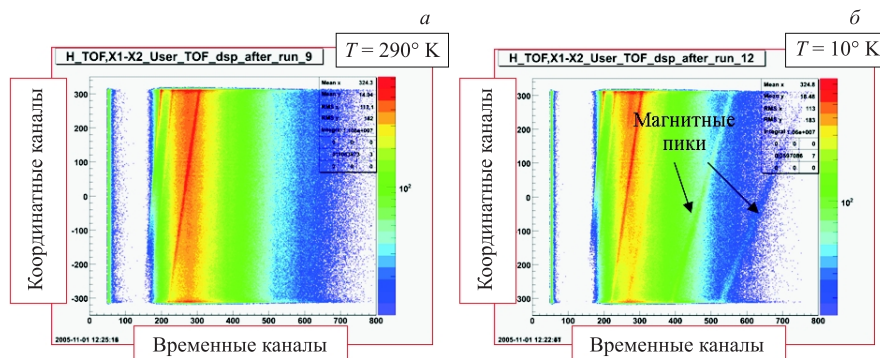


Рис. 7. Дифракционные спектры от $(La_{0.1}Pr_{0.9})_{0.7}Ca_{0.3}Mn_{0.3}$, измеренные на ФДВР при комнатной (а) и низкой (б) температурах. При низкой температуре появились дополнительные пики при 8 и 11 Å. Цена деления координатного канала 0,32 мм. Цена деления временного канала 128 мкс

Установка «Рефлекс» [4] предназначена для измерения свойств вещества с помощью методов нейтронной рефлектометрии. Данные методы позволяют изучать характеристики поверхностей, пленок и тонких многослойных структур. Наличие у нейтрона магнитного момента позволяет исследовать также магнитные свойства материи. Эти знания важны как для теоретической физики, так и для практического применения, в частности, для создания нейтронно-оптических систем, датчиков магнитного поля и магнитных носителей информации.

Для измерения зеркального отражения в рефлектометрических экспериментах достаточно точечного детектора, однако для измерения диффузного отражения необходимо, чтобы детектор обладал координатной чувствительностью.

В эксперименте с 1D ПЧД проводилось исследование многослойной структуры $[\text{MgO} / (4,7 \text{ нм}) \text{Fe} / (4,7 \text{ нм}) \text{V}]_{10} / [(1 \text{ ML}) \text{Fe} / (1 \text{ ML}) \text{V}]_{17} / (36,5 \text{ нм}) \text{V} / (2 \text{ нм}) \text{Pd}$ методом рефлектометрии поляризованных нейтронов. Координатный спектр, полученный при данном измерении, приведен на рис. 8. Горизонтальная линия на спектре соответствует зеркальному отражению нейтронов и дает информацию о распределении ядерной плотности по глубине образца. Наклонная линия говорит о наличии незеркального (диффузного) рассеяния. По ней можно судить о характерных неоднородностях в плоскости образца (на границе раздела слоев).

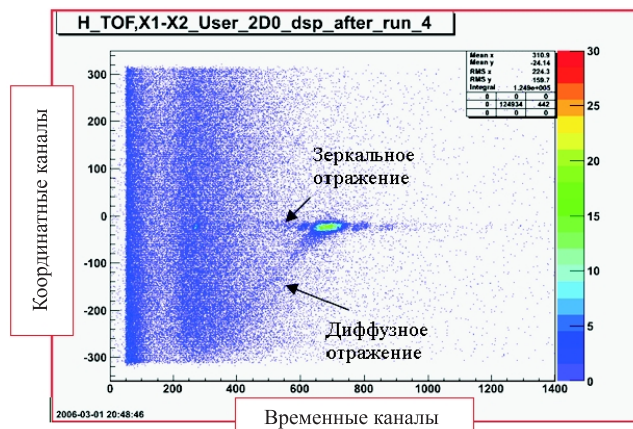


Рис. 8. Спектр от $[\text{MgO}/(4,7 \text{ нм})\text{Fe}/(4,7 \text{ нм})\text{V}]_{10}/[(1\text{ML})\text{Fe}/(1\text{ML})\text{V}]_{17}/(36,5 \text{ нм}) \text{V}/(2 \text{ нм})\text{Pd}$ при исследовании с помощью метода рефлектометрии поляризованных нейтронов на установке «Рефлекс». Видна линия, обусловленная диффузным отражением. Цена деления координатного канала 0,32 мм. Цена деления временного канала 64 мкс

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные в ЛНФ ОИЯИ одномерные ПЧД тепловых нейтронов с чувствительной областью $200 \times 80 \text{ мм}^2$ являются достаточно универсальными и вместе с тем сравнительно дешевыми инструментами для нейтронного анализа структуры вещества. Об этом свидетельствует опыт использования де-

текторов на установках реактора ИБР-2. В настоящий момент созданы три таких детектора. Два из них используются на установках реактора ИБР-2, еще один предназначен для дифракционных экспериментов на реакторе ИВВ-2М в г. Заречный.

С учетом опыта, полученного в результате данной работы, начата разработка двухкоординатных газовых позиционно-чувствительных детекторов для нейтронных экспериментов. Также планируется дальнейшее совершенствование одномерных детекторов данного типа и оснащение ими других спектрометров реактора ИБР-2. Работа осуществлена при поддержке гранта РФФИ № 04-02-17-391 и госконтракта Министерства образования и науки № 02.452.11.7044.

Авторский коллектив выражает благодарность профессору А.М. Балагурову за критические замечания по тексту статьи, а также сотрудникам ЛНФ ОИЯИ С.Н. Бушмелевой и В.В. Проглядо за помощь в проведении измерений на ИБР-2.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Fischer J., Radeka V., Boie R. A.* Position-Sensitive Detection of Thermal Neutrons / Eds.: P. Convert, J. B. Forsyth. New York: Academic Press, 1983. P. 129.
2. *Boulin C. J. et al.* // NIM. A. 1988. No. 269. P. 312.
3. *Balagurov A. M.* High resolution Fourier diffraction at the IBR-2 reactor // Neutron News. 2005. V. 16. P. 8.
4. *Корнеев Д. А., Бондарчук В. И., Ярадайкин С. П.* Рефлектометр поляризованных нейтронов «Рефлекс-П». Сообщение ОИЯИ РЗ-2002-189. Дубна, 2002.
5. *Levchanovski F. V. et al.* A PCI DAQ board for MWPC detectors with high-rate 2D delay line position readout // NIM. A. 2004. No. 529. P. 413–416.
6. *Levchanovsky F. V. et al.* Software Modules of DAQ PCI board (DeLiDAQ) for Positive-Sensitive MWPC Detectors with Delay Line Readout // NIM. A. 2006 (in press).
7. *Кирилов А. С. и др.* Развитие программного комплекса SONIX для спектрометра ЮМО на реакторе ИБР-2 // ПТЭ. 2004. Т. 6, № 3. С. 65–77.

Получено 10 ноября 2006 г.

Редактор *Е. В. Сабеева*

Подписано в печать 15.12.2006.

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

Усл. печ. л. 0,56. Уч.-изд. л. 0,68. Тираж 325 экз. Заказ № 55588.

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

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/