

ОДНОМЕРНЫЙ МОНИТОР МЕДЛЕННЫХ НЕЙТРОНОВ НА ОСНОВЕ ПЛОСКОЙ РЕЗИСТИВНОЙ КАМЕРЫ С $^{10}\text{B}_4\text{C}$

*М. О. Петрова^{а, б, 1}, А. А. Богдзель^а,
В. И. Боднарчук^{а, б}, Е. И. Литвиненко^а*

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 141980, Россия

^б Государственный университет «Дубна», Дубна, 141980, Россия

Создание нейтронных источников нового поколения, а также дефицит ^3He стимулируют создание детекторов медленных нейтронов на основе твердотельных конвертеров. В работе представлены результаты измерений позиционно-чувствительного детектора медленных нейтронов на основе плоской резистивной камеры с лабораторным источником ^{252}Cf . Детектор представляет собой гибридную плоскопараллельную резистивную камеру с газовым промежутком 249 мкм и расположенную в нем пленку-конвертер из карбида бора, обогащенную ^{10}B .

The development of next-generation neutron sources and the scarcity of ^3He have led to the production of slow neutron detectors based on solid-state converters. This paper presents the results of measurements of a position-sensitive slow neutron detector based on resistive plate chamber and a ^{252}Cf laboratory source. The detector is a hybrid resistive plate chamber with a 249- μm gas gap and a boron carbide converter film enriched with ^{10}B .

PACS: 29.40.Gx

ВВЕДЕНИЕ

В работах [1, 2] рассмотрены архитектура и результаты Монте-Карло моделирования детектора медленных нейтронов на основе плоской резистивной камеры с пленкой-конвертером $^{10}\text{B}_4\text{C}$. Ряд особенностей, которыми обладают плоские резистивные камеры, наделяет их определенными преимуществами при создании детекторов, такими как нечувствительность к магнитным полям, механизм защиты от внутреннего разряда, высокая модульность и масштабируемость, а также низкая стоимость на единицу площади [3, 4]. В силу работы плоских резистивных камер в проточном режиме отпадает необходимость в толстом входном окне, что открывает возможность регистрации холодной ($> 10 \text{ \AA}$) части спектрального распределения нейтронного потока. Уникальное сочетание характеристик делает этот тип детекторов

¹E-mail: mbelova@jinr.ru

отличным кандидатом для создания систем регистрации пространственного распределения рассеянных нейтронов для станций нейтронного рассеяния, для национальной безопасности и геологии. В этой статье представлены результаты измерений гибридной плоской резистивной камеры с лабораторным источником ^{252}Cf .

КОНСТРУКЦИЯ ДЕТЕКТОРА

Созданный детектор представляет собой гибридную плоскую резистивную камеру, ее структура показана на рис. 1.

Детектор работает в проточном режиме при прокачке $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$ (фреона R-134a); отсутствие гасящих и электроотрицательных добавок, обычно используемых в плоских резистивных камерах для предотвращения стримеров, обусловлено тем, что детектор работает в области напряженности поля, где газовое усиление значительно меньше условия Рётера. В качестве формирующих электродов в данном детекторе используется термополированное стекло толщиной 280 мкм, с геометрическими размерами 75×150 мм. Такой выбор материала обусловлен несколькими факторами: во-первых, объемное сопротивление $10^{10} - 10^{13}$ Ом·см обеспечивает возможность индукции сигнала на считывающие электроды, во-вторых, способ изготовления термополированного стекла обуславливает шероховатость его поверхности менее 1 нм, что обеспечивает высокую однородность электрического поля в газовом промежутке. При создании детектора в ЛНФ ОИЯИ в качестве конвертера использовалась пленка $^{10}\text{B}_4\text{C}$ толщиной 2 мкм, нанесенная в ESS Detector Coatings Workshop в Университете Линчепинга с помощью магнетрона постоянного тока Chewbacca CemeCon CC800/9 при температуре 400°C на всю площадь стекла. Ширина газового промежутка составляет 249 мкм, однородность ширины газового промежутка обеспечивает натянутая монофиламентная леска (спейсер). Высокое напряжение подается на алюминиевую фольгу толщиной 50 мкм, с геометрическими размерами 95×170 мм. Электрическое поле в рабочем объеме формируют заземленное стекло, содержащее $^{10}\text{B}_4\text{C}$, и алюминиевая фольга, расположенная под термополированным стеклом относительно газового промежутка, на которую подается напряжение. Заземление стекла обеспечивается медной полоской, которая приклеена с другой стороны относительно $^{10}\text{B}_4\text{C}$ к термо-

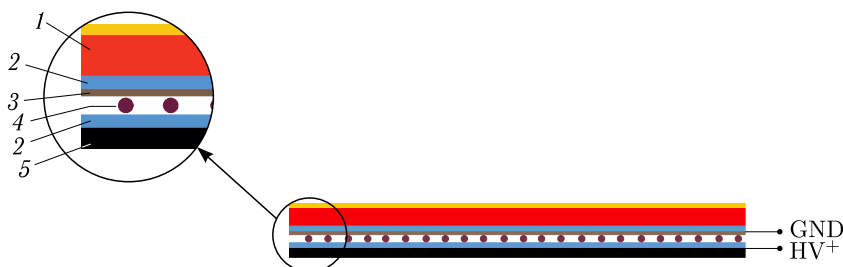


Рис. 1. Структура плоской резистивной камеры для регистрации медленных нейтронов: 1 — печатная плата со стрипами; 2 — термополированное стекло; 3 — карбид бора; 4 — спейсер; 5 — алюминиевая фольга

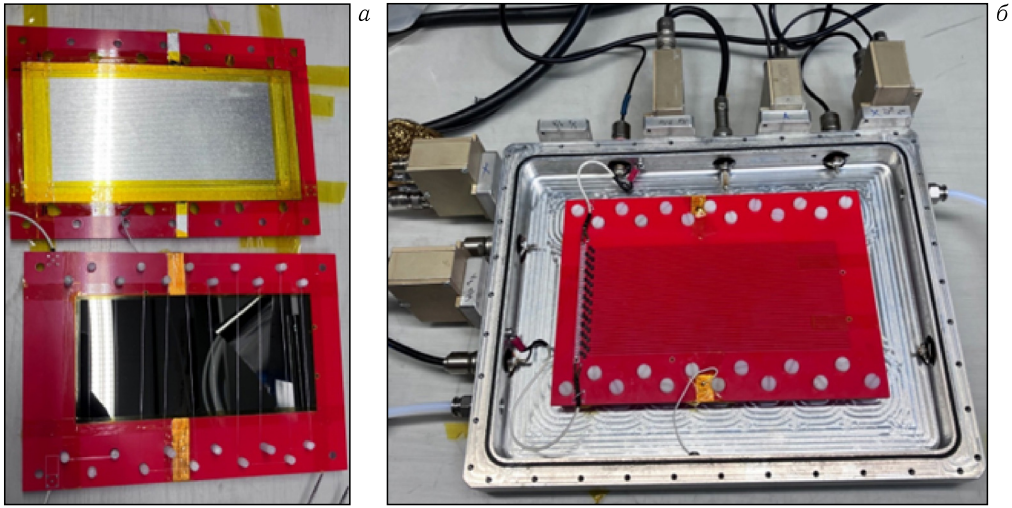


Рис. 2. Внешний вид формирующих (слева) и считывающих (справа) электродов

полированному стеклу на проводящую эмаль. На другом конце медной полоски смонтирован кабель МГТФ 0,5, содержащий лепесток. Лепесток зафиксирован винтом $M3 \times 12$ на корпусе детектора, который соединен с земляной шиной измерительной комнаты. Наличие неоднородностей на поверхности фольги, обусловленных прокатным способом изготовления, приводит к росту дифференциальной неоднородности поля в газовом промежутке, наличие стекла поверх алюминия сглаживает выбросы в профиле напряженности, обусловленные дефектами поверхности металла. Неоднородность поля, из-за краевых эффектов листа алюминия, «вынесена» из рабочего объема — фольга превышает геометрические размеры стекла на 1 см с каждой стороны. Этого оказалось достаточно для подавления выбросов на краях позиционной картины. В качестве считывающих электродов выступают стрипы шириной 1,8 мм, с расстоянием между ними 0,2 мм, расположенные на печатной плате и подключенные к линии задержки. Для линии задержки (ЛЗ) использовались катушки 95 нГн и конденсаторы 39 пФ фирмы Murata. Внешний вид внутренней части детектора представлен на рис. 2.

СИСТЕМА СБОРА ДАННЫХ

Как уже было сказано выше, в детекторе реализована линия задержки. Она призвана сократить количество каналов регистрации, принцип действия ЛЗ представлен на рис. 3 [5].

При движении лавины в газовом промежутке происходит ЭМ-индукция на анод и стрипы. Определение координаты взаимодействия нейтрона с ^{10}B происходит по разности времени прихода сигналов на концы линии задержки относительно анода. В качестве DAQ системы использовались: аналоговые предусилители, выполненные по трехкаскадной схеме в НЭОКС ЛНФ ОИЯИ с $K = 800$ для анода и $K = 1200$ для ЛЗ, промышленный диджитайзер CAEN N6730 и ПО CoMPASS. Данная модель

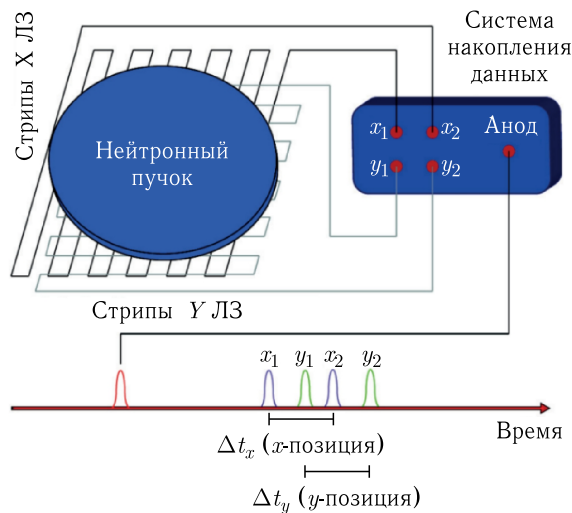


Рис. 3. Принцип действия линии задержки

диджитайзера обладает прошивкой DPP-PSD [6], которая позволяет анализировать форму поступающих сигналов по величине PSD. PSD — параметр разделения сигналов по форме импульса (PSD — pulse shape discrimination), диджитайзер анализирует заряд в коротком и длинном окнах, вычисляет величину для PSD каждого события:

$$\text{PSD} = \frac{Q_{\text{long}} - Q_{\text{short}}}{Q_{\text{long}}}. \quad (1)$$

СоMPASS записывает измеренные данные как в виде аппаратного буфера сырых данных, так и в файлы формата ROOT поканально.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТЕКТОРА

Определение характеристик детектора проводилось с использованием лабораторного источника ^{252}Cf ($\Phi = 1,1 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$ в 4π), помещенного в полиэтиленовый замедлитель толщиной 10 см. Детектор работает в проточном режиме, скорость подачи тетрафторэтана составляет $3 \text{ см}^3/\text{мин}$, перед началом измерений детектор продувается 5–8 ч. Счетная характеристика детектора, расположенного вплотную к замедлителю, представлена на рис. 4.

Середина плато счетной характеристики составила 2300 В, данное напряжение было выбрано в качестве рабочего, зарядовые спектры сигналов, полученные при измерениях фоновых событий и лабораторного источника ^{252}Cf , представлены на рис. 5.

В силу чувствительности плоской камеры к космическому излучению, а также наличию фотоэффекта, протекающего на алюминиевой фольге, невозможно разделить сигналы от различных видов излучения по амплитуде, в связи с чем было необходимо разработать методику отбора нейтронных событий, учитывающую особенности созданного детектора. Классическим методом выделения нейтронных событий для де-

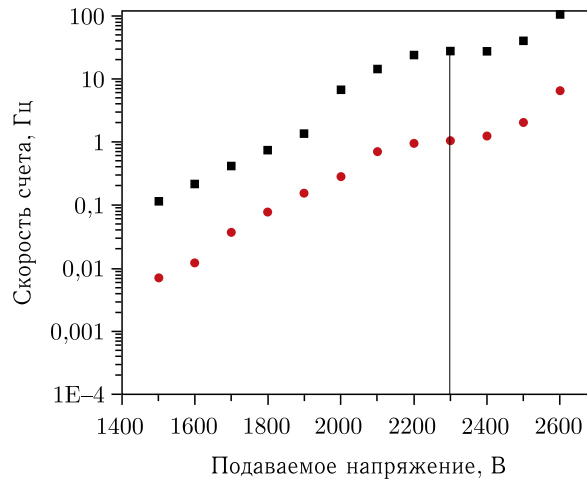


Рис. 4. Счетная характеристика плоской резистивной камеры с $^{10}\text{B}_4\text{C}$: кружки — при измерении фоновых событий, квадраты — при измерении ^{252}Cf

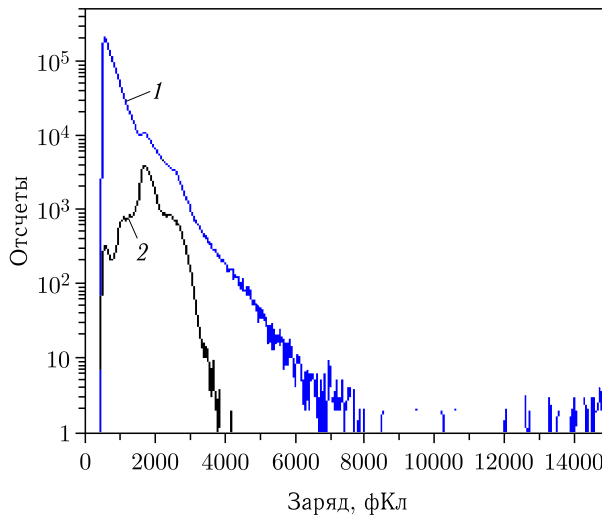


Рис. 5 (цветной в электронной версии). Зарядовые спектры зарегистрированных событий: синий (1) — ^{252}Cf , черный (2) — фон

текторов на ЛЗ является выделение коридора значений суммы времен прихода сигналов на оба конца линии задержки [7]. Другой широко распространенный метод отбора событий, реализуемый в нейтронных детекторах, заключается в выделении нейтронных событий по величине PSD [8–11]. Для построения нейтронных событий из сырых измеренных данных от данного детектора используется 64-битная версия программы ExDigConvertor. Данная программа является развитием программы ExDigDemo [12], которая формирует из сырых данных списки нейтронных событий в формате ROOT,

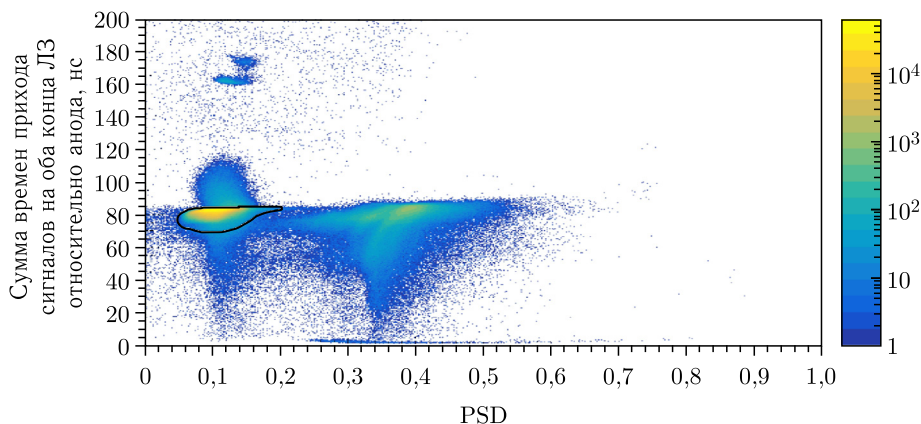


Рис. 6. Распределение суммы времен прихода сигналов на оба конца ЛЗ относительно анода в зависимости от PSD анода

содержащие все параметры, записываемые диджитайзером. Для отбора событий в созданном детекторе предлагается использовать распределение «сумма времен прихода сигналов на оба конца ЛЗ относительно анода: PSD» (рис. 6).

Как видно из рис. 6, по отдельности методы выделения коридора по сумме времени прихода сигналов на оба конца ЛЗ или по PSD не обеспечили бы надежное выделение нейтронных событий. Результаты выделения нейтронных событий по распределению SUM : PSD представлены на рис. 7.

Распределение суммы в зависимости от разности времен прихода сигналов на оба конца ЛЗ является наиболее информативным, так как в методе определения позиции с ЛЗ разность времен прихода сигналов относительно анода фактически является позицией. На рис. 7, в видно, что использование ката позволяет без потери нейтронных событий почистить распределение от выбросов, вызванных не нейтронными событиями. Временное разрешение в данном типе детектора принимается как ширина на половине высоты (ПШПВ) суммы времен прихода сигнала на оба конца ЛЗ. После выделения нейтронных событий сумма времен прихода на оба конца ЛЗ относительно анода составила $(82,55 \pm 0,31)$ нс, а ПШПВ $(2,68 \pm 0,02)$ нс.

Определение эффективности регистрации медленных нейтронов было проведено относительным способом со счетчиком на основе ^3He «Гелий-18/80-3,0/Л» [13] научно-производственной фирмы «Консенсус», который был закрыт кадмиевым фильтром с окошком 1 см^2 и помещен в ту же позицию, что и при измерениях, представленных на рис. 6. Эффективность детектора, с учетом площади, составила 1,88 %. Данная величина определена с ошибкой порядка 100 %, так как плотность потока медленных нейтронов неоднородна по чувствительной площади детектора в силу того, что лабораторный источник является изотропным. Пространственное разрешение реализованного прототипа определялось путем измерения кадмиевой маски толщиной 1,5 мм, которая содержит 5 щелей шириной 1 мм, с шагом 1 см. В процессе измерения детектор располагался на расстоянии 30 см от поверхности пластикового прямоугольного замедлителя лабораторного источника (рис. 8, а). Результаты измерений представлены на рис. 8, б и в таблице.

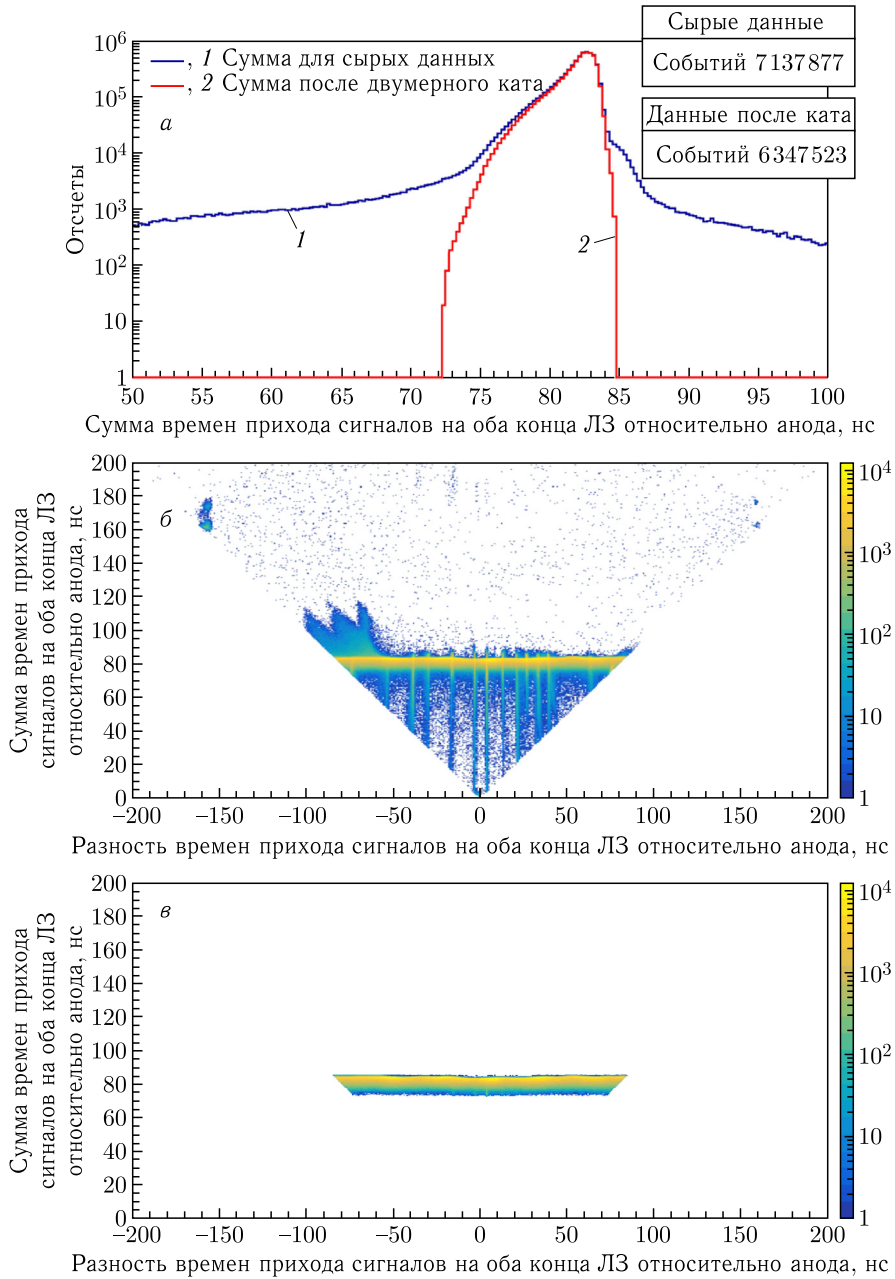


Рис. 7. *а*) Сумма времен прихода сигналов на оба конца ЛЗ: синим цветом (1) показаны сырые данные, красным (2) — события после ката; *б*) распределение суммы времен прихода сигналов на оба конца ЛЗ в зависимости от их разности для сырых данных; *в*) распределение суммы времен прихода сигналов на оба конца ЛЗ в зависимости от их разности для нейтронных событий

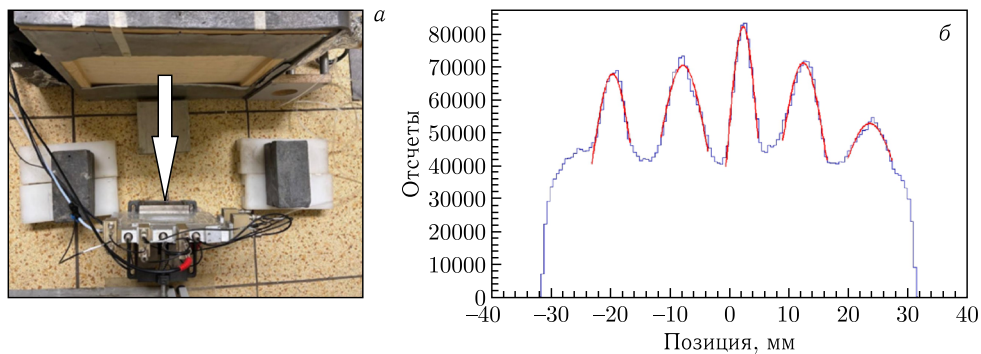


Рис. 8. а) Расположение детектора относительно окна замедлителя; б) результаты измерений 10В-ППРК кадмиевой маски, содержащей пять щелей шириной 1 мм, с катод SUM/PSD

Результаты фитирования пиков, полученных при измерении кадмиевой маски

Параметр	Значение				
Положение, мм	$-19,48 \pm 0,07$	$-7,72 \pm 0,09$	$2,46 \pm 0,03$	$12,49 \pm 0,07$	$23,71 \pm 0,09$
Стандартное отклонение, мм	$3,43 \pm 0,14$	$4,34 \pm 0,18$	$2,43 \pm 0,06$	$3,83 \pm 0,13$	$5,44 \pm 0,27$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен одномерный детектор медленных нейтронов, определены его рабочие параметры. Благодаря низкой эффективности регистрации при нормальном падении пучка и малому рассеивающему объему данный детектор подойдет для мониторингирования прямых пучков. Повышения эффективности регистрации медленных нейтронов при использовании пленок-конвертеров $^{10}\text{B}_4\text{C}$ можно достичь либо путем расположения плоскости с пленкой-конвертером под скользящим углом к падающему пучку, либо увеличением количества пленок-конвертеров. В обоих случаях реализованный детектор может выступать единичным модулем при создании высокоэффективных детекторов. Также хотелось бы отметить, что подача напряжения на алюминиевую фольгу не является оптимальным способом, наилучшая однородность электрического поля обеспечилась бы нанесением пленки алюминия толщиной порядка единиц микрометров на поверхность термополированного стекла. Помимо этого, такой подающий электрод снизит толщину рассеивающих объемов, что является важным параметром при создании высокоэффективного детектора тепловых и холодных нейтронов. Данная работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках соглашения № 075-10-2025-153 от 5 июня 2025 г. (внутренний номер 15.СИН.25.12) и гранта ОМУС ОИЯИ № 25-402-04.

Конфликт интересов. Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Petrova M. O., Bogdzel' A. A., Bodnarchuk V. I., Daulbaev O., Milkov V. M., Kurilkin A. K., Bulatov K. V., Dmitriev A. V., Babkin V. A. Resistive Plate Chamber as a Thermal Neutron

- Detector Based on a ^{10}B Converter // J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech. 2023. V. 17, No. 4. P. 881–885.
2. Петрова М. О., Антонов С. В., Боднарчук В. И. Изучение параметров детектора тепловых нейтронов на основе ^{10}B -ППРК методом Монте-Карло // Прикл. физика и математика. 2023. Вып. 6. С. 1282.
 3. Cardarelli R. et al. Performance of a Resistive Plate Chamber Operating with Pure CF_3Br // Nucl. Instr. Meth. A. 1993. V. 333. P. 399–403.
 4. Blin S. et al. // J. Instrum. 2010. V. 5. P. C12007.
 5. <https://www.surface-concept.com/downloads/info/delaylinedetectors.pdf>.
 6. Caen User Manual UM5960, CoMPASS: Multiparametric DAQ Software for Physics Applications. Rev. 20. 2022.
 7. Levchanovski F. V., Gebauer B., Litvinenko E. I., Nikiforov A. S., Prikhodko V. I., Schulz Ch., Wilpert Th. A PCI DAQ Board for MWPC Detectors with High-Rate 2D Delay Line Position Readout // Nucl. Instr. Meth. A. 2004. V. 529, No. 1–3. P. 413–416.
 8. Chepurinov A. S., Kirsanov M. A., Klenin A. A., Klimanov S. G., Kubankin A. S. Digital Pulse Shape Discrimination between Fast Neutrons and Gamma Rays with Para-Terphenyl Scintillator // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 934, No. 1. P. 012057.
 9. Zaitseva N., Glenn A., Paul Martinez H., Carman L., Paweczak I., Faust M., Payne S. Pulse Shape Discrimination with Lithium-Containing Organic Scintillators // Nucl. Instr. Meth. A. 2013. V. 729. P. 747–754.
 10. Vuong P. Q., Kim H. J., Khan A., Khan S., Kim S. H., Park H., Kim J. Silver-Doped LiI Crystal: A Sensitive Thermal Neutron Detector with Pulse Shape Discrimination // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2020. V. 67, No. 10. P. 2290–2294. 174.
 11. Balmer M. J., Gamage K. A., Taylor G. C. Comparative Analysis of Pulse Shape Discrimination Methods in a ^6Li Loaded Plastic Scintillator // Nucl. Instr. Meth. A. 2015. V. 788. P. 146–153.
 12. Litvinenko E. I., Bogdzal A. A. Algorithms and Programs for Express-Analysis of List-Mode Data of Neutron Scattering, Measured on Two-Dimensional Position-Sensitive Detectors with a Delay Line Using Data Acquisition Systems Based on CAEN Digitizers // Phys. Part. Nucl. Lett. 2022. V. 19, No. 3. P. 241–248.
 13. <https://consensus-group.ru/images/ip/counters/docs/Helium-18-80-3,0-L.pdf>.

Получено 31 января 2025 г.