

# Газонаполненные позиционно-чувствительные детекторы тепловых нейтронов в ПИЯФ РАН

© В.А. Андреев, Г.А. Ганжа, Е.А. Иванов, Д.С. Ильин, С.Н. Коваленко, М.Р. Колхидашвили, А.Г. Крившич, А.В. Надточий, В.В. Рунов, В.А. Соловей, Г.Д. Шабанов

Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова РАН,  
Гатчина, Ленинградская обл., Россия

E-mail: ilin@pnpi.spb.ru

В ПИЯФ РАН создана производственная база для разработки и создания позиционно-чувствительных детекторов тепловых нейтронов. В настоящее время построены три детектора с чувствительными областями:  $300 \times 170$  mm (опытный образец),  $200 \times 200$  и  $300 \times 300$  mm. Детекторы представляют собой многопроволочные пропорциональные камеры с катодным съемом данных на линию задержки. Приборы наполнены газовой смесью  ${}^3\text{He}/\text{CF}_4$ .

Детекторы предназначены для модернизации детекторных систем дифрактометров „Вектор“ и „Мембрана-2“ (реактор ВВР-М, ПИЯФ).

Работа поддержана государственным контрактом № 02.518.11.7036 и программой РАН „Нейтронные исследования конденсированной материи“.

## 1. Введение

Позиционно-чувствительный детектор (ПЧД) является одним из основных элементов любой установки малоуглового рассеяния нейтронов (SANS). В настоящее время в практике нейтрон-дифракционных экспериментов широко используются одно- и двухкоординатные газовые ПЧД, в которых конвертером нейтронов служат газы  $\text{BF}_3$  и  ${}^3\text{He}$ .

В настоящее время в ПИЯФ РАН активно ведутся работы по созданию детекторов тепловых нейтронов, которые в первую очередь будут установлены на дифрактометрах малоуглового рассеяния нейтронов „Вектор“ и „Мембрана-2“. Дифрактометр „Вектор“ предназначен для изучения физики магнитных критических явлений (пространственный масштаб структур  $40\text{--}1000$  Å). Дифрактометр „Мембрана-2“ используется для исследования надатомной структуры полимеров (пространственный масштаб структур  $20\text{--}1000$  Å).

Использование двухкоординатных детекторов в качестве базового элемента детекторных систем дифрактометров позволит получить следующие преимущества: 1) удастся расширить динамический диапазон переданных импульсов и существенно улучшить угловое разрешение; 2) появится принципиальная возможность изучения асимметрии рассеяния от физических объектов.

Параметры детекторов выбирались в соответствии со стандартными характеристиками данного типа ПЧД: пространственное разрешение  $2\text{--}4$  mm (FWHM), эффективность регистрации  $60\text{--}80\%$ , дифференциальная нелинейность  $< 10\%$ . Для создания детекторов с такими характеристиками потребовалось оптимизировать комплекс взаимосвязанных параметров конструкции, регистрирующей электроники и газовой смеси.

## 2. Конструкция и принцип работы

Конвертером тепловых нейтронов служит газ  ${}^3\text{He}$  и регистрация нейтронов происходит в соответствии с

ядерной реакцией



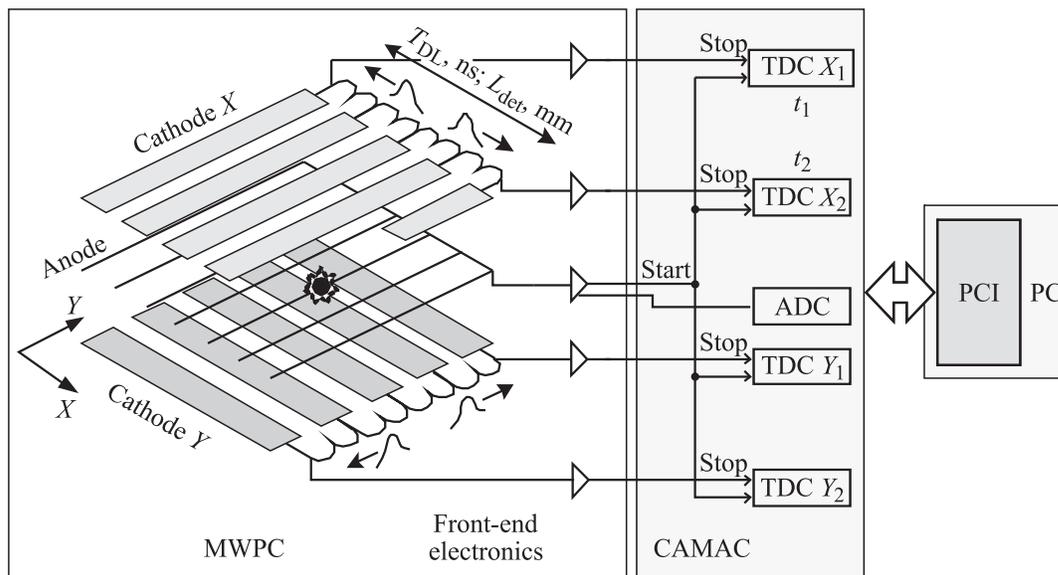
Выделяющаяся при взаимодействии энергия распределяется между протоном и тритоном  $E_p = 573$  keV,  $E_T = 191$  keV.

Заряженные частицы в чистом газе  ${}^3\text{He}$  имеют довольно большие пробеги, поэтому для ограничения пробега частиц и получения нужного пространственного разрешения в детектор добавлялся газ  $\text{CF}_4$ . Кроме того, газ  $\text{CF}_4$  выполняет функцию „гасящей“ добавки и не допускает распространения лавинного разряда вдоль анодных проволок, что стабилизирует работу детектора в целом.

Задача достижения максимальной эффективности регистрации нейтронов была одной из приоритетных при конструировании детекторов. С этой точки зрения газ  ${}^3\text{He}$  очень удобен, поскольку он имеет большое сечение захвата тепловых нейтронов:  $\sigma = 26\,400$  barn для нейтронов с длиной волны  $\lambda = 9$  Å.

Детекторы представляют собой многопроволочные пропорциональные камеры с двумя дрейфовыми промежутками (рис. 1). Стрипы катодных плоскостей  $X$  и  $Y$  ориентированы взаимно перпендикулярно для возможности регистрации двух координат. Стрипы, параллельные анодным проволокам, предназначены для измерения дискретной координаты  $X$ . Для измерения непрерывной координаты  $Y$  используются стрипы, расположенные перпендикулярно проволокам анода. Стрипы подсоединены к линии задержки (DL — delay line) с волновым сопротивлением  $R_{DL} = 100$  Ω.

В результате реакции  ${}^3\text{He}(n, p)T$  образуются протон и тритон, ионизирующие газ. Электроны первичной ионизации в виде облака зарядов дрейфуют к аноду и развивают вблизи него электронную лавину. На стрипах катодов  $X$  и  $Y$  появляются наведенные сигналы, по центру тяжести которых определяется координата лавины (рис. 1).



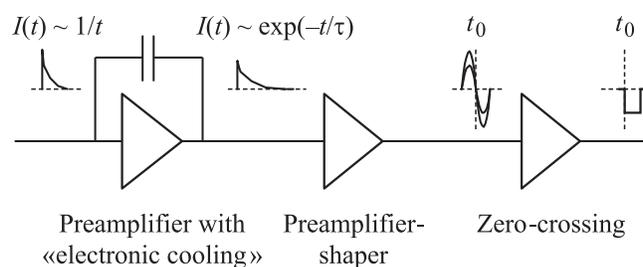
**Рис. 1.** Схема сбора информации с детектора. Показаны подключенные к стрипам линии задержки  $R_{DL} = 100 \Omega$ , предусилители  $R_{in} = 100 \Omega$ , преобразователи время-код (TDC) и преобразователь амплитуда-код (ADC). Временная задержка между соседними стрипами составляет  $\tau = 6 \text{ ns}$ . Дрейфовые катоды не показаны.

Сигналы с концов линии задержки поступают на предусилители (рис. 2), обеспечивающие формирование логических импульсов с временной привязкой, не зависящей от амплитуды входного сигнала. Входное сопротивление зарядочувствительных предусилителей согласовано с волновым сопротивлением линии задержки:  $R_{in} = R_{DL}$ .

Координата электронной лавины вычисляется по разности времен прихода импульсов на соответствующие преобразователи время-код

$$X = \left(1 - \frac{t_2 - t_1}{T}\right) \frac{L_{det}}{2}, \quad (2)$$

где  $t_1$  и  $t_2$  — время прихода сигналов на концы линии задержки,  $T$  — длина линии задержки (в ns),  $L_{det}$  — физическая длина детектора вдоль координаты X.



**Рис. 2.** Функциональная схема придетекторной электроники.

Координаты зафиксированной лавины имеют следующие особенности.

1) Координата Y, измеряемая в направлении вдоль анодных проволок, имеет непрерывный характер. Про-

Сводная таблица характеристик детекторов нейтронов

Характеристика детектора		300 × 170 mm (прототип)	200 × 200 mm	300 × 300 mm
Газовая смесь	Давление $^3\text{He}$ , atm	1.5	4	2
	Давление $\text{CH}_4$ , atm	2	2	2
Эффективность $\lambda$ , %		60 ( $9 \text{ \AA}$ )	70 ( $3 \text{ \AA}$ )	80* ( $9 \text{ \AA}$ )
Пространственное разрешение (FWHM), mm	Дискретная координата	4	2	2
	Непрерывная координата	2.5	1.5	1.5*
Внутреннее разрешение (FWHM), mm		$\leq 0.8$	$\leq 0.7$	$\leq 0.4$
Дифференциальная нелинейность, %		$\pm 5$	$\pm 10$	$\pm 5-7^*$
Энергетическое разрешение $\Delta E/E_{full}$ , %		15–20	20–40	20–40

\* Расчетные значения.

пространственное разрешение детектора по оси  $Y$  определяется размерами облака первичной ионизации и величиной внутреннего разрешения детектора.

2) Координата  $X$ , измеряемая в направлении, перпендикулярном проволокам анода, имеет дискретный характер. Пространственное разрешение детектора по оси  $X$  определяется расстоянием между анодными проволоками.

### 3. Детекторы тепловых нейтронов

3.1. Опытный образец. На первом этапе работы был создан опытный образец детектора нейтронов с чувствительной областью  $300 \times 170 \text{ mm}$  ( $X \times Y$ ) [1–3]. Детектор имеет следующие характеристики: эффективность регистрации 60% ( $\lambda = 9 \text{ \AA}$ ), пространственное разрешение  $\text{FWHM} \leq 2.5 \text{ mm}$  (вдоль непрерывной координаты  $Y$ ) и  $\text{FWHM} = 4 \text{ mm}$  (вдоль дискретной координаты  $X$ ), внутреннее разрешение детектора  $\text{FWHM} \leq 0.8 \text{ mm}$ , дифференциальная нелинейность  $\pm 5\%$ , энергетическое разрешение  $\Delta E_{\text{FWHM}}/E_{\text{full}} = 20\%$ .

На рис. 3 приведено изомерное изображение пучка нейтронов, полученное при измерении пространственного разрешения детектора.

3.2. Двухкоординатный детектор  $200 \times 200 \text{ mm}$ . С использованием накопленного опыта был создан двухкоординатный детектор с чувствительной областью  $200 \times 200 \text{ mm}$  с существенно улучшенными рабочими параметрами. В частности,

1) для улучшения пространственного разрешения расстояние между анодными проволоками уменьшено в 2 раза и составило 2 мм;

2) повышена механическая прочность газовой камеры, что дало возможность работать при давлениях газовой смеси до 7 атм. Это позволило получить высокую эффективность регистрации нейтронов с более короткими длинами волн ( $2\text{--}3 \text{ \AA}$ );

3) созданы специализированная придетекторная электроника и опытный образец электроники сбора информации в формате VME.

Детектор  $200 \times 200 \text{ mm}$  наполнен газовой смесью  $4 \text{ atm } ^3\text{He} + 2 \text{ atm } \text{CF}_4$  и имеет следующие характеристики: эффективность регистрации 70% ( $\lambda = 3 \text{ \AA}$ ), пространственное разрешение  $\text{FWHM} \leq 1.5 \text{ mm}$  (вдоль непрерывной координаты  $Y$ ) и  $\text{FWHM} = 2 \text{ mm}$  (вдоль дискретной координаты  $X$ ), внутреннее разрешение детектора  $\text{FWHM} \leq 0.7 \text{ mm}$ , дифференциальная нелинейность  $\pm 10\%$ , энергетическое разрешение  $\Delta E_{\text{FWHM}}/E_{\text{full}} = 30\%$ .

В ходе испытаний детектора на дифрактометре „Мембрана-2“ были получены координатные спектры от рассеивающих образцов фторопласта и пористого стекла Vусог (рис. 4–6). В первом случае наблюдалось рассеяние нейтронов на большой угол (характерный раз-

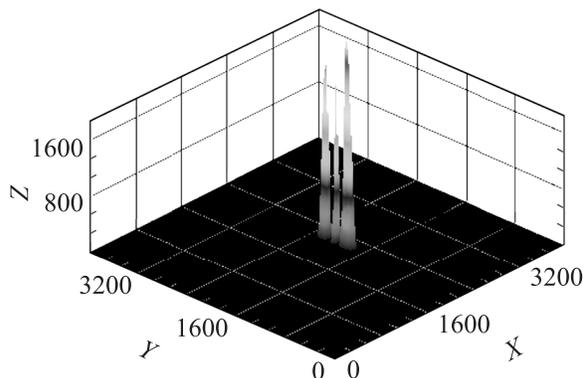


Рис. 3. Узкий пучок нейтронов  $d = 4 \text{ mm}$  (пик в центре), вырезанный из исходного пучка  $40 \times 10 \text{ mm}$ . Измерения проводились на дифрактометре „Вектор“. Оси на графике:  $X, Y$  — каналы TDC (1 мм = 12 каналов),  $Z$  — число событий.

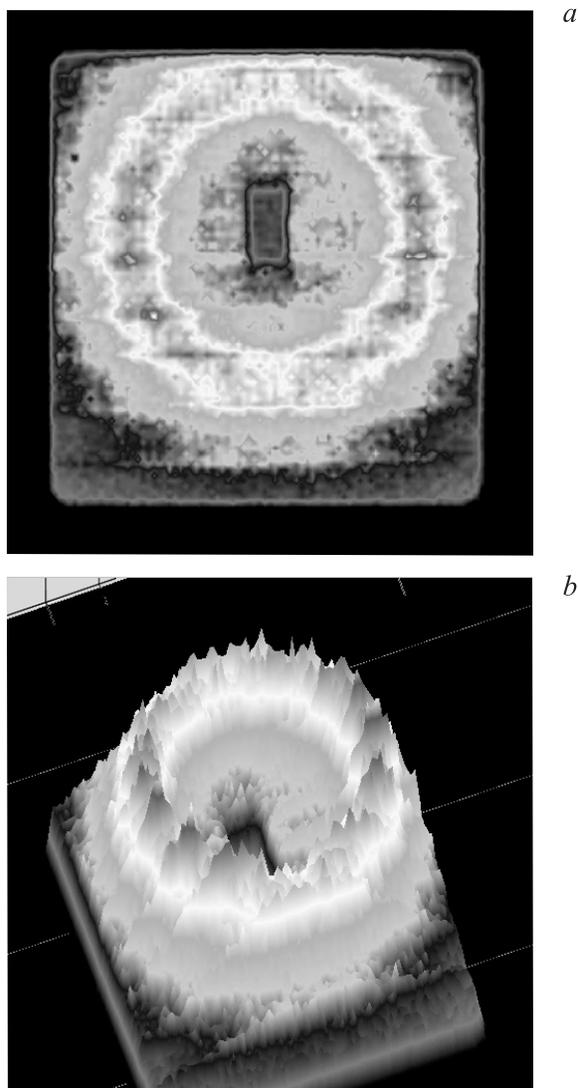
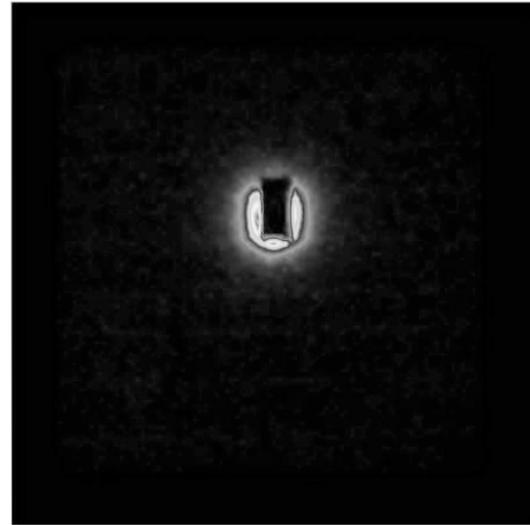


Рис. 4. а) Двумерный спектр рассеяния нейтронов ( $\lambda = 3 \text{ \AA}$ ) на образце фторопласта ( $\text{CF}_2$ )<sub>n</sub>. Расстояние образец–детектор 100 мм. Угол рассеяния  $\alpha \approx 32^\circ$ . б) Изомерное изображение.

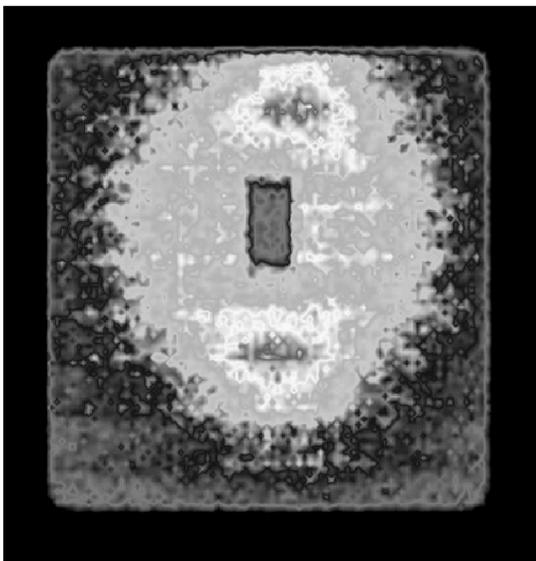
мер неоднородностей  $D \approx 2\pi/q = 5.5 \text{ \AA}$ ), во втором — рассеяние на малые углы ( $D \approx 100 \text{ \AA}$ ).

3.3. Двухкоординатный детектор  $300 \times 300 \text{ mm}$ . В настоящее время закончена работа по созданию детектора с апертурой  $300 \times 300 \text{ mm}$  и проводятся его испытания (рис. 7). Детектор наполнен газовой смесью  $2 \text{ atm } ^3\text{He} + 2 \text{ atm } \text{CF}_4$ . В конструкцию детектора были заложены следующие характеристики: эффективность регистрации  $70\text{--}80\%$  ( $\lambda = 9 \text{ \AA}$ ), пространственное разрешение  $\text{FWHM} = 1.5 \text{ mm}$  (вдоль непрерывной координаты  $Y$ ) и  $\text{FWHM} = 2 \text{ mm}$  (вдоль дискретной координаты  $X$ ).

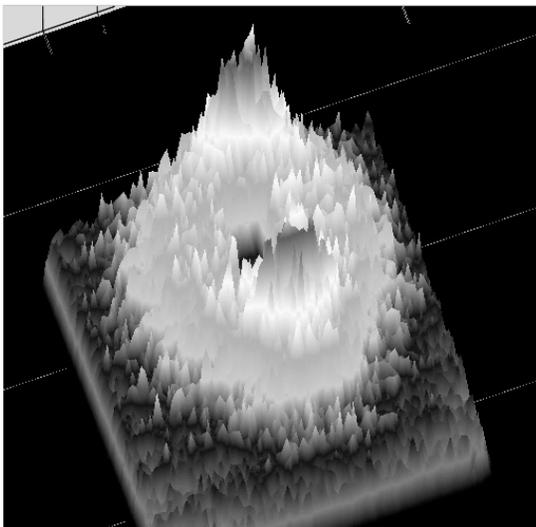
На данный момент измерены следующие характеристики детектора: внутреннее разрешение  $\text{FWHM} \leq 0.4 \text{ mm}$ , энергетическое разрешение  $\Delta E_{\text{FWHM}}/E_{\text{full}} = 30\%$ .



**Рис. 6.** Двумерный спектр рассеяния нейтронов ( $\lambda = 3 \text{ \AA}$ ) на образце пористого стекла Vycor. Расстояние образец-детектор  $300 \text{ mm}$ .

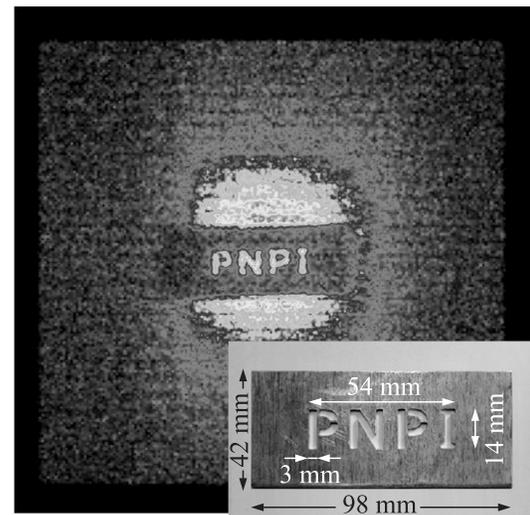


*a*



*b*

**Рис. 5.** *a*) Двумерный спектр рассеяния нейтронов ( $\lambda = 3 \text{ \AA}$ ) на вытянутом в горизонтальном направлении образце фторопласта  $(\text{CF}_2)_n$ . Расстояние образец-детектор  $100 \text{ mm}$ . *b*) Изометрическое изображение.



**Рис. 7.** Двумерный спектр, полученный при облучении рассеянным пучком нейтронов (источник  $\text{Cf-252}$ ) пластины кадмия с надписью PNPI.

#### 4. Заключение

В ПИЯФ РАН в Отделении физики высоких энергий на базе отдела трековых детекторов создана производственная линия по изготовлению детекторов тепловых нейтронов. В настоящее время построено три детектора (см. таблицу).

Детекторы нейтронов с чувствительными областями  $300 \times 300$  и  $200 \times 200 \text{ mm}$  будут установлены на дифрактометры „Вектор“ и „Мембрана-2“ после соответствующей модернизации измерительных трактов установок.

Существующая технологическая база позволяет создавать детекторы нейтронов с большей чувствительной

областью и лучшим пространственным разрешением. Возможно создание изогнутых детекторов, радиус изгиба которых определяется геометрическими параметрами экспериментальных установок.

## Список литературы

- [1] V. Andreev, G. Ganzha, D. Ilyin, E. Ivanov, S. Kovalenko, A. Krivshich, A. Nadtochy, V. Runov. Nucl. Instr. Meth. A **581**, 123 (2007).
- [2] В.А. Андреев, Е.А. Иванов, Д.С. Ильин, С.Н. Коваленко, А.Г. Крившич, А.В. Надточий, В.В. Рунов. Изв. РАН. Сер. физ. **72**, 7, 1059 (2008).
- [3] В.А. Андреев, Г.А. Ганжа, Е.А. Иванов, Д.С. Ильин, С.Н. Коваленко, А.Г. Крившич, А.В. Надточий, В.В. Рунов. Препринт ПИЯФ № 2780. Гатчина (2008). 24 с.