

УДК 538.9:621

ДЕТЕКТОР ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ ТИПА ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РЕЗИСТИВНАЯ КАМЕРА НА ОСНОВЕ КОНВЕРТЕРА В-10

© 2023 г. М. О. Петрова^{a, b, *}, А. А. Богдзель^a, В. И. Боднарчук^{a, b, d}, О. Даулбаев^{a, c}, В. М. Милков^a, А. К. Курилкин^a, К. В. Булатов^a, А. В. Дмитриев^a, В. А. Бабкин^a

^aОбъединенный институт ядерных исследований, Дубна, 141980 Россия

^bГосударственный университет “Дубна”, Дубна, 141980 Россия

^cИнститут ядерной физики, Алматы, 050032 Казахстан

^dНациональный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, 123182 Россия

*e-mail: mbelova@jinr.ru

Поступила в редакцию 18.09.2022 г.

После доработки 24.12.2022 г.

Принята к публикации 24.12.2022 г.

Нейтроннографические методы исследования конденсированных сред позволяют получать информацию о внутренней структуре и динамике изучаемого объекта. Создание новых высокопоточных источников нейтронов для изучения перспективных материалов и различных биологических систем предъявляют особые требования к рабочим параметрам детекторных систем. Новые поколения позиционно-чувствительных детекторов тепловых нейтронов должны иметь рекордные характеристики по пространственному и временному разрешению при высокой эффективности регистрации. В рамках поиска новых решений для реализации детекторных систем станций нейтронного рассеяния в работе обсуждается возможность применения и предполагаемые рабочие характеристики ¹⁰B-ППРК для регистрации тепловых нейтронов.

Ключевые слова: позиционно-чувствительные детекторы тепловых нейтронов, магнетронное напыление тонких пленок В₄С, плоскопараллельная резистивная камера, газовые детекторы, альтернативы ³He.

DOI: 10.31857/S1028096023080113, EDN: OВJICK

ВВЕДЕНИЕ

Нейтронное излучение широко применяется для исследования конденсированных сред в силу своей высокой проникающей способности, наличию магнитного момента и различию амплитуд рассеяния нейтрона на ядрах разных элементов и изотопов. Одной из основных частей любой нейтроннографической исследовательской установки является детекторная система. Наиболее применяемыми детекторами тепловых нейтронов в экспериментальных установках современных исследовательских центров являются сцинтилляционные детекторы на основе конвертера ⁶Li в составе ND-экранов или стекол [1–3] и проволочные газонаполненные камеры на основе ³He [4, 5].

Большая часть экспериментальных установок используют детекторы с конвертером в виде газа ³He под давлением 5–15 атм [6–9]. Высокое рабочее давление многопроволочной пропорциональной камеры (МППК) не позволяет эксплуатировать детекторы с тонким входным окном (менее единиц миллиметра), что в силу зависимости сечения неупругого взаимодействия как 1/v приво-

дит к значительному ослаблению потока и снижению эффективности регистрации холодной части спектра нейтронов.

Одним из перспективных типов детекторов, появившихся в 80-х годах прошлого столетия [10], плоскопараллельные резистивные камеры (ППРК) нашли широкое применение в физике высоких энергий благодаря своим рабочим характеристикам и возможности создания детекторов большой площади (>100 м²) [11–15]. Современные методы создания пленок позволяют наносить тонкие слои конвертера на поверхности электродов [16–18] и применять ППРК для регистрации нейтронов. Временное разрешение МППК составляет десятки наносекунд [19], а у ППРК сотни пикосекунд [20], что позволит использовать детектор тепловых нейтронов на основе ППРК на нейтронных источниках нового поколения с плотностями потоков тепловых и холодных нейтронов, превышающими существующие значения потоков на эксплуатируемых источниках на порядок и более.

Качество полученных данных экспериментов по дифракции и отражению нейтронного излучения зависит от пространственного, временного

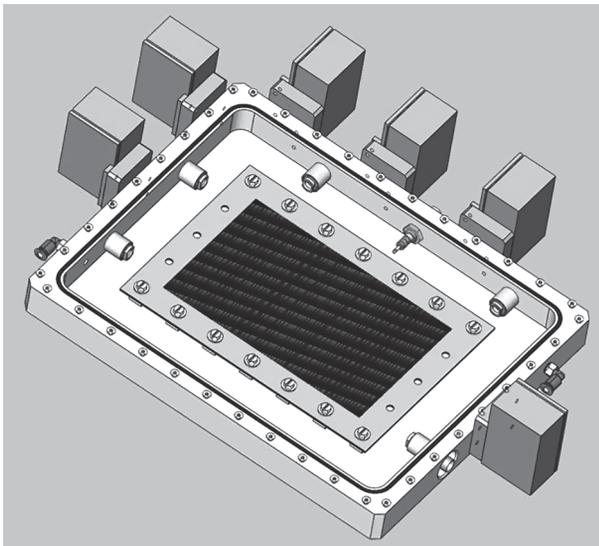
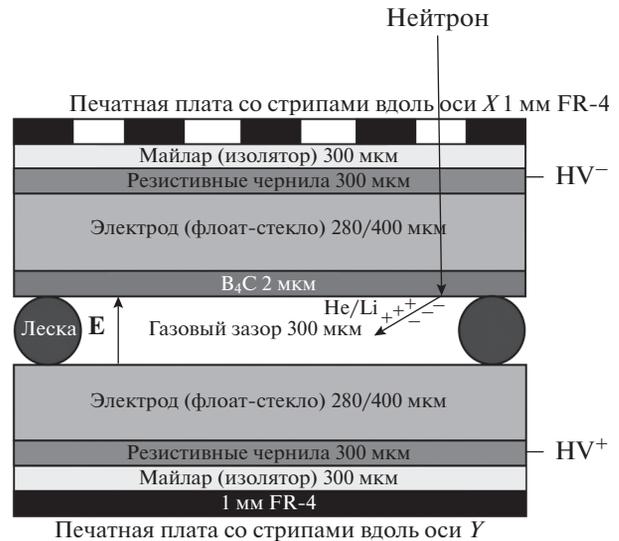


Рис. 1. ППК для регистрации тепловых нейтронов.



разрешения и эффективности регистрации детектора, используемого в экспериментальной установке. Это вызывает постоянное развитие детекторных технологий в направлении улучшения пространственного, временного разрешения детекторов и увеличения площади регистрирующей поверхности для охвата как можно большего телесного угла.

Применение ^{10}B -ПППК для регистрации холодных и тепловых нейтронов позволит улучшить, по сравнению с ^3He МППК, пространственное разрешение до долей миллиметра [21], временное разрешение до сотен пикосекунд, а возможность создания многослойной структуры может обеспечить эффективность регистрации холодных нейтронов до 60% [22].

ТОПОЛОГИЯ И ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ДЕТЕКТОРА

Создаваемый детектор представляет собой плоскопараллельную резистивную камеру с тонкой пленкой-конвертером из карбида бора, нанесенной магнетронным распылением постоянного тока на подложку из термополированного стекла (рис. 1).

Топология детектора включает в себя: два электрода, изготовленных из термополированного стекла; резистивные чернила на внешней части электродов; тонкую пленку конвертера, обогащенную изотопом ^{10}B на >95%; печатные платы со считывающими стрипами; изолятор, разделяющий проводящую краску под высоким напряжением и считывающую плату; спэйсер — монофиламентная леска, обеспечивающая постоянность зазора между электродами.

Создаваемая ^{10}B -ПППК содержит рабочий газовый объем, образованный резистивными электродами, изготовленными из термополированного стекла, с объемным сопротивлением 10^{10} – 10^{13} Ом · см, обеспечивающие равномерность газового промежутка и электрического поля в рабочем объеме. Размеры электродов составляют 75×150 мм². На катоде, во всю площадь электрода, располагается конвертер толщиной 2 мкм. Для обеспечения электростатического поля, достаточного для развития электронной лавины, электроды с внешней стороны, относительно газового промежутка, покрываются проводящей краской, на которую подается требуемое напряжение. Такой слой является прозрачным для наведения сигнала на считывающие стрипы.

Продукты реакции конверсии, выходя из пленки в газовый зазор, рождают кластеры (электронно-ионные пары $e-I$) первичной ионизации. Под действием приложенного поля электроны и ионы начинают двигаться и ускоряться, испытывая упругие и неупругие соударения с молекулами газовой смеси. Каждый первичный кластер вызывает рождение лавины, если движется в достаточно сильном электрическом поле. Но на рождение и развитие лавины влияет не только электрическое поле и ширина зазора, но и состав газовой смеси, которая определяет первый ионизационный потенциал, радиационную длину, количество кластеров первичной ионизации и эффективные коэффициенты Таунсенда.

Однако на амплитуду сигнала влияют не только характеристики газового разряда, но также импеданс считывающих электродов, а значит их геометрические параметры и используемый материал.

Согласно теореме Шокли–Рамо заряд Q , движущийся между обкладками конденсатора со скоростью v , перпендикулярный плоскостям об-

кладок, наводит в его внешней цепи, не обладающей ни индуктивностью, ни активным сопротивлением, прямоугольный импульс электрического тока I [23]:

$$I = \frac{Qv}{d}, \quad (1)$$

где d – расстояние между обкладками конденсатора (рис. 2).

Формула (1) характеризует ток переноса заряда частицы на одной из обкладок конденсатора, который при наличии сопротивления, распределяется между током обратного смещения конденсатора и током внешней цепи:

$$I = I_{\text{осм}} + I_{\text{ц}}, \quad (2)$$

где $I_{\text{осм}}$ – ток обратного смещения, обусловленный возникновением не статического электрического поля при движении заряда, равный:

$$I_{\text{осм}} = \frac{\varepsilon S dE}{4\pi dt} = C \frac{dU}{dt}, \quad (3)$$

$$U = I_{\text{ц}} R_{\text{ц}}, \quad (4)$$

Подставляя выражения (3) и (4) в (1), получим:

$$R_{\text{ц}} C \frac{dI}{dt} + I = \frac{Qv}{d}, \quad (5)$$

что представляет собой обобщенный закон Кирхгофа.

Если скорость частицы постоянна во времени, то решение этого уравнения примет вид:

$$I(t) = \frac{Qv}{d} \left(1 - e^{-\frac{t}{R_{\text{ц}} C}} \right). \quad (6)$$

Для достижения необходимой регистрации амплитуды сигнала и высокой скорости рассасывания заряда в газовом зазоре прикладывается напряжение, которое обеспечивает работу в лавинном режиме. В силу того, что скорость дрейфа электронов значительно превышает ионную, то логично расположить слой конвертера на катоде. Тогда электроны первичной ионизации будут иметь наибольший путь для рождения лавин, что повысит эффективность регистрации.

Развитие электронной лавины становится возможным, когда электрон первичной ионизации ускоряется до энергий, необходимых для ударной ионизации атомов газа, и возникновения еще одной электронно-ионной пары. Процесс многократно повторяется до тех пор, пока электронное облако не коснется анода.

Равномерность электрического поля в газовом зазоре будет обеспечиваться однородностью нанесения проводящей краски, отсутствием отклонений в толщине стекол-электродов в силу специфики их производства и постоянством ширины газового зазора вдоль всей длины детектора. Поверхностное сопротивление проводящей слоя должно быть на уровне 5–20 МОм/кВ для обеспе-

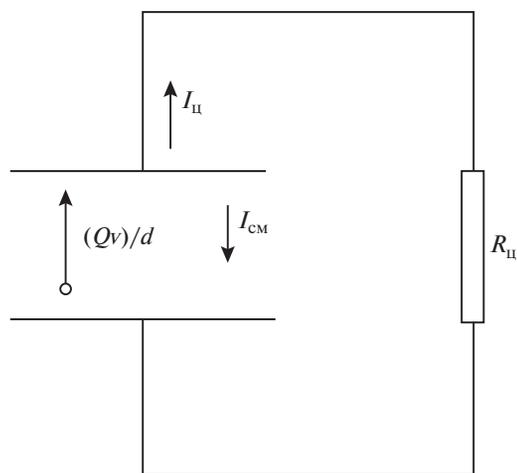
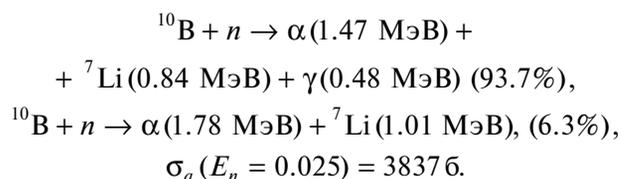


Рис. 2. Схематическое изображение электрической цепи детектора.

чения наведения сигнала на считывающие стрипы без значительных потерь.

ОЖИДАЕМЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТЕКТОРА

Продукты реакции конверсии нейтронов ядрами ^{10}B являются:



На рис. 3 показана, рассчитанная в программе моделирования Монте-Карло, зависимость эф-

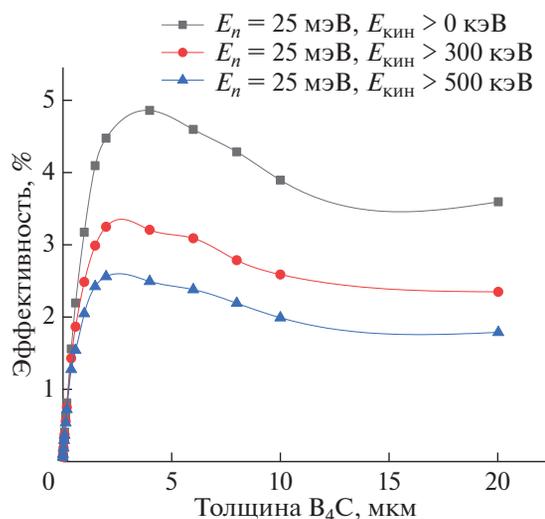


Рис. 3. Зависимость эффективности обнаружения в газовом зазоре как функция толщины конвертера.

Таблица 1. Пробеги продуктов реакции конверсии в карбиде бора

Частица	Характеристики	
	Энергия, МэВ	Пробег в B_4C , мкм
4He	1.47	3.34 ± 0.08
4He	1.78	4.13 ± 0.08
7Li	0.84	1.69 ± 0.08
7Li	1.02	$1,90 \pm 0.08$

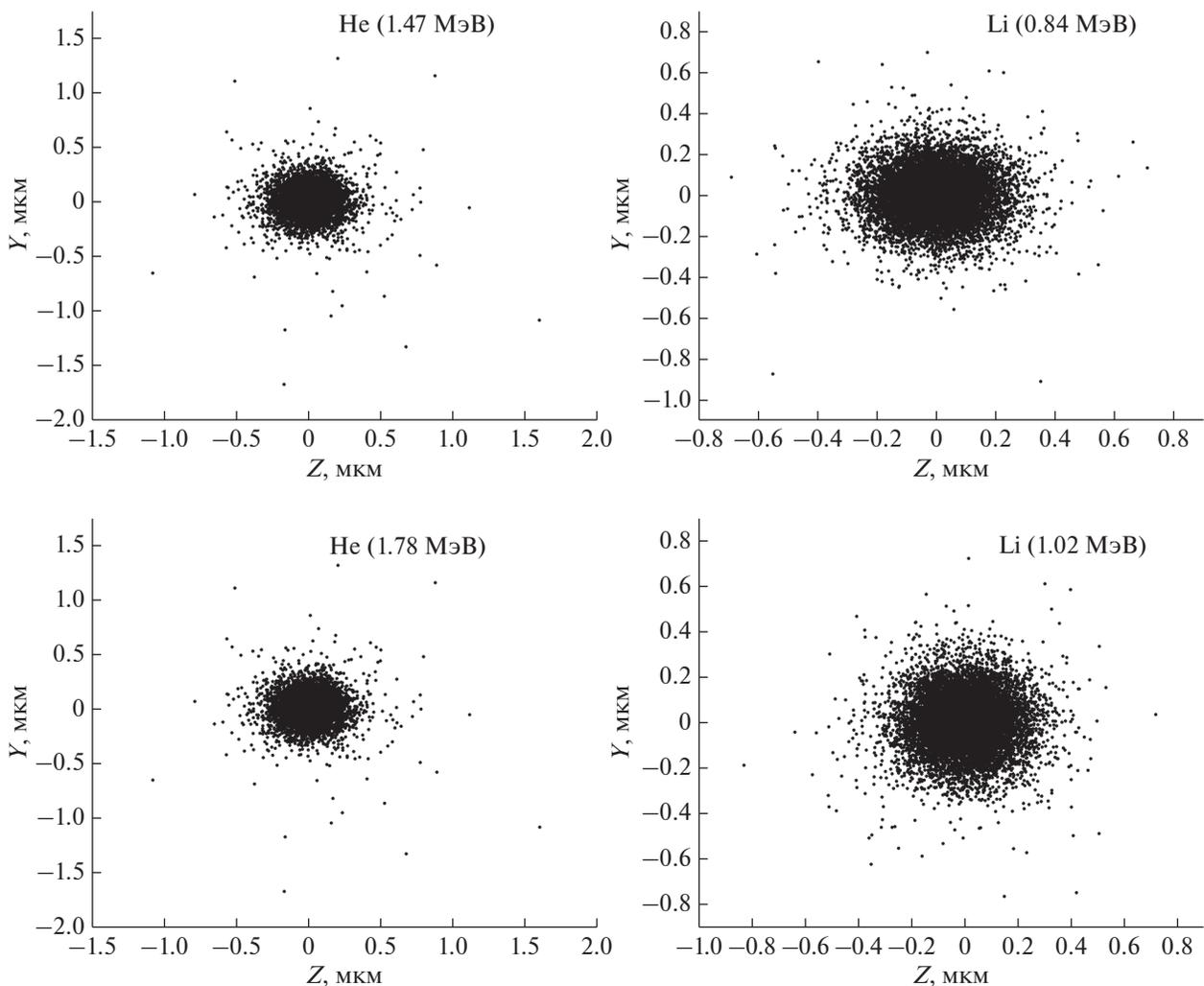
эффективности регистрации от толщины слоя конвертера.

Видно, что наибольшей эффективностью регистрации при пороге обнаружения неравно нулю будут обладать пленки карбида бора толщиной 1.5–2 мкм. Корреляция эффективности ре-

гистрации объясняется пробегами продуктов реакции конверсии в B_4C , рассчитанными в программном пакете SRIM и представленными в табл. 1.

Максимальный выход продуктов реакции конверсии соответствует углам 0° и 180° в СЦМ, поэтому наибольшую погрешность в определение позиции влета нейтрона будет вносить рассеяние продуктов реакции при прохождении пленки конвертера. При прохождении пленки карбида бора толщиной 2 мкм радиальное отклонение продуктов реакции конверсии, рассчитанное в SRIM, не превышает 2 мкм (рис. 4), что является пренебрежимо малой погрешностью в определении позиции нейтрона.

Для экспериментального исследования зависимости эффективности конверсии, как функции толщины конвертера, методом магнетронного распыления постоянного тока было выполнено напыление пленок карбида бора с толщиной 0.5, 1 и 2 мкм на стеклянные подложки и проведе-

**Рис. 4.** Рассеяния продуктов реакции конверсии при прохождении 2 мкм B_4C .

ны соответствующие измерения. Помимо этого, планируется изучение зависимости эффективности конверсии и степени рассеяния нейтронного пучка в зависимости от количества пленок конвертера.

Система сбора и накопления данных всегда предполагает наличие порога, ниже которого сигнал не записывается как событие. Чем тоньше будет слой конвертера, тем меньше будет ПППВ (ширина пика на половине высоты) и сдвиг в область меньших энергий испытает энергетический спектр продуктов реакции конверсии после их выхода из пленки. Это значит, что можно будет установить высокий порог, снижающий количество ложных срабатываний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Плоскопараллельные резистивные камеры нашли широкое применение в физике высоких энергий благодаря возможности создания детекторов большой площади с пикосекундным временным разрешением. Применение резистивных камер для регистрации нейтронов началось в 1990-е [24] и развивается до сих пор. Относительно малая эффективность регистрации (<5% для $\lambda = 1.8 \text{ \AA}$) существующих прототипов с одиночной пленкой $^{10}\text{B}_4\text{C}$ [25–27] вызывает необходимость в создании многозачерных ППРК с нанесенными на плавающие электроды пленки-конвертеры для достижения эффективности сравнимой с ^3He пропорциональными камерами.

Импульсный характер работы реактора ИБР-2 позволяет реализовывать ТОФ-методику при проведении нейтронографических экспериментов, поэтому высокое временное разрешение детектора тепловых нейтронов на основе ^{10}B -ППРК позволит улучшить информативность картины рассеяния.

БЛАГОДАРНОСТИ

Статья подготовлена при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования, соглашение № 075-10-2021-115 от 13 октября 2021 г. (внутренний номер 15.СИН.21.0021).

Конфликт интересов: авторы подтверждают, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rofors E., Mauritzson N., Perrey H. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2021. V. 999. P. 165170. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.165170>
2. *Ishikawa A., Watanabe K., Yamazaki A. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2022. V. 1025. P. 166074. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.166074>

3. *Nakamura T., Katagiri M., Toh K. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2014. V. 741. P. 42–46. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2013.12.043>
4. *McPheeters M., McKinny K., Yokie E.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2022. V. 1040. P. 167156. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.167156>
5. *Bedogni R., Gómez-Ros J.M., Lega A., Menzio L., Moraleda M., Pola A., Pietropaolo A., Ferrante Vero L.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2020. V. 983. P. 164595. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164595>
6. *Nakamura T., Tanaka H., Yamagishi H., Soyama K., Aizawa K., Ochi A., Tanimori T.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2007. V. 573. Iss. 1–2. P. 187. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2006.10.238>
7. *Bogdzel A.A., Kruglova V.V., Milkov V.M., Panteleev Ts.Ts., Churakov A.V.* // Physics of Atomic Nuclei. 2018. V. 81. № 10. P. 1465. <https://doi.org/10.1134/S1063778818100022>
8. *Кашук А.П., Левицкая О.В.* // ЖТФ. 2020. Т. 90. Вып. 4. С. 84. <https://doi.org/10.21883/JTF.2020.04.49074.84-19>
9. *Андреев В.А., Ганжа Г.А., Иванов Е.А. и др.* // ФТТ. 2010. Т. 52. Вып. 5. С. 964.
10. *Santonico R., Cardarelli R.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 1981. V. 187. P. 377.
11. *Lippmann C.* // Detector Physics of Resistive Plate Chambers, Dr. Dissertation, Europaischen Kernforschungszentrum, "European Organization for Nuclear Research (CERN). Frankfurt am Main. 2003. 179 p.
12. *Babkin V., Baskov V., Burdyko A. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2022. V. 1034. P. 166735. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.166735>
13. *Polese G., Paolucci P., Gomez-Reino R. et al.* // The Detector Control Systems for the CMS Resistive Plate Chamber in J. Phys. Conf. Ser. 2010. V. 219. P. 022019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/219/2/022019>
14. *Akindinov A., Anselmo F., Basile M. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2000. V. 456. Iss. 1–2. P. 16. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(00\)00954-2](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(00)00954-2)
15. The ARGO-YBJ Collaboration: *G. Aielli et al.* // Astroparticle Physics. 2009. V. 32. Iss. 1. P. 47. <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2009.05.005>
16. *Höglund C., Birch J., Andersen K. et al.* // J. Appl. Phys. 2012. V. 111. P. 104908. <https://doi.org/10.1063/1.4718573>
17. *Schmidt S., Höglund C., Jensen J., Hultman L., Birch J., Hall-Wilton R.* // J. Materials Science. 2016. V. 51. P. 10418. <https://doi.org/10.1007/s10853-016-0262-4>
18. *Arnaldi R., Chiavassa E., Colla A. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2004. V. 213. P. 284. [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(03\)01618-5](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(03)01618-5)
19. *Sauli F.* // Principle of Operation of Multiwire Proportional and Drift Chamber. Geneva: CERN Series Academic Training Lecture, CERN, 1977. V. 81. 92 p. <https://doi.org/10.5170/CERN-1977-009>
20. *Liu Z., Carnesecchi F., Williams M.C.S., Zichichi A., Zuyevski R.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A.

2019. V. 927. P. 396.
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.02.068>
21. *Margato L.M.S., Morozov A., Blanco A. et al.* // JINST. 2019. V. 14. P01017. [arXiv:1809.09677] [physics.ins-det].
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/14/01/P01017>
22. *Margato L.M.S., Morozov A.* // JINST. 2018. V. 13. P08007. [arXiv:1806.07167].
23. *Ramo S.* Currents Induced by Electron Motion // Proc. Inst. Radio Eng. 1939. V. 27. P. 584.
24. *Calligarich E., Cardarelli R., Cesana A., Colangelo S., Raselli G.L., Sandrelli G., Terrani M., Testi A.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 1991. V. A307. P. 142–144.
[https://doi.org/10.1016/0168-9002\(91\)90142-D](https://doi.org/10.1016/0168-9002(91)90142-D)
25. *Margato L.M.S., I, Morozov A., Blanco A. et al.* // JINST. 2021. V. 16. P07009.
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/07/P07009>
26. *Stefanescu I. et al.* // JINST. 2017. V. 12. P01019.
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/01/P01019>
27. *Potashev S.I., Burmistrov Yu., Drachev A.I. et al.* / Two-Dimensional Solid State Gaseous Detector Based on ^{10}B Layer for Thermal and Cold Neutrons // International Conference on Particle Physics and Astrophysics 10–14 October 2016, Moscow, Russian Federation in J. Phys. Conf. Ser. 2017. V. 798. P. 012160.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/798/1/012160>

Resistive Plate Chamber as Thermal Neutron Detector Based on B-10 Converter

M. O. Petrova^{1, 2, *}, A. A. Bogdzel¹, V. I. Bodnarchuk^{1, 2, 4}, O. Daulbaev^{1, 3}, V. M. Milkov¹,
 A. K. Kurilkin¹, K. V. Bulatov¹, A. V. Dmitriev¹, V. A. Babkin¹

¹Joint Institute for Nuclear Research (JINR), Dubna, Moscow oblast, 141980 Russia

²Dubna State University, Dubna, Moscow oblast, 141980 Russia

³The Institute of Nuclear Physics, Ministry of Energy Republic of Kazakhstan, Almaty, 050032 Kazakhstan

⁴National Research Center Kurchatov Institute, Moscow, 123182 Russia

*e-mail: mbelova@jinr.ru

Neutron-scattering methods for researching condensed matter allow obtaining information about the inner structure and dynamics of the sample under study. The creation of new high-fluxes neutron sources for studying of promising materials and various biological systems impose special requirements on the operating parameters of detector systems. New generation of thermal neutron detectors should have record-breaking characteristics in spatial and time resolution with high registration efficiency. The paper discusses the possibility of using and expected performance characteristics of ^{10}B -RPC for thermal neutron detection as part of searching new solutions for the implementation of neutron scattering station detector systems.

Keywords: position-sensitive thermal neutron detectors, magnetron sputtering of thin B4C films, resistive plate chamber, gaseous detectors, ^3He alternatives.