

P13-2006-124

А. В. Белушкин, А. А. Богдзель, В. В. Журавлев,
Ц. Ц. Пантелеев, Ли Ен Че, А. Н. Черников,
А. В. Чураков, В. Н. Швецов

ДВУХКООРДИНАТНЫЙ МОНИТОРНЫЙ
ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ДЕТЕКТОР
ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ

Направлено в «Журнал технической физики»

Белушкин А. В. и др.

P13-2006-124

Двухкоординатный мониторный позиционно-чувствительный детектор тепловых нейтронов

Создание в мире новых высокопоточных источников нейтронов и оснащение этих источников высокоэффективными спектрометрами вызывает необходимость разработки и создания специализированных мониторных детекторов прямого пучка. Отличительными особенностями этих детекторов являются крайне низкая эффективность и как можно меньшее ослабление падающего пучка нейтронов. В рамках данной работы разработан и создан двухкоординатный позиционно-чувствительный мониторный детектор, предназначенный для измерения профиля нейтронных пучков в режиме реального времени как на стационарных, так и на импульсных источниках нейтронов. Основные параметры данного прибора: координатное разрешение 4×4 мм; чувствительная область 100×100 мм; эффективность регистрации $10^{-2} - 10^{-6}$. Использование азота в качестве конвертера позволило получить рекордно низкую эффективность монитора, сохранив при этом требуемые параметры. В результате разработанный прибор может использоваться не только на самых высокопоточных нейтронных источниках, уже существующих в мире, но и на источниках следующего поколения, создаваемых в США (SNS) и Японии (JPARC).

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2006

Belushkin A. V. et al.

P13-2006-124

Two-Coordinate Monitor Position-Sensitive Detector of Thermal Neutrons

In order to observe a direct beam on new, high-efficient neutron spectrometers, a specialized «monitor» detector must be developed. A very low efficiency and the smallest possible weakening of direct beam are specific properties of such devices. In the frame of this work a two-coordinate monitor position-sensitive detector of thermal neutrons, intended for real-time direct beam observation on constant and impulse neutron sources, was developed and created. Its main parameters are: coordinate resolution: 4×4 mm; sensitive area: 100×100 mm; efficiency: $10^{-2} - 10^{-6}$. The use of nitrogen as a neutron converter allows achieving a record low efficiency. As a result, this detector may be used not only on the existing high-intensive sources, but on the next generation sources, created in USA (SNS) and Japan (JPARC), too.

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

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

ВВЕДЕНИЕ

Создание в мире новых высокопоточных источников нейтронов, как стационарных, так и импульсных, для исследований на выведенных нейтронных пучках и оснащение этих источников высокоэффективными спектрометрами вызывает необходимость разработки и создания специализированных детекторов нейтронов, удовлетворяющих целому ряду критериев. В частности, во многих экспериментах имеется необходимость непрерывного контроля пространственного распределения и интенсивности нейтронного потока с течением времени. В таких случаях детектор называют монитором. При этом вносимое монитором возмущение нейтронного потока должно быть минимальным, а измеряемые интенсивности достаточно высокими. Кроме того, к механической конструкции монитора также предъявляются особые требования, обусловленные особенностями систем транспортировки нейтронного пучка или геометрическими особенностями нейтронного спектрометра.

В данной работе описывается нейтронный позиционно-чувствительный монитор нейтронного пучка, разработанный в соответствии с техническими требованиями, подготовленными авторами совместно со специалистами Технического университета Мюнхена для работ на новом исследовательском реакторе FRM-II (Германия) [1].

1. ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ МОНИТОРА

Внешний вид монитора показан на рис. 1. Он представляет собой пропорциональную многопроволочную камеру низкого давления. Корпус изготовлен из алюминиевого сплава Д16Т, его внешние габариты составляют $320 \times 320 \times 23$ мм, толщина входного и выходного окон для нейтронного пучка 1 мм, размер чувствительной к нейтронам области 100×100 мм. Тот факт, что габариты детектора существенно превышают размер чувствительной области, вызван требованиями к размеру детектора по направлению нейтронного пучка, а именно толщиной 23 мм, которая не позволяет в небольших габаритах разместить все необходимые внутренние элементы детектора. Толщина окон, с одной стороны, обеспечивает достаточную механическую прочность конструкции, а с другой стороны, не приводит к значительным потерям проходящих через монитор нейтронов за счет рассеяния и захвата на окнах.

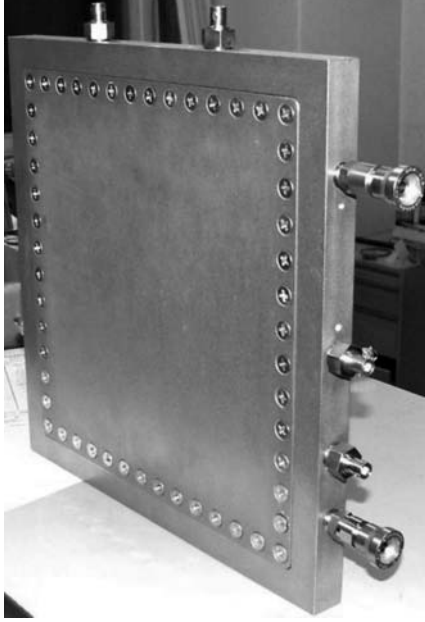


Рис. 1. 2D-монитор тепловых нейтронов

В объеме камеры расположены две катодные и одна анодная плоскости. Расстояние между катодными плоскостями составляет 12 мм, анод расположен посередине между ними. Катоды и аноды представляют собой текстолитовые рамки с натянутыми тонкими позолоченными проволоками. Толщина анодных проволочек 10 мкм, катодных — 50 мкм. Анодные проволоки намотаны с шагом 2 мм и соединены общей шиной, катодные проволоки намотаны с шагом в 1 мм, объединены по две и выведены на линию задержки. Проволоки на верхней катодной плоскости расположены перпендикулярно проволокам нижней катодной плоскости. Линия задержки состоит из дискретных элементов, с постоянными $L = 145$ нГн и $C = 56$ пФ, одно звено задерживает сигнал на 2,9 нс.

Высокое напряжение положительной полярности подается на анод через разъем MHV, для вывода сигналов служат 5 разъемов BNC. Монитор имеет 2 газовых разъема типа «Swagelock» [2], что позволяет при необходимости обеспечить его работу в режиме потока газовой смеси через рабочий объем. Для регистрации нейтронов монитор заполнен смесью, состоящей из газа-конвертера нейтронов ${}^3\text{He}$ и гасящего газа CF_4 . При больших ($> 10^5 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$) потоках в качестве конвертера нейтронов может использоваться чистый газ N_2 .

2. ЭЛЕКТРОНИКА

Принципиальная схема сбора сигналов с монитора показана на рис. 2.

В состав электроники сбора данных входят следующие компоненты: крейт NIM с блоками дискриминатора со следящим порогом PS715 фирмы Philips Scientific и источником высокого напряжения NHQ206L фирмы Iseg Spezialelektronik GmbH, персональный компьютер с платой обработки данных и 5 быстродействующих предусилителей, закрепленных на боковых стенках корпуса детектора.

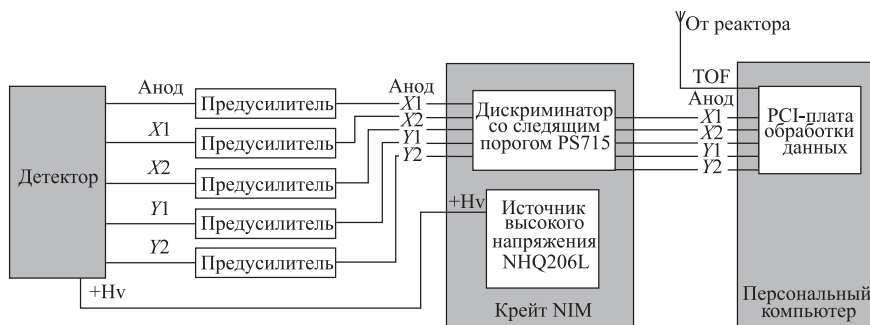


Рис. 2. Принципиальная схема электроники позиционно-чувствительного монитора

Основные параметры предусилителей, адаптированные к сигналам с позиционно-чувствительного детектора:

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

Сигналы с катодов (X1, X2, Y1, Y2) и, через разделительную емкость, с анода поступают на соответствующие предусилители, затем на пятиканальный дискриминатор со следящим порогом PS715. От дискриминатора сигналы идут в персональный компьютер, на плату обработки данных с PCI-интерфейсом [3]. Также на PCI-плату поступает сигнал стартов от импульсного нейтронного источника, по которому определяется энергия регистрируемых нейтронов при работе в режиме времени пролета.

3. ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ МОНИТОРА НА НЕЙТРОННОМ ПУЧКЕ

Измерения характеристик детектора проводились на реакторе ИБР-2 [4]. Были измерены координатное разрешение и однородность эффективности монитора по чувствительной области регистрации нейтронов.

Координатное разрешение измерялось следующим способом. Монитор, заполненный смесью 50 мбар ^3He + 950 мбар CF_4 с кадмиевой маской перед входным окном, помещался в прямой нейтронный пучок от реактора. Маска представляла собой кадмиевую пластину толщиной 1 мм с прорезанными в ней щелями шириной 0,5 мм. Расстояние между щелями 10 мм. Полученные

спектры суммировались вдоль оси Y для получения интегрального спектра по оси X . Результат представлен на рис. 3. Разница в площадях пиков от отдельных щелей обусловлена погрешностью ширины щелей маски ($0,5 \pm 0,2$ мм). Наблюдаемые пики описывались распределением Гаусса и определялась их ширина на полувысоте. При напряжении 2900 В максимальная дисперсия распределения составила 2,9 канала анализатора. Расстояние между пиками, равное 10 мм, составляло около 19,3 канала. Таким образом, полученное разрешение в центре детектора было не хуже чем 3,7 мм. Аналогичным образом измерялось координатное разрешение по оси Y , которое в центре детектора также было не хуже чем 3,7 мм.

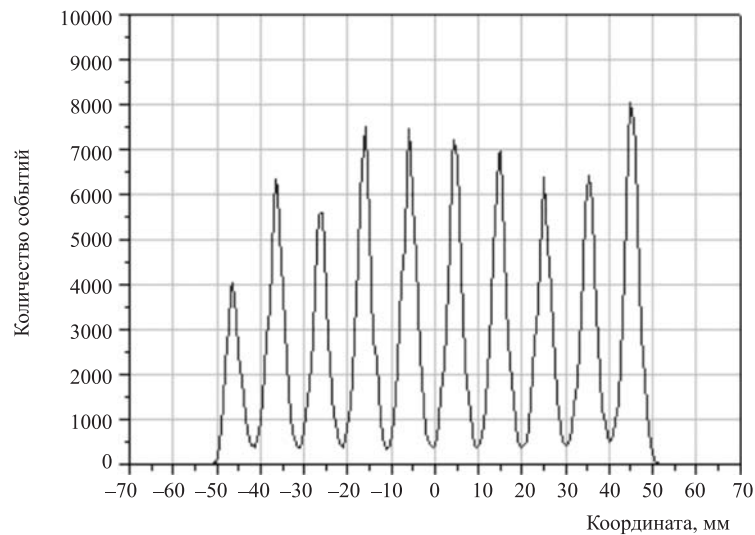


Рис. 3. Интегральный спектр по оси X , снятый с вертикальной щелевой маской. Газовая смесь 50 мбар ^3He + 950 мбар CF_4 , напряжение +2800 В; время измерения 1 ч 16 мин

Также была оценена дифференциальная неоднородность эффективности детектора при разных рабочих напряжениях. В этом случае монитор был выведен из прямого пучка нейтронов и измерял спектр рассеянных нейтронов от парафинового блока, помещенного на пути прямого пучка. Для определения дифференциальной неоднородности использовалась следующая методика. Сначала выделялась чувствительная область детектора и вычислялось максимальное (N_{max}), минимальное (N_{min}) и среднее (N_{av}) число отсчетов в каждом счетном канале по этой области. Значение дифференциальной неоднородности D_1 определялось как отношение максимального отклонения от

среднего во всей чувствительной области детектора:

$$D_1 = \max((N_{\max} - N_{\text{av}}), (N_{\text{av}} - N_{\min})) / N_{\text{av}}.$$

На рис. 4 показаны интегральные спектры, измеренные монитором по двум осям координат при равномерной засветке нейтронами входного окна. Видна значительная модуляция эффективности, особенно по оси Y , причины которой описаны в литературе [5]. Эта модуляция является главной причиной пространственной неоднородности эффективности монитора.

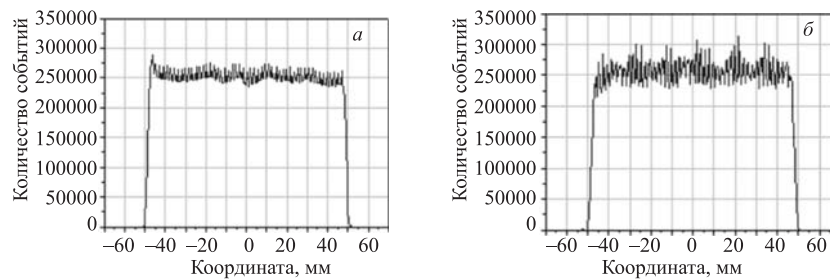


Рис. 4. Равномерная засветка детектора в рассеянном нейтронном пучке. *a)* Интегральный спектр по оси X ; *б)* интегральный спектр по оси Y . Напряжение + 2850 В; время измерения 1 ч 35 мин

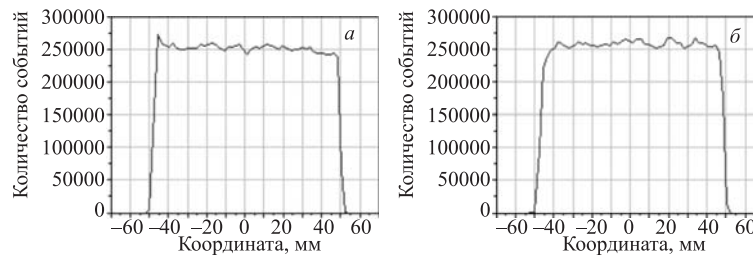


Рис. 5. Равномерная засветка детектора в рассеянном нейтронном пучке. *a)* Интегральный спектр по оси X ; *б)* интегральный спектр по оси Y . Напряжение + 2850 В. Цена деления канала увеличена в 4 раза. Время измерения 1 ч 35 мин

Подбирая параметры электроники, цену деления канала и меняя напряжение на аноде, неоднородность по оси Y можно понизить до уровня менее 5%. Модуляции по оси X обусловлены стробоскопическими эффектами при переходе от аналогового сигнала к цифровому и могут быть практически убраны с помощью увеличения цены канала (рис. 5).

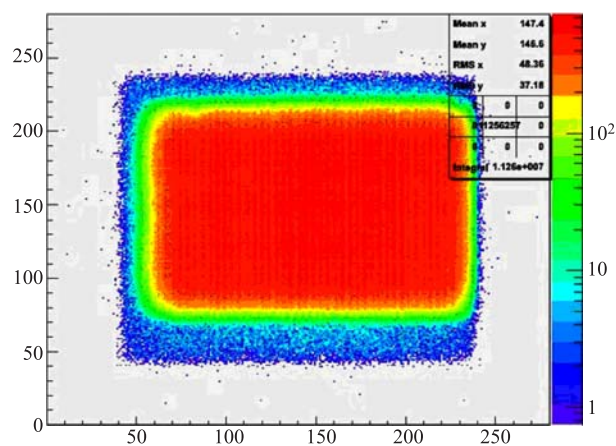


Рис. 6. Измерение профиля пучка № 10 реактора ИБР-2. Газовая смесь 50 мбар N_2 + 950 мбар CF_4 . Напряжение на аноде +3300 В. Время измерения 15 мин. Цена деления канала $\sim 0,5$ мм

Типичный двухкоординатный спектр, полученный на пучке № 10 реактора ИБР-2, приведен на рис. 6. Средняя загрузка детектора во время измерения составляла $2 \cdot 10^5$ нейтрон/с. Нейтронный поток от реактора имел импульсный характер, однако нижнюю границу пиковой загрузки можно оценить следующим образом. Измеренная полуширина теплового пика время-пролетного спектра нейтронов составляет 12 мс. Частота импульсов реак-

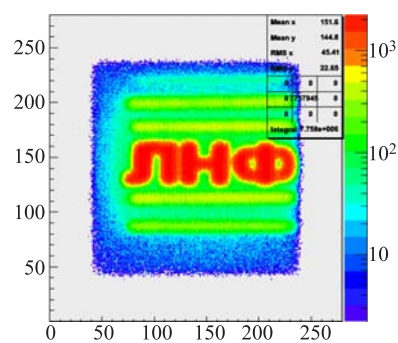
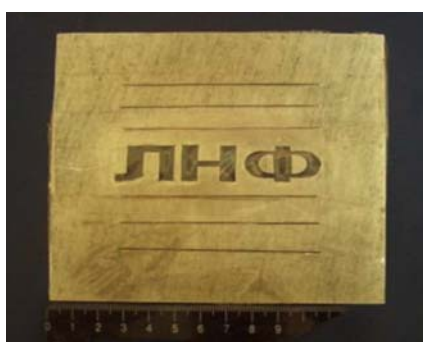


Рис. 7. Измерение засветки с кадмиевой маской «ЛНФ». Газовая смесь 50 мбар N_2 + 950 мбар CF_4 . Напряжение на аноде +3300 В. Время измерения 15 мин. Цена деления канала $\sim 0,5$ мм

тора 5 Гц, полная загрузка детектора $2 \cdot 10^5$ нейтрон/с. Таким образом, пиковая загрузка была не менее чем $2 \cdot 10^5 / (5 \cdot 2 \cdot 12 \cdot 10^{-3}) \approx 1,7 \cdot 10^6$ нейтрон/с. При этом эффективность монитора составляла $3 \cdot 10^{-2}$.

Для визуальной оценки работы детектора на рис. 7 показана кадмиевая маска с аббревиатурой Лаборатории нейтронной физики и ее образ, полученный с помощью детектора.

Современные источники нейтронов предъявляют требования контроля нейтронных потоков с интенсивностью до $10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Такая высокая интенсивность вызывает перегрузку детектора с гелиевым конвертером, помещенного в прямой пучок. В таких случаях в качестве конвертера может использоваться N_2 , сечение взаимодействия которого с тепловыми ($1,8 \text{ \AA}$) нейтронами составляет 1,9 б.

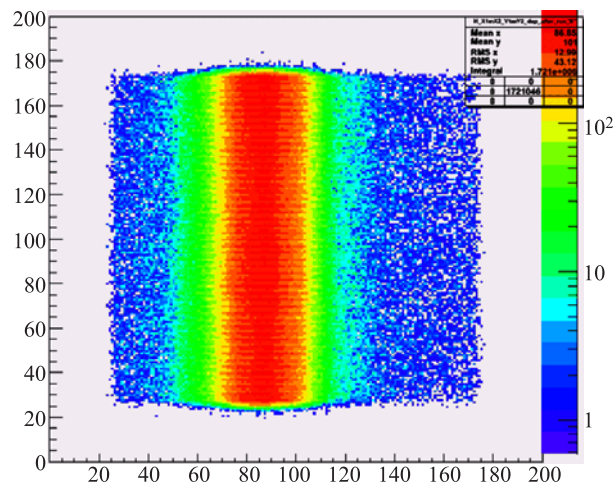


Рис. 8. Измерение профиля пучка бб реактора ИБР-2 (центральная часть). Газовая смесь 50 мбар N_2 + 950 мбар CF_4 . Напряжение на аноде +3400 В. Время измерения 14 ч 28 мин 48 с. Цена деления канала $\sim 0,64 \text{ мм}$

Характеристики детектора при заполнении 50 мбар N_2 + 950 мбар CF_4 были измерены на пучке бб реактора ИБР-2. При данном заполнении рабочее напряжение составляло +3400 В, координатное разрешение осталось практически неизменным. Эффективность монитора оценивается на уровне $\sim 5 \cdot 10^{-6}$. На рис. 8 приведен координатный спектр центральной части пучка бб.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Разработан и создан двухкоординатный позиционно-чувствительный монитор, предназначенный для измерения профиля нейтронных пучков в режиме реального времени как на стационарных, так и на импульсных источниках нейтронов. Конструктивные особенности монитора позволяют использовать его в самых разнообразных конфигурациях нейтронных спектрометров. Основные характеристики данного прибора приведены в таблице. Использование азота в качестве конвертера позволило получить рекордно низкую эффективность монитора, сохранив при этом требуемые параметры по однородности эффективности и разрешающей способности. В результате разработанный прибор может использоваться не только на самых высокопоточных нейтронных источниках, уже существующих в мире, но и на источниках следующего поколения, создаваемых в США (SNS) [6] и Японии (JPARC) [7].

Параметры 2D ПЧД-монитора тепловых нейтронов

Тип детектора	Двухмерный позиционно-чувствительный детектор низкой эффективности
Чувствительная область	100 × 100 мм
Эффективность	$10^{-2} - 10^{-6}$ (для нейтронов с длиной волны 1 Å, в зависимости от газовой смеси)
Координатное разрешение	4 × 4 мм
Загрузка	До 100 кГц (максимальная скорость счета, выше которой просчеты из-за нарушения адресации, мертвого времени и насыщения электроники превышают 10% от истинной скорости счета)
Однородность каналов	Не хуже 20% (без суммирования) и 5% (с суммированием)
Ослабление падающего пучка	Меньше 5%
Материал корпуса	Алюминий Д16Г
Входное окно	Алюминий 1 мм
Рабочий газ	³ He или N ₂ + CF ₄
Суммарное давление	1 атм
Предусилители:	
питание	12В, 90 мА
полярность входного сигнала	Положительная или отрицательная, $Z_{in} = 50$ Ом
полярность выходного сигнала	Отрицательная, $Z_{out} = 50$ Ом
разъем	BNC
Высокое напряжение	До + 3,5 кВ
Разъемы	MHV, BNC
Анод	Диаметр $d = 10$ мкм, шаг 2 мм
Катод	Диаметр $d = 50$ мкм, шаг 1 мм

Работа осуществлена при поддержке РФФИ (грант 04-02-17-391), ВМБФ (Германия) и госконтракта Министерства образования и науки 02.452.12.7025. В заключение авторский коллектив выражает благодарность докторам Ю. Нойхаусу и К. Зейтельхаку (ТУ, Мюнхен) за формулировку технических требований к монитору.

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://www.new.frm2.tum.de/>
2. <http://www.swagelok.com/>
3. *Levchanovski F. V. et al.* A PCI DAQ board for MWPC detectors with high-rate 2D delay line position readout // Nucl. Instr. Meth. A. 2004. V. 529. P. 413–416.
4. <http://nfdfn.jinr.ru/ibr-2/>
5. *Marmotti M. et al.* Two-dimensional position-sensitive detectors for high resolution diffraction with neutrons and high energy synchrotron radiation // Nucl. Instr. Meth. A. 2002. V. 477. P. 347–352.
6. <http://www.sns.gov/>
7. <http://j-parc.jp/index-e.html>

Получено 5 сентября 2006 г.

Редактор *Е. В. Сабеева*

Подписано в печать 15.11.2006.

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

Усл. печ. л. 0,56. Уч.-изд. л. 0,68. Тираж 315 экз. Заказ № 55548.

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/